



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría En Ingeniería de Calidad y Productividad

Análisis comparativo del rendimiento de un motor M-Power-178-FD
utilizando mezclas de biodiésel-diésel fabricado por transesterificación en reactor
Batch y ultrasonido.

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:
Ing. Emanuel Acosta Escobar

Dirigido por:
Dr. Luis Alberto Morales Hernández

Dr. Luis Alberto Morales Hernández
Presidente

Firma

Dra. Marcela Gaytán Martínez
Secretario

Firma

M.C. Saúl López Ordaz
Vocal

Firma


M.I. Javier García Pérez
Suplente

Firma

M.A.P. Agustín Martínez Rodríguez
Suplente

Firma


Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad de Ingeniería


Dra. En C. Ma. Guadalupe Flavia
Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

En la presente investigación el proceso de transesterificación se realizó mediante dos métodos, el convencional (reactor Batch) y sonoquímica (ultrasonido). Se utilizaron aceites residuales de cocina y se caracterizó la materia prima midiendo parámetros de acidez, viscosidad y densidad para obtener biodiésel por ambos métodos con la misma materia prima. Durante el proceso de transesterificación se utilizaron los mismos reactivos para ambos métodos y el biodiésel obtenido fue sometido a pruebas de poder calorífico como medida de calidad del producto. Para probar el rendimiento que tiene el biodiésel fabricado por cada método en el motor M-Power-178 FD, se realizó un diseño de experimentos factorial completo en el que se propusieron tres variables de control: porcentaje de mezcla de biodiésel-diésel, revoluciones por minuto del motor y la carga que se le aplica al mismo, para conocer los efectos que tiene una conducción real en el consumo de combustible del motor y las emisiones contaminantes. Para controlar las cargas a las que será sometido el motor utilizamos un dinamómetro que simula el torque que debe aplicar el motor cuando es sometido a diferentes condiciones de conducción, para controlar las revoluciones del motor utilizamos el pedal acelerador adaptado al banco de prueba y las mezclas de biodiésel-diésel se mezclan en el laboratorio en proporciones de B10 y B25. Para medir las emisiones contaminantes utilizamos un equipo Bosch para monitoreo de emisiones y para medir el consumo de combustible utilizamos la distancia recorrida y la cantidad de combustible suministrada al motor.

Palabras claves: Biodiésel, transesterificación, reactor Batch, ultrasonido, consumo de combustible, emisiones contaminantes.

SUMMARY

In the present research, the transesterification process was carried out by two methods, the conventional process (Batch reactor) and sonochemistry (ultrasound). Waste cooking oils were used and this raw material was characterized measuring acidity index, viscosity and density parameters to get biodiesel by both methods with the same raw material. During the transesterification process there were used the same reagents for both methods and the biodiesel obtained was subjected to calorific value tests as a measure of product quality. To test the performance of the biodiesel manufactured by each method in the engine M-Power-178 FD, a factorial design of experiments was carried out in which three control variables were proposed: biodiesel-diesel mixture percentage, revolutions per minute of the engine and the load applied to it, to know the effects of a real conduction in the engine fuel consumption and the polluting emissions using biodiesel-diesel blends at different percentages, different revolutions per minute of the engine and with different loads applied to the engine. To control the loads to which the engine will be subjected we use a dynamometer that simulates the torque that the engine has to apply when is subjected to different driving conditions, to control the revolution per minute of the engine we use the accelerator pedal adapted to the test bench and the biodiesel-diesel blends are mixed in the laboratory in proportions of B10 and B25. To measure the polluting emissions we use a Bosch equipment for monitoring polluting emissions and to measure the fuel consumption we use the distance traveled and the amount of fuel supplied to the engine.

Key words: Biodiesel, transesterification, Batch reactor, ultrasound, fuel consumption, polluting emissions.

A mi madre **Sonia Escobar Ayala**

A mi padre **Salvador Acosta Marañón**

A mis hermanos **Iván** y **Nancy**

A mi compañera de vida **Fabiola**

AGRADECIMIENTOS

- Al Doctor Luis Alberto Morales Hernández por compartir su conocimiento y experiencia.
- Al Maestro Saúl López Ordaz por su incansable atención, seguimiento y guía para llevar a cabo este Proyecto.
- A todos mis maestros y sinodales de la Maestría que me otorgaron su apoyo y conocimiento.
- A la Universidad Autónoma de Querétaro por darme la oportunidad de realizar este proyecto con todas las facilidades que otorga.
- A mi familia por ser la principal fuente de apoyo en situaciones complicadas.
- A Fabiola, por ser parte de mi vida tantos años, siempre me ha motivado a seguir superándome.
- A mis compañeros de la Maestría, todos los días fueron experiencias, por su gran apoyo.
- A CONACYT por la beca otorgada para los estudios de maestría.

CONTENIDO

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	6
1.2 Justificación	8
1.2 Hipótesis.....	10
1.3 Objetivo general	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Biodiésel.....	11
2.2 Aceite residual de cocina para fabricación de biodiésel	12
2.2.1 Caracterización del aceite residual de cocina	12
2.2.2 Características físico-químicas del aceite residual de cocina.....	13
2.2.2.1 Viscosidad del aceite residual de cocina	13
2.2.2.2 Índice de acidez del aceite residual de cocina	13
2.2.2.3 Densidad del aceite residual de cocina	14
2.3 Reacción de transesterificación.....	14
2.3.1 Transesterificación en reactor Batch	15
2.3.2 Transesterificación por ultrasonido.....	16
2.4 Parámetros de calidad del biodiésel.....	16
2.4.1 Norma ASTM D-6751	17
2.4.2 Poder calorífico del biodiésel.....	17
2.4.3 Densidad del biodiésel	18
2.4.4 Índice de acidez del biodiésel.....	18
2.4.5 Viscosidad del biodiésel	18
2.4.6 Punto de inflamación del biodiésel	19
2.5 Motor diésel M-power-178-DF	19

2.5.1 Características del rendimiento del motor diésel.....	19
2.5.1.1 Consumo de combustible	21
2.5.1.2 Rendimiento mecánico	21
2.5.1.3 Emisiones contaminantes.....	22
2.5.1.4 Mezclas de biodiésel-diésel.....	22
2.5.1.5 Revoluciones por minuto	22
2.5.1.6 Cargas del motor	23
2.5.1.7 Torque	23
2.5.1.8 Potencia de motor y potencia de combustible	24
2.6 Equipo de medición y métodos	24
2.6.1 Determinación del índice de acidez.....	24
2.6.2 Picnómetro	25
2.6.3 Viscosímetro.....	25
2.6.4 Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	26
2.6.5 Punto de inflamación.....	26
2.6.6 Opacímetro.....	27
2.6.7 Dinamómetro.....	27
2.7 Diseño de experimentos.....	27
3. METODOLOGÍA	28
3.1 Diagrama de proceso	28
3.2 Diseño de experimentos.....	29
3.3 Materiales y equipo	29
3.4 Caracterización de la materia prima.....	29
3.4.1 Proceso para obtener la densidad del aceite residual de cocina.....	30
3.4.2 Proceso para obtener la viscosidad del aceite residual de cocina	30
3.4.3 Proceso para obtener el índice de acidez del aceite residual de cocina	31
3.5 Producción de biodiésel por transesterificación en reactor	32
3.6 Producción de biodiésel por transesterificación mediante ultrasonido	33
3.7 Pruebas de calidad de biodiésel.....	35
3.7.1 Proceso para obtener la densidad del biodiésel.....	35

3.7.2	Proceso para obtener el índice de acidez del biodiésel	36
3.7.3	Proceso para obtener la viscosidad del biodiésel.....	36
3.7.4	Proceso para obtener el poder calorífico del biodiésel.....	37
3.7.5	Punto de inflamación.....	38
3.8	Pruebas de rendimiento en Motor M-Power-178 FD	40
3.8.1	Control de variables del experimento	40
3.8.1.1	Velocidad del motor.....	40
3.8.1.2	Carga del motor.....	41
3.8.1.3	Mezclas de biodiésel-diésel.....	41
3.8.1.4	Medición de variables de rendimiento	42
3.8.1.5	Emisiones contaminantes.....	42
3.8.1.6	Consumo de combustible	42
3.9	Análisis estadístico.....	42
3.9.1	Prueba t.....	43
3.9.2	ANOVA.....	43
3.9.3	Análisis de regresión	43
3.9.4	Definición del diseño de experimentos.....	43
3.10	Análisis económico del biodiésel.....	44
4.	RESULTADOS.....	47
4.1	Caracterización del aceite residual de cocina	47
4.1.1	Índice de acidez del aceite residual de cocina	47
4.1.2	Densidad del aceite residual de cocina	47
4.1.3	Viscosidad cinemática del aceite residual de cocina.....	48
4.2	Producción de biodiésel	48
4.2.1	Producción de biodiésel mediante transesterificación en reactor Batch.....	48
4.2.2	Producción de biodiésel mediante transesterificación por ultrasonido	49
4.3	Caracterización del biodiésel.....	49
4.3.1	Acidez del biodiésel transesterificado en reactor Batch y ultrasonido	50
4.3.2	Densidad del biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido	50
4.3.3	Viscosidad cinemática del biodiésel transesterificado por ambos métodos .	51

4.3.4 Poder calorífico del biodiésel transesterificado por ambos métodos	52
4.3.5 Punto de inflamación del biodiésel transesterificado por ambos métodos ...	53
4.4 Resultados de las pruebas de rendimiento	54
4.4.1 Resultados de la medición del consumo de combustible para el biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido	54
4.4.2 Resultados de la medición de opacidad (emisiones contaminantes) para ambos biocombustibles.....	58
4.4.2.1 Análisis del impacto ambiental	62
4.4.3 Validación del sistema de medición del consumo de combustible	63
4.5 Análisis estadístico.....	65
4.5.1 Comparación de medias de las características de calidad del biodiésel.....	65
4.5.1.1 Comparación de las medias de la acidez de los biocombustibles	65
4.5.1.2 Comparación de medias de la densidad de los biocombustibles y diésel .	66
4.5.1.3 Comparación de medias de la viscosidad de los biocombustibles y diésel	68
4.5.1.4 Comparación de medias del poder calorífico de los biocombustibles y diésel	69
4.5.1.5 Comparación de medias del punto de inflamación de los biocombustibles y diésel.....	71
4.5.2 Poder calorífico de los biocombustibles vs rendimiento	72
4.5.3 ANOVA´S de los diseños de experimentos	77
4.5.3.1 ANOVA de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado en reactor Batch.....	77
4.5.3.2 ANOVA de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido.....	79
4.5.3.3 ANOVA del consumo de combustible del motor utilizando biodiésel transesterificado en reactor Batch.....	82
4.5.3.3 ANOVA del consumo de combustible del motor utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido	85
5. CONCLUSIONES	88
6. REFERENCIAS	91

1. INTRODUCCIÓN

El biodiésel está ganando aceptación debido a que es una fuente energía renovable y no tóxica, además puede ser producida a base de aceites residuales de cocina, lo que promueve el reciclaje y la disminución de contaminación en el agua. Químicamente, las propiedades del biodiésel son muy parecidas al diésel, por esta razón llevarlo a la aplicación requiere muy pocas o nulas modificaciones a los motores, lo que lo posiciona como la mejor opción para sustituir a los combustibles fósiles (Fazal et al., 2018).

Se ha demostrado que la transesterificación es una de las mejores maneras para mejorar las propiedades del combustible de los aceites y grasas reciclados. La transesterificación es el proceso más común para fabricar biodiésel, en esta reacción, los triglicéridos, reaccionan con un alcohol, para producir ésteres monoalquílicos y glicerol. Varios aspectos de la reacción, como son: temperatura de reacción, velocidad de agitación, tipo de catalizador, relación molar y tiempo de reacción, entre otros, afectan directamente el proceso y la calidad final del producto (Kumar et al., 2010; Bhuiya et al., 2015).

La transesterificación por ultrasonido se utiliza para acelerar el tiempo de reacción y la tasa de conversión de materia prima a biodiésel, las mejoras en su velocidad se dan por medio de la cavitación. La irradiación con ultrasonido ofrece una vía rápida y fácil para producir biodiésel mediante el uso de catalizadores básicos o ácidos. Cuando la intensidad aumenta, se producirá un colapso entre las burbujas de aceite y catalizador, este uso de frecuencias sonoquímicas mejora la mezcla entre ambos, lo que nos lleva a reducir la energía empleada en el proceso (Dahai Yu et al., 2010; Yu et al., 2017).

Las características de rendimiento del motor están sometidas principalmente a las condiciones del combustible: la viscosidad, el poder calorífico, el índice de acidez, la humedad, la fuente de la materia prima, entre otros. Algunos

componentes del motor están directamente expuestos a la viscosidad del combustible, la bomba de combustible y los inyectores pueden verse afectados por una alta viscosidad del biodiésel. Para resolver este problema se han utilizado mezclas de biodiésel con diésel a diferentes proporciones y se ha experimentado para saber los efectos de diferentes factores en el motor, las investigaciones demuestran que a mayor viscosidad de combustible, mayor es el consumo de combustible (Çelebi et al., 2017).

Las mezclas que se manejan para utilizar biodiésel son de suma importancia debido a las recomendaciones de cada motor. Generalmente cuando el combustible tiene una mayor viscosidad que el biodiésel, comúnmente puede dañar componentes del motor, disminuir la tasa de inyección y la vaporización de los inyectores, por lo tanto, afecta directamente la potencia del motor debido a la combustión incompleta. Un combustible con altos niveles de humedad aumenta la viscosidad del combustible por lo que es necesario controlar la humedad desde la materia prima y mantenerla a niveles bajos (Elsanusi et al., 2017).

Por esta razón se trabajará con la materia prima que presente las mismas características físico-químicas para ambos métodos de transesterificación, asegurando bajos niveles de humedad y acidez. Además, se debe tener en consideración que todos los motores diésel en la actualidad cuentan con un sistema de combustible más avanzado que incluye un filtro de combustible, que además de servir como separador de partículas de suciedad que pudieran llegar al motor, sirve como separador de agua del combustible, de esta manera los fabricantes han conseguido minimizar el paso de agua hacia el motor.

Las concentraciones de mezclas de biodiésel pueden ser muy variadas. Las más comunes son de B5 a B20 (5% y 20% de biodiésel mezclado con diésel). La American Society for Testing and Materials (ASTM, por sus siglas en inglés), ha aprobado la mezcla B5 para una operación segura en cualquier motor diesel. La mezcla más común utilizada en Estados Unidos es el B20, representa para los

usuarios un buen equilibrio entre emisiones, costo, desempeño en frío, compatibilidad con los motores y capacidad para actuar como solvente y se mantiene bajo la Ley de Política Energética (Energy Efficiency and Renewable Energy, 2017).

Las condiciones a las que se debe someter un motor para evaluar el rendimiento de un motor de combustión interna pueden ser variadas. Existen pruebas estáticas y pruebas dinámicas. Las pruebas dinámicas se realizan dentro de un laboratorio a condiciones controladas y se llevan a cabo mediante un dinamómetro que simula los viajes “típicos” en una ciudad o carretera, así mismo simula el ambiente de conducción “normal” de cualquier usuario (Energy Efficiency and Renewable Energy, 2017).

El rendimiento, emisiones y la presión en cilindros del motor han sido medidos a plena carga de motor (altas revoluciones por minuto). Las investigaciones concluyen ~~en~~ que el rendimiento de las mezclas de biodiésel a proporciones de B20, B50 y B100 no son constantes en cada condición de operación del motor, sin embargo, mientras el contenido de biodiesel en la mezcla incrementa, el consumo de combustible tiende a disminuir, así mismo, el porcentaje de emisiones de CO₂ disminuye notablemente. Este análisis reveló que la velocidad de combustión es más lenta para mezclas de biodiesel a bajas velocidades, y más rápida a altas velocidades, lo que provoca que a altas velocidades el retraso de encendido sea mayor (Mattarelli et al., 2015).

A pesar de que los motores diésel tienen una alta eficiencia térmica, la preocupación sobre las emisiones contaminantes ha crecido debido a las nuevas y estrictas regulaciones al respecto. La volatilidad y contenido de oxígeno de un combustible en gran proporción presentan un gran potencial para mejorar el rendimiento y las características de emisiones contaminantes del motor, sin embargo, la baja volatilidad y alta viscosidad del biodiésel lo convierten en un problema. Se han hecho investigaciones sobre mezclas para aumentar la volatilidad

y reducir la viscosidad y se ha observado que bajo estas condiciones de combustible, una mezcla de biodiésel B15 tiene la mejor eficiencia térmica en comparación con otras mezclas estudiadas (Li et al., 2017).

Las características de rendimiento del motor como el consumo de combustible, la eficiencia térmica, la potencia y las emisiones, han sido probadas a dos distintas mezclas de biodiesel B5 y B20, estas dos mezclas fueron utilizadas en un motor diésel a velocidades variables del motor entre 1200 y 2600 rpm. Las pruebas fueron estáticas y el estudio concluyó en que la potencia aumenta en tanto aumenta la mezcla de biodiésel, sin embargo, el consumo de combustible aumenta debido a que es un combustible más oxigenado y su combustión es mejor (Adaileh y Alqdah, 2012).

El consumo de combustible en un motor se puede calcular en función de los datos técnicos del vehículo y del motor, sin embargo, combinando las características químicas del combustible con muchos otros factores que afectan el consumo, tales como el rendimiento del vehículo, las carreteras, las condiciones del tráfico, la distribución de carga en el vehículo, la conducción, la velocidad, condiciones ambientales, condiciones del camino, etc., hacen que sea difícil medir la tasa de consumo de combustible del motor (Du et al., 2017).

Se ha demostrado que el consumo de combustible puede aumentar en relación al modo de conducción, una conducción “agresiva” puede aumentar el consumo de 12% a 40%. La cantidad de paradas debido a las carreteras, tráfico o condiciones del camino pueden ser simuladas a ciertas medidas en laboratorio para obtener datos más precisos que nos lleven a ver el comportamiento del consumo con conducciones “normales” (Rakha y Ding, 2003; Carrese et al., 2013).

La eficiencia térmica del motor se ve afectada por varias características como: la calidad del combustible, las características del motor y las altitudes a las que esté sometido el motor. El número de cetano del biodiésel y el poder calorífico influyen en el rendimiento de la eficiencia térmica y se ha observado que es

beneficioso para disminuir la duración de la combustión, para mejorar la temperatura en el cilindro al hacer la combustión y mejorar la eficiencia térmica, sin embargo, el factor de la altura sobre el nivel del mar reduce la eficiencia con el aumento en la altitud (Chao et al., 2013; Wang et al., 2013).

La eficiencia térmica del motor diesel apenas alcanza un tercio de la energía generada en la cámara de combustión. La mezcla aire-combustible que se da dentro de la cámara de combustión influye de gran manera sobre el consumo de combustible y la eficiencia térmica, entre mejor sea la mezcla del combustible con oxígeno, mejor será la combustión y será mejor la eficiencia térmica y la potencia de salida. La investigación también ha demostrado que la eficiencia del motor está determinada por el diseño de la cámara de combustión y hasta el más pequeño detalle puede afectar de gran manera la eficiencia (Goel et al., 2017; Varun et al., 2017).

La potencia del motor se ve afectada por la presencia de agua en el combustible. Atadashi et al., (2012), reportaron que varios investigadores recomiendan tener un porcentaje menor de 0.06% de peso en la materia prima para fabricar biodiésel, esto con el fin de evitar problemas de rendimiento durante la reacción en el reactor Batch. Asegurar estos parámetros para llegar al producto final se reflejará en una buena combustión en el motor. Sin embargo otra investigación demuestra que añadir pequeñas cantidades de agua, 2%, al diesel puro, produjo un aumento significativo en la potencia del motor, pero también concluye que sobrepasar este porcentaje disminuyó la potencia y el par motor (Seifi et al., 2016).

Las características físicas y químicas del motor afectan la potencia del mismo, una buena atomización y vaporización del combustible junto con una mezcla correcta de aire-combustible puede aumentar hasta en un 7% la potencia. La influencia negativa de la altura sobre el motor se mejora drásticamente con la aplicación de un turbo cargador que recicla los gases de escape y los recircula a

alta presión a la cámara de combustión para reponer la pérdida de aire por la altura (Rahman et al., 2015).

Actualmente en la Universidad Autónoma de Querétaro, la Facultad de Química está produciendo biodiésel a partir de reciclar diferentes tipos de aceites usados de cocina, se están probando mezclas y se está trabajando en conjunto con la Facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río, para hacer las pruebas en los motores diésel al interior de los laboratorios de Ingeniería Automotriz. La Universidad Autónoma de Querétaro ya cuenta con cinco camiones que acoplan la mezcla diésel-biodiésel como combustible para el transporte escolar universitario y se están realizando las pruebas correspondientes sobre la calidad en la emisión de gases efecto invernadero y el rendimiento del biodiésel en los motores para dar información más precisa sobre los efectos de las mezclas diésel-biodiésel en el motor.

1.1 Planteamiento del problema

Existen muchos factores que afectan la medición de las variables de rendimiento de un motor de combustión interna, la variabilidad que estos factores generan hacen que sea muy difícil medir con precisión los parámetros del rendimiento. Podemos darnos una idea más precisa del desempeño del motor simulando ciertas condiciones de conducción que se consideran normales por cualquier persona. El rendimiento del motor es proporcional a la calidad del biodiésel, existen muchas investigaciones sobre la calidad de este biocombustible, desde las variables de la materia prima que influyen en la calidad final como las características del proceso pero son pocos los estudios donde se pueda apreciar una comparación donde haya una diferencia significativa entre los efectos que producen en el rendimiento del motor el biodiésel fabricado con transesterificación en reactor Batch y el fabricado por ultrasonido.

Existen ciertas dudas que nos hacen pensar que el biodiésel fabricado por los dos procesos es diferente, por ejemplo, la presencia de humedad durante el

proceso de transesterificación común provoca problemas en el proceso, produce jabones, que son productos de la saponificación en la reacción cuando se utiliza hidróxido de potasio o de sodio y hace más difícil la separación de la glicerina. Se debe tener cuidado con las condiciones de la reacción, especialmente con la temperatura y cantidad de catalizador para reducir al máximo la saponificación. Los índices de humedad recomendados son muy bajos, sin embargo, el proceso de transesterificación por ultrasonido produce menos jabones y no necesita hacer lavados para separar los restos que se generarían en el proceso de transesterificación en reactor Batch (Rodríguez, 2016).

Otro ejemplo que se puede mencionar, es que en el proceso de transesterificación en reactor Batch no se puede utilizar materia prima con índices de acidez muy alta ya que implica muchos problemas para poder convertir la materia prima en biodiesel, en cambio, en el proceso de ultrasonido se pueden utilizar aceites residuales con índices de acidez muy altos ya que la conversión a biodiesel es prácticamente del 100% (Meraz, 2016).

La mayoría de los investigadores describen a la transesterificación por ultrasonido con muchas ventajas sobre la transesterificación tradicional en reactor Batch (que es la más utilizada para producir biodiesel), sin embargo, no hay muchos estudios que se refieran a haber probado estos combustibles con cada método en motores, bajo condiciones reales de conducción para hacer una comparación. Es cierto que en términos de rendimiento químico, la sonoquímica presenta grandes ventajas respecto al método de transesterificación en reactor Batch, pero no existe una comparación real entre ambos, referidos directamente a los motores para saber si su composición química afecta significativamente las variables de rendimiento en el motor diésel (Rodríguez, 2016).

Varios autores refieren que una proporción alta de mezcla diésel-biodiésel es dañina para ciertos componentes del motor (Çelebi et al., 2017), pero hay otros investigadores que refieren que entre más biodiesel haya en la mezcla mejor será

la combustión debido a que la alta oxigenación del combustible representa una mejor combustión y por ende una mejor potencia (Adaileh y Alqdah, 2012). Mattarelli et al., (2015) menciona que utilizar mezclas con porcentaje de biodiésel alto puede representar problemas en el retraso de encendido del motor, debido a que con un alto número de cetano la combustión es más rápida y los motores no están adaptados a sufrir ese retraso.

El consumo de combustible y las emisiones contaminantes, entre otros, son variables que han sido mencionadas anteriormente, abordadas desde diferentes puntos de vista, pero no hay resultados concretos que puedan quitar la incertidumbre de los consumidores de conocer los efectos del biodiésel en las condiciones reales de manejo, que éstas sean validadas y que aseguren un buen funcionamiento del motor.

1.2 Justificación

La necesidad mundial para encontrar fuentes de energía limpia y renovable, se ha vuelto una prioridad para los científicos en el mundo. Los biocombustibles han ganado terreno como la mejor opción para sustituir a los combustibles fósiles. El biodiésel, por sus propiedades físico-químicas, que son parecidas a las del diésel, ha ganado mayor aceptación para sustituir al diésel convencional. La materia prima para la producción de biodiésel es el principal inconveniente para una producción a gran escala, debido a que se considera que utilizar aceite vegetal virgen para su producción puede interferir con el consumo humano.

Ante este panorama se han realizado avances científicos y tecnológicos para poder utilizar aceite quemado de cocina como materia prima para su producción. El método más común para producir biodiésel es el proceso de transesterificación en reactor Batch, sin embargo, hay nuevos y novedosos procesos para mejorar la producción y poder aprovechar mejor los recursos para su producción. La transesterificación por ultrasonido resulta ser un método que reduce los costos y tiempos de producción y permite utilizar materia prima con niveles de

acidez más altos, lo que permite aprovechar al máximo la materia prima para la producción de biodiésel.

Siendo los biocombustibles futuras promesas para sustituir los combustibles fósiles, ha provocado que aumente la preocupación sobre su eficacia y sobre sus efectos secundarios en los motores de combustión interna. A partir de esto, se han hecho pruebas en los motores para medir los parámetros de combustión en el motor y sus características de rendimiento. A pesar de que se han hecho muchas investigaciones para medir las características de rendimiento de los motores diésel existe la incertidumbre de saber si los efectos son diferentes si se utiliza biodiésel transesterificado por diferentes métodos.

Para comprobar que existe una diferencia entre los efectos del biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido es necesario hacer una experimentación para medir las características de rendimiento de un motor diésel con ambos biocombustibles. Como se quiere conocer cómo se comportan las variables de rendimiento del motor al utilizar mezclas de biodiésel-diésel, es necesario simular condiciones de conducción reales. Por esta razón se eligieron tres variables de control para el experimento que se consideran importantes por su correlación con el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Las mezclas de biodiésel-diésel, la velocidad de operación del motor y la carga a la que se somete el motor, son las variables que se eligieron para simular una conducción real de un automóvil y así poder medir el consumo de combustible y las emisiones de hollín del motor.

Con esta investigación se pretende realizar una comparación entre los efectos sobre el rendimiento de motor que produce el biodiésel transesterificado en reactor Batch y el biodiésel transesterificado por ultrasonido. Esto con la finalidad de comprobar si el método de ultrasonido es mejor en sus características físico-químicas y para saber si se obtienen mejores rendimientos en el motor. Con esto se pretende tener evidencia que diga que es viable invertir en un nuevo laboratorio

implementando este método que resulta más rápido y económico para la producción de biodiésel.

1.3 Hipótesis

El biodiésel transesterificado por ultrasonido reduce el consumo de combustible y las emisiones contaminantes de un motor M-Power-178FD comparado con el biodiésel transesterificado en un reactor Batch.

1.4 Objetivo general

Comparar los efectos de las mezclas de diesel-biodiesel fabricado por el método de transesterificación en reactor Batch con las mezclas fabricadas por el método de transesterificación por ultrasonido para comprobar si existe una diferencia significativa entre los dos procesos sobre el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del motor M-Power-178FD.

1.5 Objetivos específicos

- Medir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del motor utilizando proporciones de B10 y B25 de mezclas de biodiésel-diésel producidas por el método de transesterificación en reactor Batch y por el método de ultrasonido para comparar el rendimiento producido por ambos biocombustibles.
- Obtener los parámetros que proporcionen el mejor consumo de combustible y la menor cantidad de emisiones contaminantes, probando con diferentes velocidades del motor, cargas de motor y mezclas biodiésel-diésel.
- Medir las características de calidad del biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido para relacionarlas con el rendimiento del motor y obtener una comparación de los efectos de cada combustible en el motor.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Biodiésel

El biodiésel es una fuente de energía renovable y limpia que reduce las emisiones contaminantes de los motores diésel y proporciona una mejor lubricación debido a su mayor viscosidad (Varatharajan y Pushparani, 2018). Es una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos obtenidos de aceites vegetales o grasas animales, es un combustible no tóxico y ecológicamente amigable, además su poder calorífico es similar al del diésel ya que se encuentra entre 44.8 MJ/kg y 45 MJ/kg, muy parecido al del diésel que es de 45 MJ/kg (Atadashi et al., 2012).

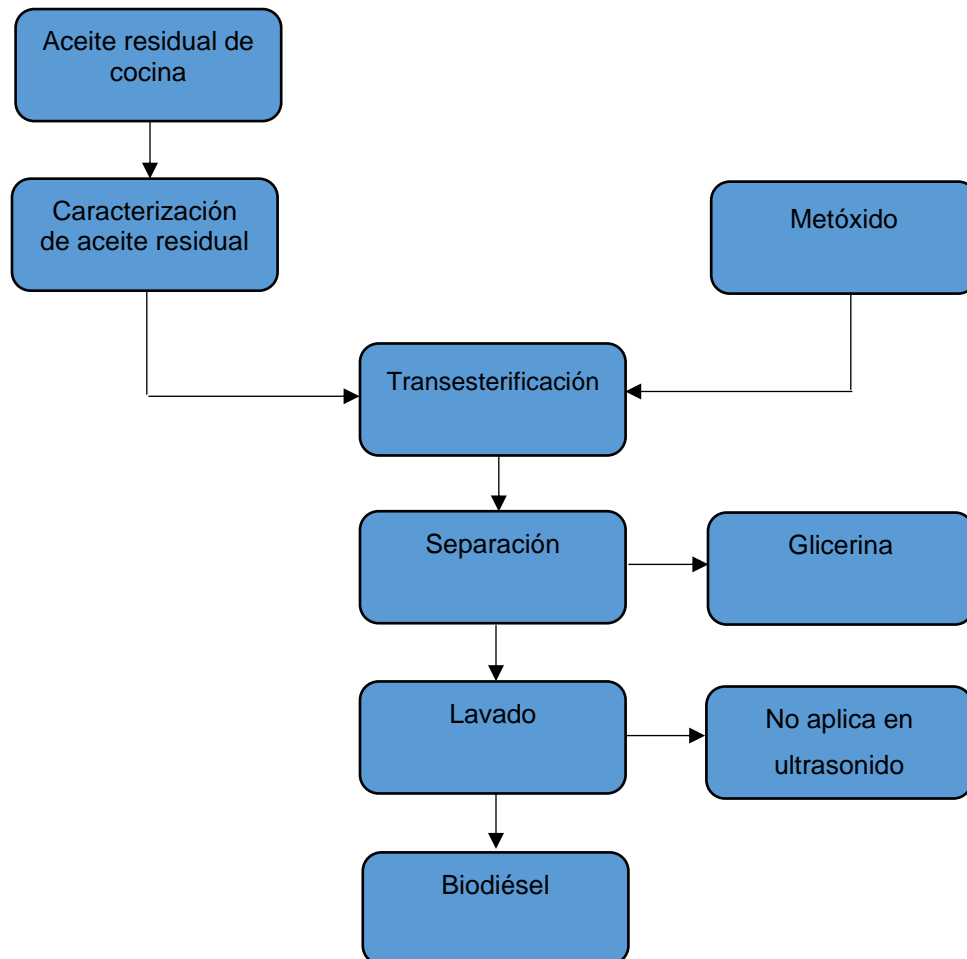


Figura 1. Diagrama general para la obtención de biodiésel. (Autoría propia)

2.2 Aceite residual de cocina para fabricación de biodiésel

Los aceites usados para la producción de biodiésel pueden ser comestibles o no comestibles, el aceite reciclado usado para la producción de biodiésel es habitualmente vegetal. El aceite puede provenir de diferentes tipos de plantas como de palma, cacahuete, girasol, oliva, colza y soja que son aceites comestibles y generalmente se reciclan después del uso del consumo humano, y por otro lado tenemos otras fuentes como son el aceite de jatropha, linaza, mahua, semilla de algodón y de ricinio, estos son aceites no comestibles para los humanos y también son fuentes de las que se puede extraer el aceite para producción de biodiésel (Kirubakaran y Selvan, 2018).

2.2.1 Caracterización del aceite residual de cocina

Las grandes cantidades de aceite comestible que se requerirían para una producción masiva de biodiésel pueden conducir a una crisis en el suministro de alimentos y un desequilibrio económico (Canesin et al., 2014). La alternativa es utilizar aceites residuales de cocina como materia prima, sin embargo, tienen propiedades diferentes a los aceites refinados o crudos, ya que son degradados por reacciones hidrolíticas y oxidativas que ocurren durante su uso.

Para maximizar el rendimiento de la reacción y obtener un biodiésel de calidad se deben tener bajos contenidos de agua, ácidos grasos libres (AGL), gomas y material insaponificables. Esto es difícil debido a que la mayoría del aceite residual de cocina es reciclado y tienen alta acidez. La acidez y la humedad son las impurezas de la materia prima que tienen mayor efecto negativo en la reacción.

Las características del aceite residual de cocina dependen del uso que se les dio, la temperatura a la que fueron sometidos y a la cantidad de agua que puedan contener, ya que la hidrólisis aumenta el contenido de ácidos grasos. Por otro lado, el contenido de agua y AGL del aceite afectan directamente el proceso de transesterificación y por lo tanto la calidad final del biodiésel. Es por eso que se

recomienda caracterizar las variables de la materia prima que pueden afectar el producto final, como la viscosidad, la densidad, el índice de yodo, la humedad y los ácidos grasos (Pascacio et al., 2016).

2.2.2 Características físico-químicas del aceite residual de cocina

Las principales características del aceite residual de cocina que se deben tener en cuenta para considerar que la materia prima para la producción de biodiésel es de calidad son: viscosidad, densidad, índice de acidez y contenido de humedad. Estas características del aceite influyen directamente en la reacción de transesterificación y por lo tanto afectan el rendimiento de la misma y la calidad final del biodiésel.

2.2.2.1 Viscosidad del aceite residual de cocina

El aceite residual de cocina debería ser procesado a viscosidades bajas para poder ser usado como sustituto del diésel. La alta viscosidad de los aceites vegetales causa una combustión incompleta en la cámara de combustión. La transformación de ácidos grasos en metil ésteres es la tecnología más usada para disminuirla viscosidad del aceite. Mantener la materia a bajos niveles de acidez ayuda a que el proceso de transesterificación sea más eficiente y ayuda a que la calidad final del biodiésel sea mejor ya que nos da niveles aceptables de viscosidad y permite que el flujo de combustible por los inyectores hacia el motor sea mejor y por esa razón el consumo de combustible mejora (Kim and Han, 2012).

2.2.2.2 Índice de acidez del aceite residual de cocina

Únicamente los aceites altamente refinados deberían ser usados como materia prima para producir biodiésel por el método de transesterificación en reactor Batch. Para este mismo proceso el contenido de ácidos grasos debería estar debajo de 0.5%, el uso de aceites con contenido arriba de ese porcentaje durante la reacción en reactor puede llevarnos a producir jabones que son causantes de una

serie de dificultades para separar y purificar el biodiésel, lo que nos puede llevar a utilizar más recursos para llegar a la calidad final del producto. Para poder trabajar con una acidez alta es necesario utilizar catalizadores ácidos, sin embargo, esto provocaría mayor gasto en energía debido a las altas temperaturas que se deben alcanzar en la reacción, mayor tiempo de reacción y mayor consumo de agua (Saifuddin et al., 2009).

2.2.2.3 Densidad del aceite residual de cocina

La densidad es una propiedad importante y de fácil medición que tiene correlación con otras propiedades importantes de la materia prima para evaluar el desempeño de los motores diésel, como el poder calorífico y el índice de cetano, la determinación de la densidad es fundamental en los combustibles, dado que estas sustancias presentan generalmente variaciones en su volumen debido a cambios en la temperatura constante (Benjumea H et al., 2006). Una mayor densidad de combustible puede producir mayor potencia y menores emisiones de hollín de los motores diésel. Un motor diésel de aspiración normal y sin modificaciones mecánicas puede enriquecer la mezcla de aire-combustible y así mismo aumentar la potencia con mezclas de biodiésel-diésel con mayor densidad. Se puede esperar una mejor combustión pero con la desventaja de un mayor consumo de combustible (Valente et al., 2011).

2.3 Reacción de transesterificación

El proceso más común para la producción de biodiésel es la reacción de transesterificación, la reacción se puede realizar con catalizadores homogéneos (ácido o base) o heterogéneos (ácido, base, o una enzima). En esta reacción se convierten los triglicéridos en alquilésteres usando un alcohol para la reacción. Los catalizadores más utilizados son homogéneos, especialmente hidróxido de potasio y de sodio por la mayor velocidad de reacción que nos proporcionan. El principal problema de la transesterificación es la necesidad de altas temperaturas para la reacción, así como el largo tiempo para lograr la conversión y es necesario controlar

muy puntualmente las características de la materia prima para evitar reacciones secundarias como la saponificación (Villadiego et al., 2015).

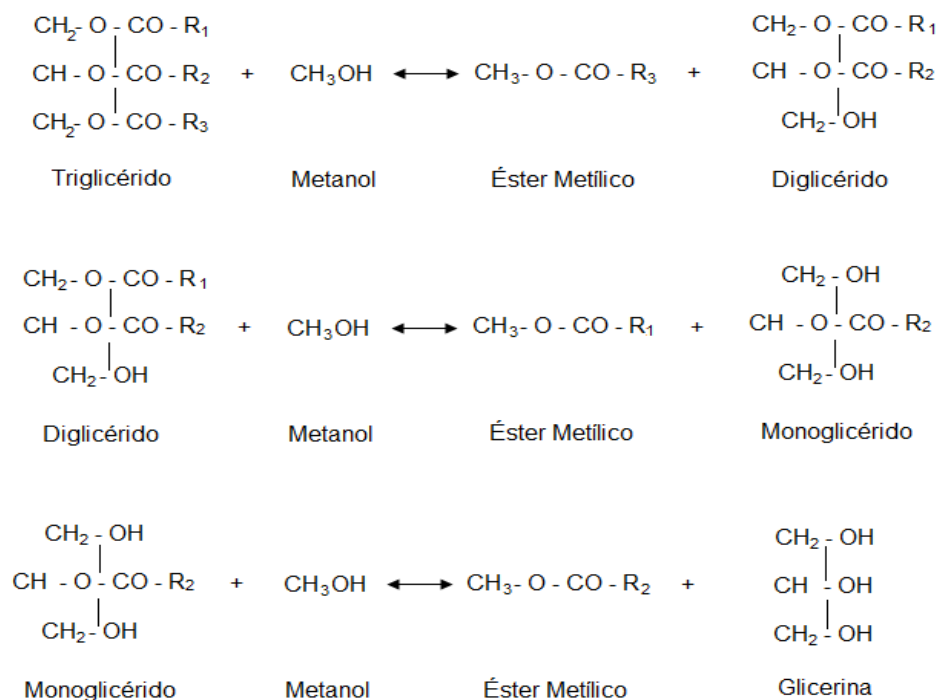


Figura 2. Representación gráfica de la transesterificación de triglicéridos con metanol para producir ésteres de metil grasos ácidos.

2.3.1 Transesterificación en reactor Batch

El método más común para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales es la transesterificación en reactor Batch operando a una temperatura cercana al punto de ebullición del alcohol. En una reacción de transesterificación estequiométrica, tres moles de metanol reaccionan con un mol de triglicérido usualmente en la presencia de un catalizador base y el resultado es un éster monoalquílico y un glicerol. Para el buen procedimiento de la reacción se usa una relación molar de 6:1 de alcohol con aceite, se recomienda mantener la temperatura de la reacción en un rango de 55 a 60°C, el tiempo de reacción se estima

aproximadamente en dos horas y con una velocidad de agitación entre 600 y 800 rpm (Hosseini et al., 2012).

2.3.2 Transesterificación por ultrasonido

Con la transesterificación por ultrasonido se obtienen una mayor conversión de materia prima a biodiésel en mucho menos tiempo de reacción (Hussain and Janajreh, 2018). Las ondas ultrasónicas, son ondas de sonido que vibran más de 20,000 veces por segundo en un rango de 20 – 100 kilo Hertz (kHz), límite que sobrepasa la audición humana (10 – 12 kHz). Estas ondas de ultrasonido causan que la mezcla produzca burbujas que colapsan constantemente provocando cavitación en la reacción que produce un gran calentamiento en la mezcla que provoca el movimiento de fluidos e incrementando así la transferencia de masa. Este fenómeno de cavitación provoca la mezcla de los reactivos y el calor necesarios para llevar a cabo el proceso de transesterificación. Cavitación es la formación y el crecimiento implosivo, el colapso de las burbujas en un líquido (Suslick et al., 1999).

2.4 Parámetros de calidad del biodiésel

En la reacción de transesterificación se obtienen dos productos: el biodiésel y el glicerol. Como resultado puede que el producto final del biodiésel pueda contener restos de glicerol aún después de la purificación. La calidad del biodiésel depende de la materia prima, los ácidos grasos contenidos en el biodiésel corresponden al perfil de la materia prima, es por eso que materia prima con diferentes características produce combustibles con diferentes propiedades, afectando la calidad de este. Las características sobre la calidad de biodiésel que debe cumplir el biodiésel vienen establecidas en la Norma ASTM D6751 (American Society for Testing and Materials) y en Europa la EN 14241 ((Knothe, 2006).

Para los fines de esta investigación, nos enfocaremos en los siguientes parámetros de calidad que se consideraron los de más relevancia para el estudio y

que vienen establecidos en la Norma ASTM D-6751: índice de acidez, densidad, viscosidad, poder calorífico y punto de inflamación.

2.4.1 Norma ASTM D-6751

Las normas de calidad más difundidas en el mundo para monitorear la calidad del biodiésel son la ASTM D-6751 y la EN 14214, las cuales se han tomado como referencia fundamental para la comercialización de biodiésel en Estados Unidos y Europa, respectivamente. También estas normas han servido como punto de partida para desarrollar normativas para la producción y comercialización de biodiésel en otros países.

La norma ASTM D-6751 tiene las especificaciones para las mezclas de combustibles biodiésel (B100) para los combustibles de destilación intermedia. Establece un nivel mínimo de calidad para que los productores cumplan con estándares de calidad y los consumidores estén informados del combustible que compran. La norma establece los procedimientos para medir los parámetros de calidad del biodiésel, así como los equipos necesarios para hacerlo (American Society for Testing and Materials, 2009).

2.4.2 Poder calorífico del biodiésel

El poder calorífico es la cantidad de energía que contiene un gramo de combustible cuando se quema en el motor. Se ha demostrado que la cantidad de poder calorífico del biodiésel, depende en mayor medida de la materia prima utilizada para su producción, que de las variables de la reacción de transesterificación. El poder calorífico es una de las características más importantes de los combustibles y para el biodiésel se ha encontrado que su valor es más bajo que el del diésel convencional, aproximadamente un 8% menor, sin embargo, es un valor muy cercano al poder calorífico del diésel, por lo que al mezclarlos, no se nota una disminución significativa en la potencia del combustible (Murugesan et al., 2016).

2.4.3 Densidad del biodiésel

Es una propiedad muy importante de los combustibles porque está directamente vinculado con el sistema de inyección del motor junto con todas sus partes como la bomba de combustible, los inyectores y el riel de combustible y está relacionada directamente con el número de cetano y la el poder calorífico del biodiésel. La densidad del combustible es la principal propiedad que influye en la cantidad de masa inyectada a los cilindros. La densidad depende de la materia prima y los materiales utilizados para su fabricación y afecta la potencia del motor y el consumo de combustible (Pratas et al., 2011).

2.4.4 Índice de acidez del biodiésel

La acidez de un material graso es la cantidad de ácidos grasos libres que se formaron durante la reacción de transesterificación por la hidrólisis parcial de los triglicéridos. En el biodiésel el índice de acidez deriva casi exclusivamente del contenido de los ácidos grasos de la materia prima, esto es porque los ácidos grasos se pueden formar por la hidrólisis durante la reacción de transesterificación. En la norma ASTM se recomienda una acidez 0.5 a 0.8%. Existen preocupaciones sobre la posibilidad de que los ácidos grasos puedan causar depósitos en el motor, particularmente en los inyectores (Mahajan et al., 2006).

2.4.5 Viscosidad del biodiésel

La viscosidad de un líquido es una medida de fricción interna, es la resistencia del mismo a fluir. Las fricciones internas de los etilésteres son menores que las de las moléculas de triglicéridos. Cuando la temperatura del biodiésel aumenta, su viscosidad disminuye y por lo tanto es capaz de fluir más fácilmente. La viscosidad es una propiedad establecida en el control de calidad de la Norma ASTM D6751. En el caso del biodiésel, tiene una influencia importante en el proceso de combustión y atomización del combustible durante la inyección en el motor,

particularmente a bajas temperaturas cuando el incremento en la viscosidad aumenta la fluidez del combustible (Massera et al., 2013).

2.4.6 Punto de inflamación del biodiésel

El flash point es otro de los parámetros de calidad indicados en la norma ASTM para la producción de biodiésel. Esta propiedad del combustible se define como la temperatura más baja en la que hay suficiente gas o vapor para encender el combustible (De Mattos et al., 2015). El flash point del biodiésel es mayor al del petro-diésel, lo que lo hace menos volátil y más fácil de almacenar y transportar. Pequeñas cantidades residuales de alcohol en el biodiésel pueden provocar una disminución considerable en el flash point, por esta razón, es necesario que tanto el alcohol como el flash point sean determinados por separado en cada lote de biodiésel (Boog et al., 2011).

2.5 Motor diésel M-power-178-DF

Los motores diésel funcionan por autoencendido, en el tiempo de compresión se calienta el aire aspirado en los cilindros a una temperatura de entre 700 y 900 °C aproximadamente, lo cual provoca un encendido automático al inyectar el combustible. Por lo tanto el motor diésel requiere una mayor compresión (18:1). El aire ingresa al motor por el colector de aire y el combustible es inyectado por una bomba de alta presión, los inyectores se encargan de vaporizar el combustible para tener una mejor atomización en la cámara de combustión (Benjumea et al., 2009).

2.5.1 Características del rendimiento del motor diésel

El rendimiento de los motores diésel depende en gran parte de los diseños específicos de los fabricantes, el tamaño del motor, especificaciones de torque y potencia, condiciones de mantenimiento, inflado de llantas, carga del vehículo, etc. Por otro lado el factor del combustible es importante para conocer el rendimiento que nos puede entregar un motor diésel, el rendimiento mecánico del motor se debe

a la relación entre potencia mecánica y potencia del combustible, el consumo de combustible está determinado tanto por factores mecánicos, como por las características químicas del combustible y así mismo con las emisiones contaminantes, están determinadas por componentes mecánicos del automóvil que deberían hacer que las emisiones al medio ambiente se reduzcan pero también es sabido que las emisiones son directamente proporcionales a las características químicas del combustible.

Usualmente se dice que el biodiésel disminuye la potencia del motor, así como el torque por su menor poder calorífico. La densidad y la viscosidad del combustible tienen efectos significativos en la potencia y torque del motor, por ejemplo, una alta densidad y viscosidad del biodiésel causa que se inyecte una mayor cantidad de combustible al motor lo que podría resultar en un aumento en la potencia, sin embargo, por la menor atomización del combustible debido a la alta viscosidad también puede reducir la capacidad de combustión del motor y por lo tanto reducir la potencia y el torque (Hossain et al., 2018).

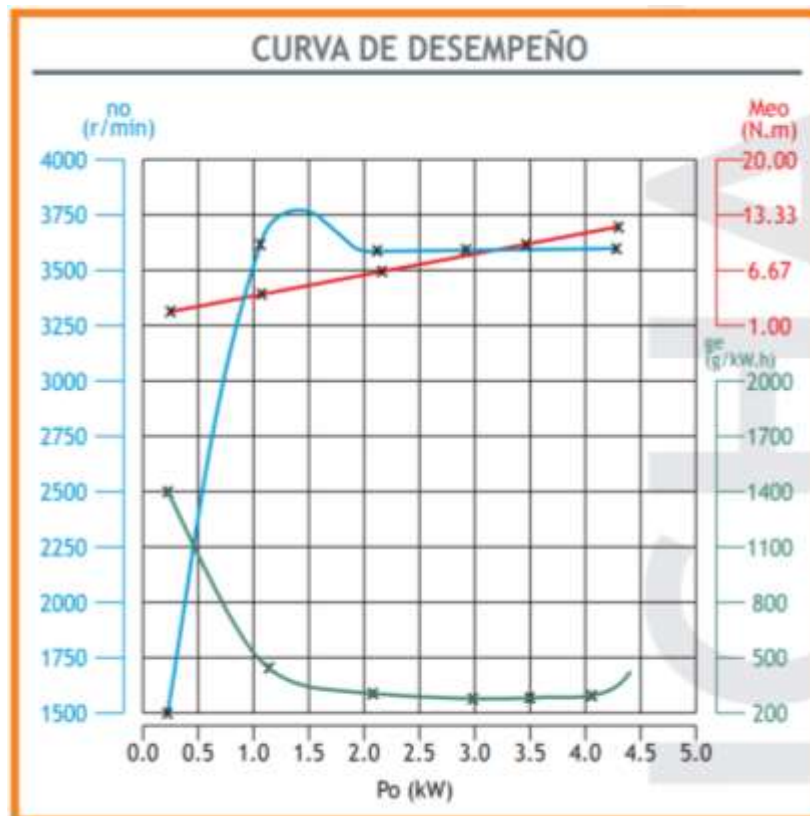


Figura 3. Curvas de desempeño del motor M-Power-178FD: torque, RPM y consumo. (Ficha técnica M-Power-178FD)

2.5.1.1 Consumo de combustible

El consumo de combustible para producir un kWh en los motores diésel varía desde 217 a 272 g/kWh. Es factible analizar el consumo de combustible en función de la masa y el volumen del peso transportado, así como la velocidad del movimiento y el trabajo realizado. El consumo de combustible de los motores de combustión interna está determinado por diferentes factores, tales como: diseño y especificaciones del motor, forma de conducción, mantenimiento y condiciones del motor, tamaño del motor, número de cilindros y por las características químicas del combustible, que en el caso del biodiésel, resulta en un mayor consumo comparado con el diésel común (Valdés et al., 2010).

2.5.1.2 Rendimiento mecánico

Es un índice que mide el porcentaje de potencia efectiva que genera el motor entre la potencia del combustible y la potencia útil generada por el torque y las revoluciones por minuto del motor. El rendimiento mecánico está sujeto al diseño del motor y a las especificaciones de par máximo y potencia máxima, sin embargo la fuerza de empuje sobre el pistón que es generada por la explosión del combustible está sujeta a las características químicas del combustible ya que la potencia del combustible está dada por la densidad y el poder calorífico del mismo y esas características están sujetas a las variables de control de la materia prima y del proceso de transesterificación que varían por los dos métodos propuestos, transesterificación en reactor Batch y transesterificación por ultrasonido.

2.5.1.3 Emisiones contaminantes

Las emisiones contaminantes de los motores se dan por la combustión de los combustibles en la cámara de combustión del motor y es emitida a la atmósfera por medio del escape del motor. Los motores diésel están adaptados con un turbocompresor que inyecta más aire forzado al motor para compensar las pérdidas atmosféricas del aire y para compensar las exigencias de mayor peso del motor que se traducen a la necesidad de un mayor torque. Este incremento de oxígeno en la mezcla de aire-combustible aumenta el nitrógeno. Debido a las altas temperaturas que alcanza el motor diésel y mezclado con el oxígeno que queda sin quemar, se forma el óxido de nitrógeno, mismas que van al medio ambiente. La combustión perfecta en los motores no existe debido a las condiciones de operación de los motores, en el 2013, el 25% de las emisiones de CO₂ en el mundo se originaron en el sector del transporte (Petranović et al., 2017).

2.5.1.4 Mezclas de biodiésel-diésel

La mezcla de biodiésel con combustible diésel es uno de los métodos más comunes para mejorar las propiedades del biodiésel en el motor. Diferentes materias primas de biodiésel se pueden utilizar como una mezcla de combustible para el motor diésel. Mezclas a baja proporción dan resultados positivos en el motor, sin embargo, altas relaciones de mezcla producen problemas en las propiedades del motor, tales como la combustión, emisiones, potencia y consumo de combustible. Conocer las proporciones de mezcla ideales es un indicador importante para la medición y evaluación de los efectos que produce el biocombustible en el motor (Zaharin et al., 2017).

2.5.1.5 Revoluciones por minuto

Las RPM (revoluciones por minuto) indican el número de vueltas que desarrolla el motor de un vehículo por minuto, entre mayor sea el número de RPM aumenta la potencia, sin embargo en las curvas de funcionamiento del fabricante

del motor vienen establecidas las RPM que dan el mejor desempeño del motor a cierto torque. Para determinar la potencia útil del vehículo es necesario multiplicar las revoluciones del motor por el torque, para fines experimentales se establecen revoluciones por minuto a un punto fijo para realizar los cálculos aproximados de potencia útil del motor.

2.5.1.6 Cargas del motor

El peso del vehículo y la potencia del motor son dos de los parámetros más importantes que afectan el consumo del combustible de un motor. Aumentar constantemente las revoluciones por minuto de un motor y mantener un vehículo a plena carga soportando el peso máximo especificado por el fabricante, aumenta considerablemente el consumo de combustible del motor. Es necesario tomar en cuenta que el diseño del motor influye también en este consumo dado que un motor más chico necesita generar más torque y más revoluciones por minuto para moverse cuando el vehículo está cargado y por lo tanto el consumo de combustible tiende a aumentar cuando se maneja a velocidades altas. Tan solo un vehículo cargado puede aumentar el consumo entre 12 y 20% (Natural Resources Canada).

2.5.1.7 Torque

El torque de un motor es una variable de suma importancia en el campo automotriz. El torque tiene una influencia importante sobre la potencia y el consumo de combustible del motor. Este mide la fuerza que ejerce el combustible sobre la cabeza del pistón para moverlo en una distancia dada, el torque del motor está limitado por las características del diseño de los cilindros del motor, ya que nos dará un torque máximo debido a que no puede moverse más allá de lo establecido por el fabricante, sin embargo, la potencia del combustible influye en la fuerza con la que se hace ese movimiento de rotación del motor. El torque puede ser calculado con las especificaciones del motor pero es muy difícil hacer estas mediciones debido a la dificultad de instalar sensores dentro de los cilindros ya que al hacerlo es necesario cambiar la disposición de la cámara de combustión. Este problema se

puede resolver con las curvas características de desempeño que da el fabricante con el motor en cuestión, en estas graficas podemos observar el comportamiento de las curvas de desempeño de revoluciones por minuto, torque, potencia y consumo de combustible. Estas especificaciones dadas por el fabricante son hechas con combustibles específicos y bajo condiciones controladas de laboratorio por lo que la potencia con diferentes combustibles resulta ser útil de medir para saber el comportamiento del motor con diferentes condiciones de operación (Zhixiong et al., 2017).

2.5.1.8 Potencia de motor y potencia de combustible

El rendimiento de un motor diésel significa potencia y eficiencia, el motor puede funcionar a diferentes velocidades, torques, temperaturas y demás condiciones de operación. Hay dos condiciones de operación a las que usualmente un motor es operado: velocidad constante con cargas variables y velocidad variable con cargas variables. La potencia del motor puede ser variable dependiendo del torque generado en el pistón por el combustible y por las revoluciones por minuto que entregue el motor a ese torque, sin embargo la potencia del motor puede ser afectada por diferentes factores como el tipo de combustible utilizado y la carga a la que esté sometido el motor. La potencia útil del motor es la relación entre torque y revoluciones por minuto y la potencia del combustible está relacionada con el poder calorífico del mismo y su densidad (Efe et al., 2018).

2.6 Equipo de medición y métodos

Los principales equipos y métodos de medición que se utilizarán durante esta investigación son los siguientes:

2.6.1 Determinación del índice de acidez

El índice de acidez permite calcular la presencia de ácidos grasos en el aceite residual de cocina. Conocer este índice nos permite calcular la cantidad adecuada

de catalizador para la reacción de transesterificación. Esta prueba se realiza mediante el método de titulación utilizando una solución de hidróxido de sodio (KOH) y fenolftaleína como indicador. El método de (Phan y Phan, 2008) indica la especificación para el aceite residual de cocina 0.67 mg KOH/g.

2.6.2 Picnómetro

Es un pequeño frasco de vidrio con un cuello estrecho y que se cierra con un tapón esmerilado el cual se ajusta a la abertura del frasco. Este dispositivo permite medir la densidad de un fluido, en base a una referencia, como el agua. La medición de densidad de líquidos a temperatura ambiente es un procedimiento analítico establecido. Los dos métodos más usados para la medición de densidad son: picnómetro y dilatómetro. El primero es usado para medir la masa sobrante en un volumen de líquido conocido después del desbordamiento de la masa sobrante y se lee la temperatura en el momento de pesar la masa del volumen. Los picnómetros no pueden ser operados a altas temperaturas ni altas presiones (Westwood and Kabadi, 2003; Demers et al., 2015).

2.6.3 Viscosímetro

El viscosímetro es un equipo que se utiliza para medir la viscosidad de un fluido, la viscosidad depende en gran parte de condiciones ambientales tales como la temperatura y presión. Las mediciones de viscosidad son importantes en muchos campos de investigación, es la medida del flujo de un líquido. Los diferentes comportamientos de los fluidos y las diferentes formas en que puede ser medida y expresada la viscosidad, hacen difícil establecer un método estandarizado para la medición de este parámetro y es por eso que actualmente existe una gran variedad de tipos de viscosímetros y métodos para medir viscosidad. Generalmente estos equipos hacen la medición de viscosidad a 20° C por recomendación de la Organization Internationale de Metrologie Legale (OIML) (Lore and Saba, 2017).

2.6.4 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El DSC (Differential Scanning Calorimetry) es un método de análisis termodinámico que se basa en una metodología para hacer fluir calor desde una pequeña bandeja cerrada herméticamente con el material que se desea medir y una bandeja de referencia vacía, ambas bandejas se someten a condiciones de temperatura idénticas. La diferencia de energía que se requiere para mantener ambas bandejas a la misma temperatura, debido a la diferencia de temperatura entre la muestra y la referencia, se toma como la medida de temperatura. La energía liberada es una medida del cambio de entalpía (ΔH) de la muestra con respecto a la bandeja de referencia. El DSC se puede utilizar para medir el poder calorífico de reacciones químicas así como su entalpía (Carla et al., 2015).

2.6.5 Punto de inflamación

El flash point es la temperatura mínima de un líquido en la cual su vapor hace combustión con el aire. Generalmente la medida de punto de inflamación de un combustible se utiliza para saber conocer a qué temperatura se hará la combustión en el motor, se puede deducir para efectos de calidad que una temperatura baja de inflamación resulta en una mala calidad de combustible ya que la combustión se realizaría a destiempo en el motor. Este parámetro puede indicar la presencia de materiales altamente volátiles en el combustible, lo que puede resultar en graves problemas de almacenaje y transporte. La temperatura del punto de inflamación es una medida de la mezcla de aire-combustible bajo condiciones controladas de laboratorio, es un parámetro de la calidad del biodiésel que debe considerarse para evaluar el riesgo de inflamación de un material y la norma ASTM D-6751 establece el estándar para el biodiésel. El rango de temperatura para la medición de este parámetro debe ser de 40°C a 370°C para el diésel y de 60°C a 190°C para el biodiésel (Mejía et al., 2013; De Mattos et al., 2015).

2.6.6 Opacímetro

Es un equipo que se utiliza para medir el coeficiente de absorción de la opacidad de los gases de escape de un motor, una opacidad de cero significaría un paso de luz perfecto y entre más aumente este índice de opacidad menor es el paso de luz, por lo que se tiene una mayor contaminación por hollín en la salida del escape del motor.

2.6.7 Dinamómetro

Este equipo de medición nos ayuda a obtener parámetros de torque y potencia de motor, puede actuar de dos maneras: la primera como motor, simulando el giro del cigüeñal, con las revoluciones y torque que nosotros controlemos, y la segunda como freno, simulando la fuerza de resistencia que genera una conducción normal, al manejar a diferentes exigencias de velocidad necesitamos cierto torque para que podamos mover el vehículo, así como en subidas el motor debe desempeñar un torque más elevado o cuando el automóvil va con carga también es necesario emplear un torque más exigente, lo que hace este freno es simular ese torque para que el motor experimente esa resistencia y se pueda observar una conducción más real y así se puedan medir los parámetros de potencia, consumo de combustible, emisiones contaminantes y el rendimiento mecánico del motor (Passenbrunner and Sassano, 2013; Lamara et al., 2014).

2.7 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos ayuda a conocer los efectos de ciertas variables o factores que tienen sobre una variable de respuesta al mismo tiempo. Consiste en una serie de corridas experimentales o pruebas en las que se controlan o manipulan las variables para observar el comportamiento del proceso a diferentes niveles de los factores. En este diseño se utilizan todas las combinaciones posibles de los factores a los niveles escogidos o bien, se pueden utilizar diseños no completos en los que se analiza solo una parte de las relaciones de los factores. En cada corrida se recolecta una serie de datos que nos permite identificar las condiciones del

proceso a las que se dio ese resultado para luego encontrar la configuración de factores que optimiza un proceso (Montgomery, 2003).

3. METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Energéticos de la Facultad de Química, en el Laboratorio de Nanotecnología del Campus Aeropuerto y en el Laboratorio de Motores de la Facultad de Ingeniería, todos de la Universidad Autónoma de Querétaro. La metodología para esta investigación se dividió en cinco partes fundamentales: la caracterización del aceite residual de cocina, la producción de biodiésel por ambos métodos de transesterificación, el análisis de calidad del biodiésel, las pruebas de rendimiento en el motor M-Power-178FD y por último el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

3.1 Diagrama de proceso

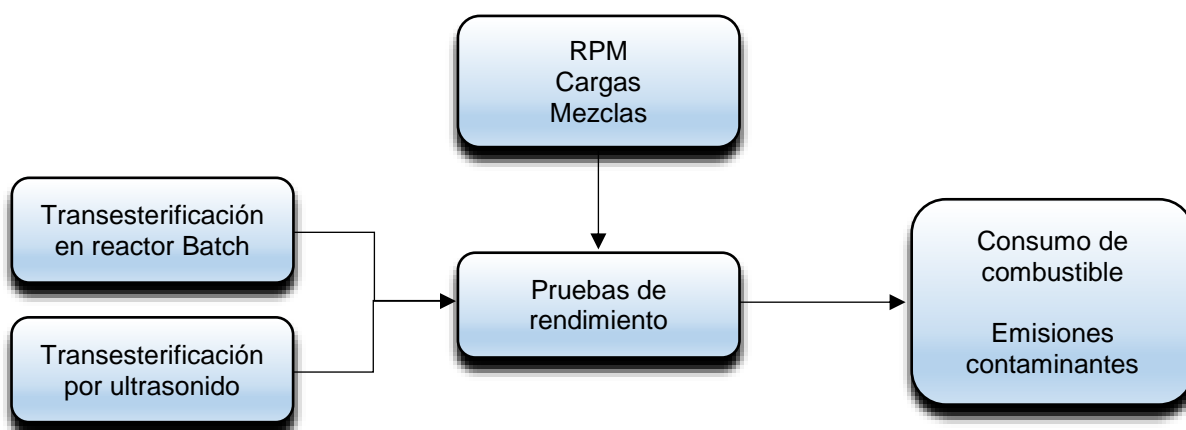


Figura 4. Diagrama de proceso (autoría propia).

3.2 Diseño de experimentos

Tabla 1. Diseño de experimentos (autoría propia).

Mezclas	Rpm	Carga	Emisiones contaminantes
Alto	Alto	Alto	
Bajo	Bajo	Bajo	Consumo de combustible

3.3 Materiales y equipo

- Picnómetro
- Viscosímetro Brookfield
- Reactor Batch
- Sonotrodo
- Flash point
- DSC TA Instruments
- Motor M-Power-178 FD
- Equipo de monitoreo de emisiones contaminantes Bosch
- Dinamómetro

3.4 Caracterización de la materia prima

El primer paso de la metodología de este proyecto fue la caracterización del aceite residual de cocina. En el laboratorio de Bioenergéticos de la Universidad Autónoma de Querétaro se hizo una recolección de aceite en diferentes puntos de la ciudad, la recolección está a cargo de la Maestra María Luz Mateos Trigos. La recolección se hizo a partir de un convenio que se estableció con algunos hospitales de la ciudad de Querétaro y en las diferentes cafeterías de las facultades de la Universidad Autónoma de Querétaro, a cada punto de recolección se le asignó uno

o dos garrafones de 50 litros y cada semana se acudió a recolectar el aceite en un vehículo oficial de la universidad. El aceite recolectado se almacenó en el laboratorio de Bioenergéticos para posteriormente ser separado y seleccionado para hacer la reacción de transesterificación. Para la producción de biodiésel por el método de reactor Batch y ultrasonido se midieron los siguientes parámetros de calidad de materia prima: índice de acidez, densidad, viscosidad, poder calorífico y punto de inflamación. Estos son los parámetros que se toman en cuenta en el laboratorio de Bioenergéticos para asegurar la calidad de la materia prima y se verifican con los métodos establecidos en el laboratorio y que se mencionan a continuación.

3.4.1 Proceso para obtener la densidad del aceite residual de cocina

La densidad se midió a partir del método del picnómetro, en este método utilizamos un picnómetro de capacidad de 10 mL, con este método se utiliza una balanza digital para pesar la masa del volumen del líquido que queremos medir, el primer paso es pesar el picnómetro vacío con la tapa y el termómetro en la balanza, teniendo cuidado de limpiar perfectamente el instrumento y que no tenga ninguna impureza, una vez teniendo el peso del picnómetro se regresan los valores de la balanza a cero y con una pipeta se toma una muestra de 10mL de biodiésel, esta muestra se vierte dentro del frasco, al hacer esto una parte del líquido se derramará, por lo que tenemos que tener servilletas para limpiar perfectamente el instrumento. Una vez que tengamos el picnómetro sin impurezas y lleno con la muestra de biodiésel se vuelve a pesar, se registra la masa del combustible y tenemos los datos para calcular la densidad.

Se tomaron datos de 10 muestras de biodiésel-diésel a diferentes proporciones y una más de diésel puro para tener la referencia.

3.4.2 Proceso para obtener la viscosidad del aceite residual de cocina

La viscosidad dinámica se determinó utilizando un viscosímetro rotacional marca Brookfield, modelo MLTV 115 del Laboratorio de Bioenergéticos de la

Facultad de Química de la UAQ. Un viscosímetro de este tipo, mide la torsión necesaria para hacer girar un disco frente a un fluido. Se colocaron 16 mL del aceite residual en el recipiente diseñado para tal efecto en el viscosímetro, calibrado a una temperatura de 40°C, se dejó estabilizar por 30 segundos y se puso a rotar durante 20 segundos. Se detuvo manualmente, se tomó la lectura directamente de la pantalla y se dividió entre el factor 5 que corresponde a una velocidad de rotación de 12 rpm.

3.4.3 Proceso para obtener el índice de acidez del aceite residual de cocina

La determinación del índice de acidez permite calcular la acidez del aceite debido a la presencia de ácidos grasos libres. El conocer la acidez del aceite vegetal permite calcular la cantidad adecuada de catalizador para la reacción de transesterificación. La prueba de índice de acidez se realizó mediante titulación, utilizando una solución de KOH y fenolftaleína como indicador. El método de (Phan y Phan, 2008) marca la especificación para aceite de cocina residual de 0.67 mg KOH/g.

Se preparó la solución a titular: a 10 ml de alcohol metanol, se agregó 1 ml de aceite de reuso previamente filtrado, se añadieron 2 gotas de fenolftaleína a cada uno de los 3 vasos y se agitó.

Se preparó la disolución de referencia KOH 0.1%: Se disolvió 0.1g de KOH en 100 ml de agua destilada y se vertió en la bureta para su posterior utilización.

A continuación, se realizó la valoración del aceite añadiendo lentamente la disolución de referencia a cada uno de los 3 vasos de precipitado que contienen la disolución a analizar siempre agitando el vaso y observando que la coloración rosada, típica de la fenolftaleína en medio básico, permaneciera por lo menos 30 segundos. Se anotó el volumen de KOH utilizado y se realizó la prueba por triplicado.

Se registró el volumen total utilizado y se realizó un promedio de la prueba por triplicado. El resultado en ml de KOH es equivalente a los mg de KOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos presentes en el aceite.

3.5 Producción de biodiésel por transesterificación en reactor

El procedimiento para obtener biodiésel por transesterificación en reactor Batch fue el siguiente: se midieron las características físico-químicas del aceite residual de cocina para seleccionarlo de acuerdo a su índice de acidez, una vez hecho esto se filtra para evitar impurezas. Se mezcla el metanol con el catalizador y se integran al recipiente con el aceite previamente calentado a 55° C y agitado. Se deja que se haga la reacción de transesterificación por aproximadamente una hora, se deja reposar el biodiésel obtenido para separarlo de la glicerina y después se hace el lavado. A continuación se enlistan los pasos para obtener biodiésel en reactor:

1. Se calentó un litro de aceite hasta que llegue a 55° C y se agitó al mismo tiempo a una velocidad de 600 revoluciones por minuto
2. Se preparó el metóxido, 200 ml de metanol, 5.5g más la acidez para el KOH por cada litro de aceite.
3. Se mezcló el metóxido con el aceite previamente calentado y se tapó perfectamente para no dejar escapar ningún gas.
4. Se dejó que pasara la reacción de transesterificación durante una hora.
5. Se cambió de recipiente el biodiésel obtenido y se dejó reposar para hacer la separación de la glicerina que se obtuvo en la reacción.

6. Se dejó el biodiésel 6 horas más reposando para hacer una segunda separación de glicerina.
7. Se procedió a hacer una serie de lavados de biodiésel con agua para retirar posibles residuos no deseados en la mezcla.
8. Una vez separada la mezcla, esta quedó turbia, se dejó reposar en un recipiente bien aireado aproximadamente un día o menos, dependiendo de la calidad del aceite.
9. El biodiesel quedó claro y transparente después de reposar, si no queda claro, es indicativo de que el proceso falló.

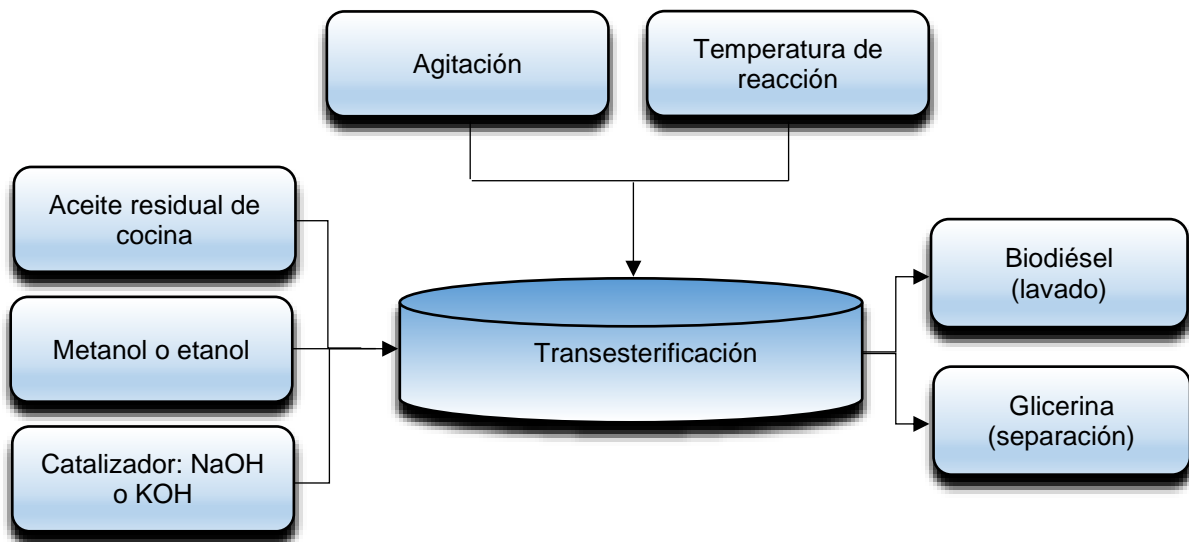


Figura 5. Diagrama para la producción de biodiésel en reactor Batch. (Autoría propia)

3.6 Producción de biodiésel por transesterificación mediante ultrasonido

La producción por este método utiliza un sonotrodo que genera la cavitación de la mezcla de metóxido con aceite residual de cocina para que se mezclen a un

nivel atómico por la explosión de burbujas a altas temperaturas. El sonotrodo alcanza temperaturas muy altas en muy poco tiempo, por eso la reacción se da más rápido. Se debe tener cuidado controlando la temperatura para que no exceda los 55 °C y al terminar la reacción el tiempo de espera para reposar el biodiésel es menor ya que solo se hace la separación de glicerina porque no requiere hacer ningún lavado.

1. Se preparó el metóxido, 200 ml de metanol, 5.5g más la acidez para el KOH por cada litro de aceite.
2. Se mezcló el metóxido con 300 ml de aceite, se hizo la conversión para obtener la cantidad de metóxido que corresponde a 300ml de aceite.
3. Se sumergió el sonotrodo en la mezcla de metóxido y aceite, se encendió el sonotrodo a la intensidad requerida y se realizó la cavitación por 5 minutos cuidando que la temperatura no rebasara los 55° C.
4. Una vez que se terminó la reacción de transesterificación se dejó reposar el biodiésel por unos minutos para hacer la separación de glicerina.
5. Se separó y se recolectó la muestra.

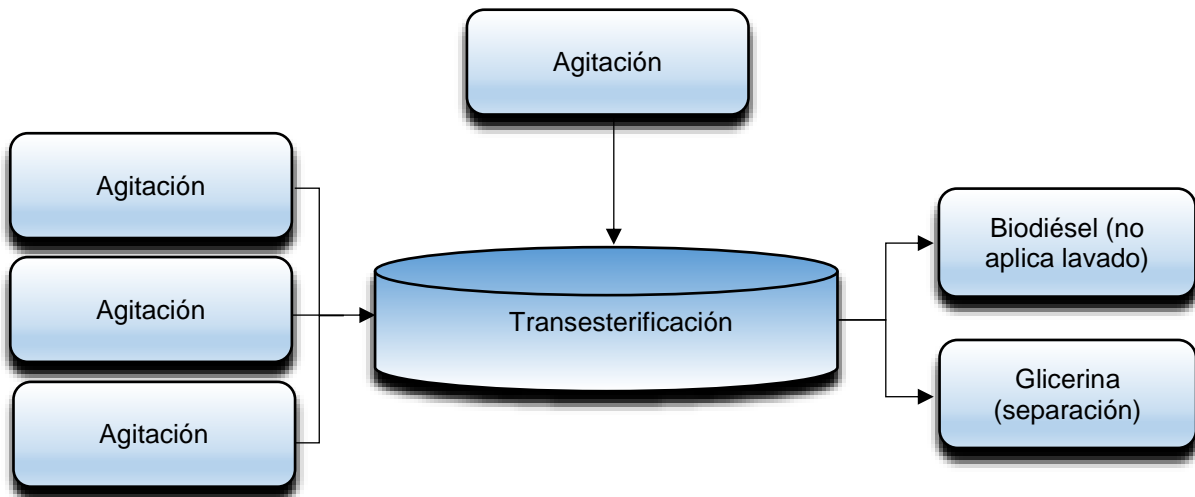


Figura 6. Diagrama para la producción de biodiésel por ultrasonido. (Autoría propia)

3.7 Pruebas de calidad de biodiésel

Una vez que se ha obtenido el biodiésel por ambos métodos se procedimos a realizar las pruebas de calidad: densidad, acidez, viscosidad, punto de inflamación y poder calorífico.

3.7.1 Proceso para obtener la densidad del biodiésel

Para medir la densidad del biodiésel se utilizó la Norma ASTM D-4052 que establece un límite mínimo de 860 kg/m³ y un máximo de 900 kg/cm³. Utilizamos un picnómetro de capacidad de 10 mL. Se hizo la medición a 15° C con agua destilada para tomar como referencia su densidad. Se pesó el picnómetro con la tapa y el termómetro en una balanza analítica. Se llenó el picnómetro con 10 mL de agua con una bureta, se tapó y se limpió detalladamente para no afectar la medición y se volvió a pesar. Se registró el peso de cada medición y se utilizó la siguiente formula:

$$\rho = \frac{m}{v} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

ρ : densidad (kg/m³)

m : masa (kg)

v : volumen (m³)

3.7.2 Proceso para obtener el índice de acidez del biodiésel

Para medir el índice de acidez del biodiesel se realizó la misma prueba que en el punto 3.4.3 para la caracterización del aceite residual de cocina, el valor aceptable que establece la norma ASTM D-6751 es de 0.5 mg KOH/g.

3.7.3 Proceso para obtener la viscosidad del biodiésel

La viscosidad del biodiesel puede variar dentro de un amplio rango dependiendo de la naturaleza de la clase de ácidos grasos a partir de los que se haya producido, sin embargo, es importante asegurar una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a fugas en la bomba de inyección y en el inyector del motor, y mantenerse por debajo de una viscosidad máxima considerando las condiciones de desempeño, tamaño y diseño de los motores y las características de los sistemas de inyección (Demirbas, 2008).

Los valores de la viscosidad cinemática determinados a 40°C definidos por las normas en los estándares internacionales de calidad para el biodiesel son de 1.9 - 6.0 mm²/s según la ASTM D 6751 y de 3.5 - 5.0 mm²/s según la norma europea EN14214.

La viscosidad dinámica se determinó utilizando un viscosímetro rotacional marca Brookfield, modelo MLTV 115 del Laboratorio de Bioenergéticos de la Facultad de Química de la UAQ. Un viscosímetro de este tipo, mide la torsión necesaria para hacer girar un disco frente a un fluido. Se colocaron 16 mL del líquido en el recipiente diseñado para tal efecto en el viscosímetro calibrado a una temperatura de 40°C, se dejó estabilizar por 30 segundos y se puso a rotar durante 20 segundos. Se detuvo manualmente, se tomó la lectura directamente de la

pantalla y se dividió por el factor 10 que corresponde a una velocidad de rotación de 60 rpm.

La viscosidad cinemática se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

V: Viscosidad cinemática (mm²/s)

μ : Viscosidad dinámica (cP)

ρ : Densidad (g/cm³)

La determinación de la densidad se realizó por triplicado, obteniendo una densidad promedio (g/mL). Con lo anterior, se procedió a calcular la viscosidad cinemática.

3.7.4 Proceso para obtener el poder calorífico del biodiésel

Para la determinación de los datos se usó un análisis calorimétrico (DSC) con un modelo Q2000 marca TA Instruments a una rapidez de calentamiento constante de 20°C/min, iniciando desde temperatura ambiente (25°C) y llegando hasta 350°C, empleando una atmósfera dinámica de nitrógeno con un flujo de 50 ml/min. Para cada análisis se utilizó 7 mg promedio de muestra colocada en crisol de aluminio modelo Tzero 901671 con capacidad de 10 mg. Primero se pesó el crisol de aluminio vacío como referencia para que el equipo haga la diferencia de calor, se utiliza una balanza analítica para esto. Una vez pesado se cierra herméticamente el crisol con una prensa para cerrar crisoles, aquí se pone la base del crisol en un molde que se ajusta a la base de la prensa y la tapa del crisol se pone en otro molde en la parte superior de la prensa para que al prensarlo, cierre

herméticamente el crisol. El DSC se compone de dos celdas, una de referencia y otra de muestra. El equipo mantiene las dos celdas a la misma temperatura a medida que se calientan, para hacer la medición, la celda de referencia se pesa y la muestra se llena con biodiésel y también se pesa. Después se calientan con un incremento de barrido constante, la absorción de calor se da cuando se produce la diferencia de calor al calentar una muestra y una referencia, lo que da como resultado un gradiente térmico que se traduce a un voltaje y a una potencia que se utiliza para calcular la diferencial de temperatura. Como referencia se determinó la variación de entalpía del diesel de petróleo para compararla con la de las muestras de biocombustible.

3.7.5 Punto de inflamación

La temperatura de inflamación del biodiésel viene especificada en la Norma ASTM D-93 en este caso para un equipo Flash Point X de copa cerrada. Es una medida que muestra la temperatura a la que una mezcla inflamable se inflama al hacer la mezcla con aire bajo condiciones de laboratorio controladas. El punto de inflamación es parámetro importante para las regulaciones de transporte y seguridad hablando de materiales inflamables y combustibles. Este equipo utiliza el método de Pensky-Martens y mide el punto de inflamación de productos fósiles o derivados.

1. El primer paso es llenar el recipiente con la muestra de combustible que vamos a medir hasta la marca.
2. Colocar la copa o recipiente en el lugar indicado (equilibrio) y asegurarlo para que no se mueva.
3. Colocar la tapa del recipiente hasta que entre completamente.
4. Conectar el agitador de la mezcla, el termómetro que mide la temperatura de los gases y el termómetro que mide la temperatura de la muestra.
5. Colocar el dispositivo que hace la ignición y asegurarlo firmemente con el tornillo, conectar el brazo mecánico.

6. Espera a que el equipo caliente la muestra y haga ignición para anotar el punto de inflamación.

Las especificaciones para las pruebas de calidad de biodiésel y para los valores que deben cumplir se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Especificaciones para la calidad del biodiésel de la norma ASTM D-6751. (ASTM)

Nombre de la prueba	Designación	Especificación
Punto de inflamación	ASTM D-93	Mínimo 93 °C
Contenido de agua y sedimentos	ASTM D-2709	Máximo 0,0% (v/v)
Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM D-445	Mínimo 1,9 mm ² / s
Contenido de ceniza sulfatada	ASTM D-847	Máximo 0,02 (% / ρ)
Contenido de azufre	ASTM D-5453	Máximo 15 ppm (S15) Máximo 500 ppm (S500)
Número de cetano	ASTM D-613	Mínimo 47 (adimensional)
Corrosión lámina de cobre	ASTM D-130	Máximo núm. 3
Punto de nube	ASTM D-2500	Reportar
Residuo carbonoso	ASTM D-4530	Máximo 0,05 (% / ρ)
Acidez	ASTM D-664	0,05 mg KOH / g
Potencial de bloqueo de filtros		Máximo 360 s
Contenido de glicerol libre	ASTM D-6584	Máximo 0,02 (% / ρ)
Contenido de glicerol total	ASTM D-6584	Máximo 0,24 (% / ρ)
Contenido de fósforo	ASTM D-4951	Máximo 0,001 (% / ρ)
Destilación	ASTM D-1190	Máximo 360 °C
Temperatura para el 90% del volumen recuperado		

3.8 Pruebas de rendimiento en Motor M-Power-178 FD

Para realizar las pruebas de rendimiento se asegura que las variables de salida se puedan medir y que se puedan controlar los factores que intervienen en el proceso. El montaje del experimento debe estar preparado para que no haya problemas con las mediciones.

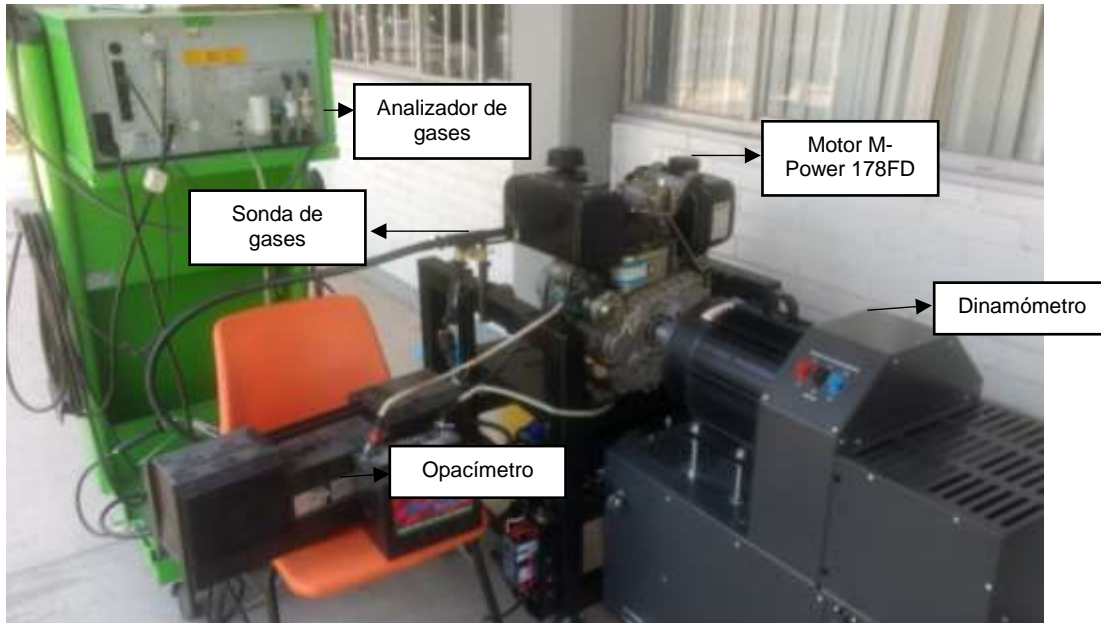


Figura 7. Montaje del experimento (autoría propia).

3.8.1 Control de variables del experimento

Para tener un diseño de experimentos factorial es necesario poder controlar las variables que intervendrán en el proceso, en este caso para poder observar las salidas del experimento (consumo de combustible, rendimiento mecánico y emisiones contaminantes) se deben poder controlar los factores del proceso.

3.8.1.1 Velocidad del motor

Para observar los parámetros de rendimiento del motor, se propuso controlar las revoluciones por minuto a bajas y altas velocidades, 1000 rpm a baja

velocidad y 2500 rpm a alta velocidad. Para controlar esta velocidad se tiene un pedal de acelerador adaptado al banco de pruebas que controla la apertura y cierre de la mariposa del cuerpo de aceleración que permite la entrada de aire al motor y hace que el motor acelere o aumente las revoluciones.

3.8.1.2 Carga del motor

Para controlar la carga del motor, o la simulación del peso que soporta un automóvil cuando va lleno y vacío, y que simula una conducción más real, se utilizó un dinamómetro adaptado al motor. Esta adaptación se hizo mediante unas flechas que simulan el engranaje del motor para pasar el giro a la transmisión del motor. Las flechas se maquinaron para que ambas se adapten a la cuña del eje de giro, una al motor y otra al dinamómetro. El dinamómetro cuenta con un freno que funciona como torque. Cuando cargamos el automóvil o vamos en subida, necesitamos generar un mayor torque para que se pueda realizar el trabajo, es lo que hace este freno del dinamómetro, simular ese torque para que el motor en el banco de prueba tenga que vencer esa resistencia de torque y se puedan tomar lecturas de una conducción más real. El dinamómetro es programable y para los fines de esta investigación tomaremos los valores máximos de torque que nos da el fabricante de este motor en las curvas de desempeño.

3.8.1.3 Mezclas de biodiésel-diésel

Las mezclas que se utilizaron para alimentar el motor, es el parámetro más sencillo de controlar. Una vez que se obtiene el biodiésel fabricado por ambos métodos, en el laboratorio de motores se hicieron las mezclas de B10 y B25 con una pipeta para obtener mayor precisión. Se hicieron mezclas de 200 ml para alimentar el motor.

3.8.1.4 Medición de variables de rendimiento

Las variables de salida del experimento son las observaciones de las corridas del proceso. Para poder medirlas trabajó con la siguiente metodología:

3.8.1.5 Emisiones contaminantes

Para medir las emisiones contaminantes se utilizó un equipo Bosch portátil para medición de emisiones contaminantes. El motor M-Power-178FD es un motor diésel de 1.1 lts, mono cilíndrico, de 4 tiempos y enfriado por aire. El equipo de emisiones mide la opacidad del combustible y las mediciones se hicieron mediante una sonda que se conecta directamente al escape de gases del motor. Para hacer esta medición se precalienta el motor para evitar el sesgo por mediciones de arranque en frío del motor. Una vez que el motor haya alcanzado su punto óptimo de operación (90-100°C) se le suministra la mezcla de biodiésel-diésel de 200 ml, se controlan las RPM y la carga con el dinamómetro, después se comienza a hacer la lectura de datos con el equipo de medición de emisiones.

3.8.1.6 Consumo de combustible

Para medir el consumo de combustible se utilizó el mismo motor. Este consumo lo reportamos como una relación entre la cantidad de combustible suministrado y el tiempo que dura en el motor. Para hacer esta medición se suministró al motor la mezcla de 200 ml de biodiésel-diésel y se midió el tiempo que tarda en terminarse el combustible hasta que el motor se apague.

3.9 Análisis estadístico

Una vez hecho el análisis, se hizo una prueba t , para comparar las medias de los dos procesos de transesterificación y para compararlo con la referencia que es el diésel. Después se hizo un análisis ANOVA para observar la diferencia en las variaciones con las interacciones de las variables y por último se hizo un análisis de regresión para determinar el modelo estadístico que defina la variación del proyecto.

3.9.1 Prueba t

Se realizó una prueba *t* de student en el software “Minitab” para comparar las medias de cada serie de datos de los dos procesos de transesterificación para probar la hipótesis planteada. Se quiere comparar si las medias de las características de calidad del biodiésel transesterificado por ambos métodos son diferentes y si en cada caso son mejores con respecto a los dos biocombustibles y teniendo como parámetro la referencia que es el diésel.

3.9.2 ANOVA

Se realizó un análisis de varianzas de la serie de datos de cada variable de salida de los dos procesos de transesterificación para conocer cuáles son los factores más significativos y que más influyen en las variables de salida del rendimiento del motor. El análisis se hizo con el software “Rstudio”.

3.9.3 Análisis de regresión

Se utilizó el software “Rstudio” para hacer el análisis de regresión y obtener el modelo que represente los efectos de las variables del proceso en las variables de salida del rendimiento del motor. Este análisis nos dice la significancia del modelo y qué tanto describe la variación del proceso.

3.9.4 Definición del diseño de experimentos

Para el presente experimento se planteó un diseño factorial completo 2^3 , lo que nos da un diseño experimental de 8 corridas con tres replicas como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3. Definición de los factores de control y los niveles de operación.

Variables	Niveles	
	Alto	Bajo
Mezclas	B10 (10% de biodiésel)	B25 (25% de biodiésel)
Velocidad	1000 rpm	2500 rpm
Carga	Sin carga	Con carga (6.5 N.m)

Tabla 4. Diseño de experimentos completo.

Variables de control			Variables de salida	
Mezclas	RPM	Cargas	Consumo de combustible	Emisiones contaminantes
B10	1000	Sin carga		
B10	1000	Con carga		
B10	2500	Sin carga		
B10	2500	Con carga		
B25	1000	Sin carga		
B25	1000	Con carga		
B25	2500	Sin carga		
B25	2500	Con carga		

3.10 Análisis económico del biodiésel

En los casos dónde las empresas recolectan directamente el aceite residual y paga un precio de origen, la compañía paga dos pesos por cada litro de aceite recibido y asume los costos de recolección, en estos casos el aceite puede ascender de 11.10 a 13.50 pesos para su producción. Cuando las empresas utilizan grasas animales para la producción, el costo de elaboración por litro puede ser entre 14.22 y 18.22 pesos (Red Mexicana de Bioenergía, 2017).

Para poder calcular el precio del biodiésel, se debe tener en cuenta los costos de aceite, los gastos de transformación y la logística de distribución. En el caso de la Universidad Autónoma de Querétaro, en un reporte técnico se obtuvo una ecuación para calcular el costo del biodiésel mediante una ecuación que se muestra a continuación:

$$x \text{ aceite} + y \text{ transformación} + z \text{ envío al cliente} = \text{costo biodiésel} \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

- x = costo del aceite
- y = costos de insumos para la producción
- z = distancias a recorrer

La oportunidad de ahorro se puede aprovechar en el costo del aceite, la universidad recolecta el aceite en varios puntos de la ciudad y no representa ningún costo comprarlo, el gasto solo es de la gasolina que se utiliza para la recolección. Los costos reportados en la planta de biodiésel de la universidad se encuentran en las siguientes tablas:

Tabla 5. Costos unitarios y anuales de los insumos para la producción de biodiésel. (Reporte técnico de la planta de Bioenergéticos, 2016)

Materia Prima			
Concepto	Cantidad	Costo	
		Unitario	Total
SEDESU			\$ 820.00
Recoleccion (gasolina)			\$ 1,130.05
Valor actual de la camioneta			\$ 50,000.00
Metanol	60 Lt	\$ 10.80	\$ 751.68
Hidroxido de potasio	10 Kg	\$ 499.96	\$ 4,999.60
Perlita	125 Lt	\$ 3.68	\$ 460.00
Agua 0.2m ³	10.4 mts ³ anuales		
Luz 500 kWh	6,000 kWh anuales	\$ 1.0219	
TOTAL			\$ 58,161.33

Tabla 6. Costo por litro para producción de biodiésel. (Reporte técnico del laboratorio de Bioenergéticos, 2016)

Costo total fijo			Precio por litro
Sedesu	\$ 820.00	\$ 8.64	\$ 0.093
Gasolina	\$ 1,130.00	\$ 25.68	\$ 0.13
Agua	\$ 51.61	\$ 10.26	\$ 0.05
Luz	\$ 1.0219	\$ 510.95	\$ 2.55
Metanol	\$ 751.68	\$ 216.00	\$ 1.08
Hidroxido de potasio	\$ 4,999.60	\$ 499.96	\$ 3.50
Perlita	\$ 460.00	\$ 69.92	\$ 0.02
Becario	\$ 3,000.00	\$ 750.00	\$ 3.75
			\$ 11.173

Tabla 7. Margen de utilidad. (Reporte técnico del laboratorio de Bioenergéticos, 2016)

\$ 13.97	Utilidad del 25%
\$ 16.76	Utilidad del 50%
\$ 22.35	Utilidad del 100%

Asumiendo que los precios de insumos son iguales para producir el biodiésel por ultrasonido, se puede deducir que producir un litro de biodiésel por transesterificación por ultrasonido representaría un ahorro en luz y agua de un aproximadamente 90% cada uno ya que la reacción por ultrasonido es mucho más rápida y no necesita lavado.

Tabla 8. Costo por litro para producción de biodiésel de ultrasonido.

Costo total fijo			Precio por litro
Sedesu	\$ 820.00	\$ 8.64	\$ 0.093
Gasolina	\$ 1,130.00	\$ 25.68	\$ 0.13
Agua	\$ 51.61	\$ 10.26	\$ 0.005
Luz	\$ 1.0219	\$ 510.95	\$ 0.25
Metanol	\$ 751.68	\$ 216.00	\$ 1.08
Hidroxido de potasio	\$ 4,999.60	\$ 499.96	\$ 3.50
Perlita	\$ 460.00	\$ 69.92	\$ 0.02
Becario	\$ 3,000.00	\$ 750.00	\$ 3.75
			\$ 8.828

El costo de producción de un litro de biodiésel por ultrasonido sería de 8.8 pesos, lo que representaría una mayor utilidad al venderlo al mismo precio que el biodiésel de reactor.

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima, la producción de biodiésel, la caracterización del biodiésel y de las variables de salida del experimento: consumo de combustible y emisiones contaminantes (opacidad).

4.1 Caracterización del aceite residual de cocina

Para conocer las características del aceite residual que se utilizó para la producción de biodiésel, se midió el índice de acidez, la densidad y la viscosidad del aceite.

4.1.1 Índice de acidez del aceite residual de cocina

En la **Tabla 9** se presentan los valores del índice de acidez del aceite residual de cocina que se utilizó para la producción de biodiésel por los dos métodos de transesterificación, la medición se hizo por triplicado.

Tabla 9. Índice de acidez del aceite residual de cocina.

Índice de acidez del aceite residual de cocina (KOH / g aceite)	
Primer medición	1.6 mg KOH / g aceite
Segunda Medición	1.9 mg KOH / g aceite
Tercer medición	1.7 mg KOH / g aceite

4.1.2 Densidad del aceite residual de cocina

En la **Tabla 10** se presentan los valores de la densidad del aceite residual de cocina que se utilizó para la producción de biodiésel por ambos métodos de transesterificación.

Tabla 10. Densidad del aceite residual de cocina.

Densidad del aceite residual de cocina (g/ml)	
Primer medición	0.889 g/ml
Segunda Medición	0.895 g/ml
Tercer medición	0.897 g/ml

4.1.3 Viscosidad cinemática del aceite residual de cocina

En la **Tabla 11** se presentan los valores de la medición de la viscosidad cinemática del aceite residual de cocina para la producción de biodiésel.

Tabla 11. Viscosidad cinemática del aceite residual de cocina.

Viscosidad cinemática del aceite residual de cocina (cP)	
Primer medición	5.2 cP
Segunda Medición	4.9 cP
Tercer medición	5.3 cP

4.2 Producción de biodiésel

En esta sección se muestran los parámetros que se utilizaron y que se controlaron para la producción de biodiésel mediante el método de transesterificación en reactor Batch y el método de transesterificación por ultrasonido.

4.2.1 Producción de biodiésel mediante transesterificación en reactor Batch

Para la producción de biodiésel mediante el método de transesterificación en reactor Batch se tomaron los parámetros previamente establecidos en el laboratorio de Bioenergéticos, en la **Tabla 12** se muestran los valores que se tomaron para las variables del proceso de producción de biodiésel en reactor.

Tabla 12. Valores de los factores del proceso de transesterificación en reactor Batch.

Transesterificación en reactor Batch	
Variable	Valor
Temperatura de reacción	55 °C
Velocidad de agitación	600 RPM
Tiempo de reacción	1.5 hrs
Catalizador	KOH

4.2.2 Producción de biodiésel mediante transesterificación por ultrasonido

Para la producción de biodiésel por el método de transesterificación por ultrasonido, se utilizaron los parámetros ya establecidos en el laboratorio de Nanotecnología, en la **Tabla 13** se muestran los valores que se tomaron para los factores de control del proceso de producción de biodiésel por ultrasonido.

Tabla 13. Valores de los factores del proceso de transesterificación por ultrasonido.

Transesterificación por ultrasonido	
Variable	Valor
Tiempo de reacción	3 minutos
Amplitud de radiación ultrasónica	75 %

4.3 Caracterización del biodiésel

En esta sección se reportan los resultados de la medición de los parámetros de calidad del biodiésel, los resultados fueron registrados en las **Tablas 14, 15, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25 y 26**. La norma ASTM D-6751 dicta el estándar de calidad que se debe cumplir para que el biodiésel pueda ser implementado finalmente en los motores, en la **Tabla 2** se muestran los valores mínimos y máximos que se deben cumplir para que el biodiésel cumpla con los estándares de calidad. Para fines del presente estudio y por el alcance del proyecto, se midieron cinco parámetros de calidad del biodiésel: índice de acidez, densidad, viscosidad, poder calorífico y punto de inflamación. La medición se repitió para ambos métodos de transesterificación y se hizo por triplicado la medición de cada parámetro.

4.3.1 Acidez del biodiésel transesterificado en reactor Batch y ultrasonido

A continuación, en la **Tabla 14 y 15**, se muestran resultados de la medición de acidez del biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido, respectivamente, no se reportó acidez del diésel como referencia ya que los combustibles fósiles no contienen ácidos grasos.

Tabla 14. Acidez del biodiésel transesterificado en reactor Batch.

Acidez del biodiésel transesterificado en reactor Batch (KOH / g aceite)			
	B10	B25	B100
Primer medición	0 KOH / g aceite	0.2 KOH / g aceite	0.7 KOH / g aceite
Segunda medición	0 KOH / g aceite	0.2 KOH / g aceite	0.8 KOH / g aceite
Tercer medición	0 KOH / g aceite	0.3 KOH / g aceite	0.7 KOH / g aceite

Tabla 15. Acidez del biodiésel transesterificado por ultrasonido.

Acidez del biodiésel transesterificado por ultrasonido (KOH / g aceite)			
	U10	U25	U100
Primer medición	0 KOH / g aceite	0.1 KOH / g aceite	0.8 KOH / g aceite
Segunda medición	0.1 KOH / g aceite	0.2 KOH / g aceite	0.6 KOH / g aceite
Tercer medición	0 KOH / g aceite	0.2 KOH / g aceite	0.7 KOH / g aceite

4.3.2 Densidad del biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido

En las **Tablas 16, 17 y 18**, se reportan los resultados de la medición de densidad del biodiésel producido por ambos métodos y como referencia se hizo la medición de la densidad del diésel convencional para tener un punto de referencia en la comparación de los biocombustibles.

Tabla 16. Densidad del biodiésel transesterificado en reactor Batch.

Densidad del biodiésel transesterificado en reactor Batch (g/ml)			
	B10	B25	B100
Primer medición	0.778 g/ml	0.798 g/ml	0.823 g/ml
Segunda medición	0.775 g/ml	0.789 g/ml	0.817 g/ml
Tercer medición	0.771 g/ml	0.797 g/ml	0.818 g/ml

Tabla 17. Densidad del biodiésel transesterificado por ultrasonido

Densidad del biodiésel transesterificado por ultrasonido (g/ml)			
	U10	U25	U100
Primer medición	0.774 g/ml	0.784 g/ml	0.810 g/ml
Segunda medición	0.768 g/ml	0.780 g/ml	0.808 g/ml
Tercer medición	0.765 g/ml	0.781 g/ml	0.811 g/ml

Tabla 18. Densidad del diésel.

Densidad del diésel (g/ml)	
Primer medición	0.754 g/ml
Segunda Medición	0.752 g/ml
Tercer medición	0.755 g/ml

4.3.3 Viscosidad cinemática del biodiésel transesterificado por ambos métodos

A continuación, en las **Tablas 19, 20 y 21**, se reportaron las viscosidades del biodiésel transesterificado en reactor Batch, por ultrasonido y del diésel común como referencia para las comparaciones. Esta medición fue hecha en el laboratorio de Bioenergéticos de la Facultad de Química mediante un viscosímetro Brookfield y se tomaron las medidas por triplicado.

Tabla 19. Viscosidad cinemática del biodiésel transesterificado en reactor Batch.

Viscosidad cinemática del biodiésel transesterificado en reactor Batch (cP)			
	B10	B25	B100
Primer medición	3.1 CP	3.4 CP	4.2 CP
Segunda medición	3 CP	3.5 CP	4.3 CP
Tercer medición	3.1 CP	3.5 CP	4.4 CP

Tabla 20. Viscosidad cinemática del biodiésel transesterificado por ultrasonido.

Viscosidad cinemática del biodiésel transesterificado por ultrasonido (cP)			
	U10	U25	U100
Primer medición	2.9 CP	3.2 CP	3.9 CP
Segunda medición	2.9 CP	3.3 CP	4 CP
Tercer medición	2.8 CP	3.2 CP	3.9 CP

Tabla 21. Viscosidad cinemática del diésel.

Viscosidad cinemática del diésel (cP)	
Primer medición	2.7 CP
Segunda Medición	2.6 CP
Tercer medición	2.3 CP

4.3.4 Poder calorífico del biodiésel transesterificado por ambos métodos

En las **Tablas 22, 23 y 24**, se muestran los resultados de la medición del poder calorífico de ambos biocombustibles y del diésel convencional, la medición se realizó en el laboratorio de Nanotecnología del Campus Aeropuerto con un equipo DSC que utiliza el método de calorimetría diferencial de barrido.

Tabla 22. Poder calorífico del biodiésel transesterificado en reactor Batch.

Poder calorífico del biodiésel transesterificado en reactor Batch (J/g)			
	B10	B25	B100
Primer medición	93 J/g	89 J/g	76 J/g
Segunda medición	92 J/g	87 J/g	73 J/g
Tercer medición	93 J/g	90 J/g	77 J/g

Tabla 23. Poder calorífico del biodiésel transesterificado por ultrasonido.

Poder calorífico del biodiésel transesterificado por ultrasonido (J/g)			
	U10	U25	U100
Primer medición	95 J/g	91 J/g	79 J/g
Segunda medición	97 J/g	90 J/g	78 J/g
Tercer medición	93 J/g	90 J/g	81 J/g

Tabla 24. Poder calorífico del diésel

Poder calorífico del diésel (J/g)	
Primer medición	111 J/g
Segunda Medición	107 J/g
Tercer medición	105 J/g

4.3.5 Punto de inflamación del biodiésel transesterificado por ambos métodos

En las siguientes **Tablas 25, 26 y 27**, se muestran los resultados de las mediciones del punto de inflamación para ambos biocombustibles y para el diésel convencional, las mediciones fueron hechas en un equipo Flash Point de copa cerrada que se encuentra en el laboratorio de Bioenergéticos de la Facultad de Química en la UAQ.

Tabla 25. Punto de inflamación del biodiésel transesterificado en reactor Batch.

Punto de inflamación del biodiésel transesterificado en reactor Batch (°C)			
	R10	R25	R100
Primer medición	67 °C	71 °C	167 °C
Segunda medición	67 °C	70 °C	163 °C
Tercer medición	65 °C	69 °C	164 °C

Tabla 26. Punto de inflamación del biodiésel transesterificado por ultrasonido.

Punto de inflamación del biodiésel transesterificado por ultrasonido (°C)			
	U10	U25	U100
Primer medición	69 °C	74 °C	172 °C
Segunda medición	70 °C	75 °C	175 °C
Tercer medición	70 °C	74 °C	176 °C

Tabla 27. Punto de inflamación del diésel

Punto de inflamación del diésel (°C)	
Primer medición	63 °C
Segunda Medición	64 °C
Tercer medición	64 °C

4.4 Resultados de las pruebas de rendimiento

Las pruebas de rendimiento del motor diésel M-Power-178FD fueron realizadas en la facultad de ingeniería de San Juan del Río, se montó el motor en un banco de pruebas y se adaptó con una flecha al dinamómetro que simula las cargas del motor, se midieron tres variables de salida en el experimento: consumo de combustible y emisiones contaminantes (opacidad).

4.4.1 Resultados de la medición del consumo de combustible para el biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido

A continuación, en la **Tabla 28 y 29** se reportó la relación de cantidad de combustible/tiempo que tardó el motor en consumir el combustible bajo cada condición de operación, con cada tipo de biodiésel. Además, en la **Tabla 30** se reportó el consumo de combustible con diésel y ambos biocombustibles al 100% para tenerlo como referencia para el análisis comparativo.

Tabla 28. Consumo de combustible del motor M-Power-178FD con el diseño de experimentos para el biodiésel transesterificado en reactor Batch.

Variables de control			Variables de salida		
Mezclas de biodiésel (B10 y B25)	Velocidad (RPM)	Cargas (Nm)	Consumo (lts/hr)	Consumo (lts/hr)	Consumo (lts/hr)
			Replica 1	Replica 2	Replica 3
B10	1000	Sin carga	0.186 (lts/hr)	0.195 (lts/hr)	0.197 (lts/hr)
B10	1000	Con carga	0.603 (lts/hr)	0.627 (lts/hr)	0.612 (lts/hr)
B10	2500	Sin carga	0.610 (lts/hr)	0.601 (lts/hr)	0.617 (lts/hr)
B10	2500	Con carga	0.678 (lts/hr)	0.671 (lts/hr)	0.691 (lts/hr)
B25	1000	Sin carga	0.197 (lts/hr)	0.207 (lts/hr)	0.208 (lts/hr)
B25	1000	Con carga	0.635 (lts/hr)	0.622 (lts/hr)	0.642 (lts/hr)
B25	2500	Sin carga	0.616 (lts/hr)	0.629 (lts/hr)	0.633 (lts/hr)
B25	2500	Con carga	0.732 (lts/hr)	0.718 (lts/hr)	0.741 (lts/hr)

Tabla 29. Consumo de combustible del motor M-Power-178FD con el diseño de experimentos para el biodiésel transesterificado por ultrasonido.

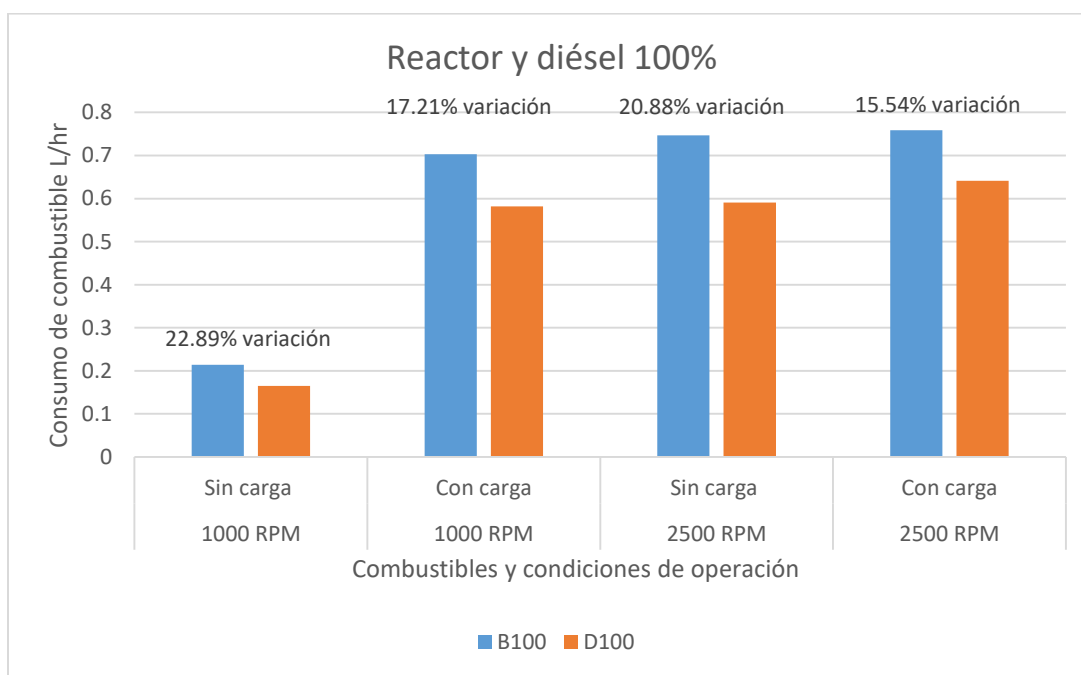
Variables de control			Variables de salida		
Mezclas de biodiésel (B10 y B25)	Velocidad (RPM)	Cargas (Nm)	Consumo (lts/hr)	Consumo (lts/hr)	Consumo (lts/hr)
			Replica 1	Replica 2	Replica 3
U10	1000	Sin carga	0.181 (lts/hr)	0.184 (lts/hr)	0.191 (lts/hr)
U10	1000	Con carga	0.599 (lts/hr)	0.616 (lts/hr)	0.605 (lts/hr)
U10	2500	Sin carga	0.602 (lts/hr)	0.596 (lts/hr)	0.612 (lts/hr)
U10	2500	Con carga	0.662 (lts/hr)	0.665 (lts/hr)	0.672 (lts/hr)
U25	1000	Sin carga	0.190 (lts/hr)	0.201 (lts/hr)	0.196 (lts/hr)
U25	1000	Con carga	0.631 (lts/hr)	0.619 (lts/hr)	0.636 (lts/hr)
U25	2500	Sin carga	0.610 (lts/hr)	0.620 (lts/hr)	0.625 (lts/hr)
U25	2500	Con carga	0.721 (lts/hr)	0.719 (lts/hr)	0.725 (lts/hr)

Tabla 30. Consumo de combustible del motor M-Power-178FD utilizando ambos biocombustibles al 100% y diésel convencional.

Variables de control			Variables de salida		
Tipo de combustible	Velocidad (RPM)	Cargas (Nm)	Consumo (lts/hr)	Consumo (lts/hr)	Consumo (lts/hr)
			Replica 1	Replica 2	Replica 3
Diésel 100%	1000	Sin carga	0.171 (lts/hr)	0.165 (lts/hr)	0.160 (lts/hr)
Diésel 100%	1000	Con carga	0.583 (lts/hr)	0.586 (lts/hr)	0.579 (lts/hr)

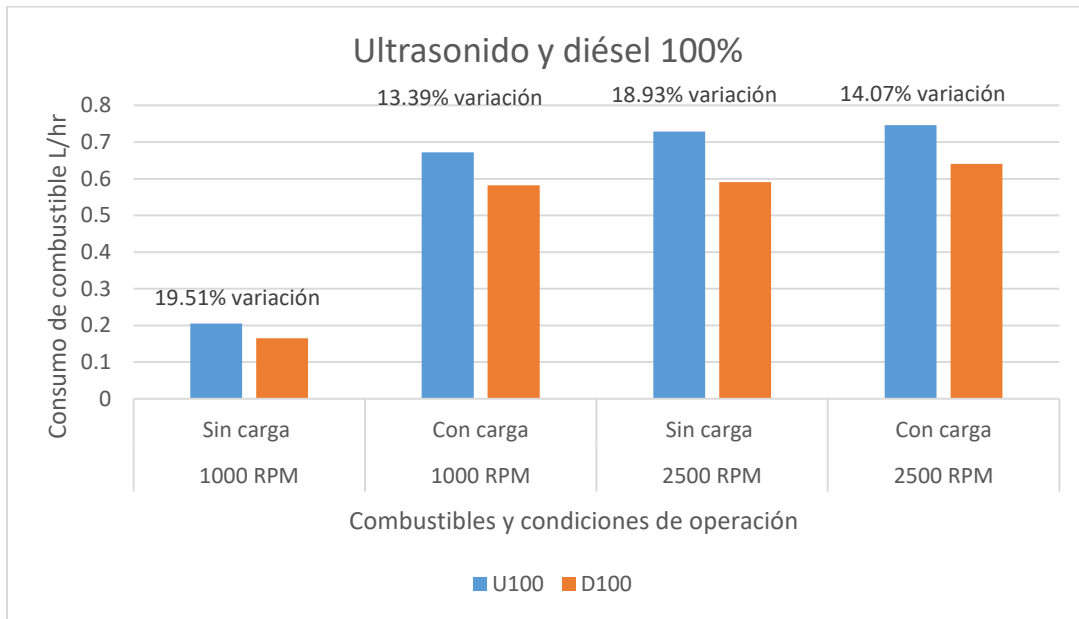
Diésel 100%	2500	Sin carga	0.590 (lts/hr)	0.589 (lts/hr)	0.596 (lts/hr)
Diésel 100%	2500	Con carga	0.649 (lts/hr)	0.640 (lts/hr)	0.634 (lts/hr)
B 100%	1000	Sin carga	0.210 (lts/hr)	0.215 (lts/hr)	0.219 (lts/hr)
B 100%	1000	Con carga	0.702 (lts/hr)	0.699 (lts/hr)	0.708 (lts/hr)
B 100%	2500	Sin carga	0.740 (lts/hr)	0.748 (lts/hr)	0.755 (lts/hr)
B 100%	2500	Con carga	0.760 (lts/hr)	0.754 (lts/hr)	0.763 (lts/hr)
U 100%	1000	Sin carga	0.207 (lts/hr)	0.201 (lts/hr)	0.209 (lts/hr)
U 100%	1000	Con carga	0.671 (lts/hr)	0.669 (lts/hr)	0.678 (lts/hr)
U 100%	2500	Sin carga	0.723 (lts/hr)	0.731 (lts/hr)	0.733 (lts/hr)
U 100%	2500	Con carga	0.739 (lts/hr)	0.748 (lts/hr)	0.753 (lts/hr)

Los biocombustibles al 100% y las mezclas comparadas entre sí no tienen menor consumo de combustible significativo, sin embargo, al comparar los consumos entre los biocombustibles y el diésel, se pudo observar un menor consumo de combustible cuando se utiliza diésel convencional. En la **Gráfica 1 y 2** se puede apreciar la variación del consumo de biodiésel transesterificado por ambos métodos al 100% con respecto del diésel convencional.



Gráfica 1. Variación del consumo de biodiesel de reactor Batch con respecto al diésel.

La variación de las barras de la **gráfica 1**, corresponden a la diferencia de gasto de combustible del diésel común con respecto al biodiésel transesterificado por ultrasonido, se puede observar que el menor consumo de combustible se da cuando no hay carga aplicada al motor y las revoluciones están en “ralentí” (marcha mínima) y se observa que el consumo puede aumentar hasta un 22% si se utiliza biodiésel.



Gráfica 2. Variación del consumo de biodiesel de ultrasonido con respecto al diésel.

El consumo de combustible mostrado en la **gráfica 2**, utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido, tiene un comportamiento similar al del biodiésel de reactor, también se observa el menor consumo aplicando revoluciones bajas (1000 rpm), sin aplicar carga y el consumo aumenta hasta en 19% utilizando biodiésel. Al igual que con el consumo de combustible utilizando biodiésel de reactor, se observó que cuando se aumenta la velocidad del motor a altas rpm (2500 rpm), aunque se aplique carga, ya no tiene mucha relevancia en el consumo.

4.4.2 Resultados de la medición de opacidad (emisiones contaminantes) para ambos biocombustibles.

La medición de opacidad del motor es un parámetro que mide la cantidad de hollín o carbón que un motor emana al medio ambiente, en la actualidad los automóviles están regulados con una serie de normas que los llevan a implementar sistemas de control de emisiones contaminantes. Los dos catalizadores que se montan en el sistema de escape del motor actualmente, resultan ser el sistema más efectivo para reducir las emisiones, sin embargo, se ha demostrado que las mediciones de las empresas automotrices no son del todo reales ni correctas y es por eso que es necesario hacer una medición de emisiones con una conducción real para saber la mejora de usar biodiésel en caso de que la haya. En la **Tabla 31** y **32** se muestran los resultados de la medición de opacidad del motor M-Power-178FD utilizando biodiésel transesterificado en reactor Batch y por ultrasonido.

Tabla 31. Medición de opacidad del motor M-Power-178FD con el diseño de experimentos para el biodiésel transesterificado en reactor Batch.

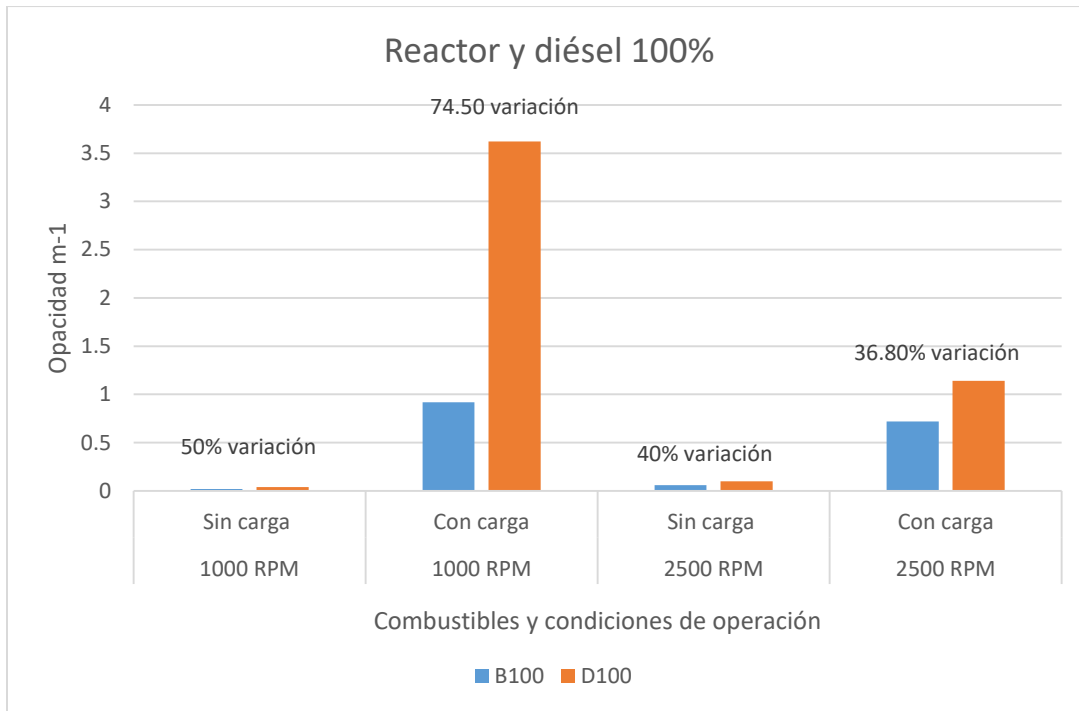
Variables de control			Variables de salida		
Mezclas de biodiésel (B10 y B25)	Velocidad (RPM)	Cargas (Nm)	Opacidad (m-1)	Opacidad (m-1)	Opacidad (m-1)
			Replica 1	Replica 2	Replica 3
B10	1000	Sin carga	0.05 (m-1)	0.05 (m-1)	0.06 (m-1)
B10	1000	Con carga	1.62 (m-1)	1.79 (m-1)	1.76 (m-1)
B10	2500	Sin carga	0.07 (m-1)	0.08 (m-1)	0.06 (m-1)
B10	2500	Con carga	0.68 (m-1)	0.74 (m-1)	0.76 (m-1)
B25	1000	Sin carga	0.02 (m-1)	0.03 (m-1)	0.02 (m-1)
B25	1000	Con carga	1.19 (m-1)	1.24 (m-1)	1.21 (m-1)
B25	2500	Sin carga	0.02 (m-1)	0.02 (m-1)	0.03 (m-1)
B25	2500	Con carga	0.68 (m-1)	0.71 (m-1)	0.73 (m-1)

Tabla 32. Medición de opacidad del motor M-Power-178FD con el diseño de experimentos para el biodiésel transesterificado por ultrasonido.

Variables de control			Variables de salida		
Mezclas de biodiésel (B10 y B25)	Velocidad (RPM)	Cargas (Nm)	Opacidad (m-1)	Opacidad (m-1)	Opacidad (m-1)
			Replica 1	Replica 2	Replica 3
B10	1000	Sin carga	0.03 (m-1)	0.02 (m-1)	0.03 (m-1)
B10	1000	Con carga	1.55 (m-1)	1.48 (m-1)	1.59 (m-1)
B10	2500	Sin carga	0.02 (m-1)	0.02 (m-1)	0.02 (m-1)
B10	2500	Con carga	0.64 (m-1)	0.70 (m-1)	0.71 (m-1)
B25	1000	Sin carga	0.02 (m-1)	0.01 (m-1)	0.02 (m-1)
B25	1000	Con carga	1.16 (m-1)	1.12 (m-1)	1.18 (m-1)
B25	2500	Sin carga	0.02 (m-1)	0.01 (m-1)	0.02 (m-1)
B25	2500	Con carga	0.62 (m-1)	0.67 (m-1)	0.69 (m-1)

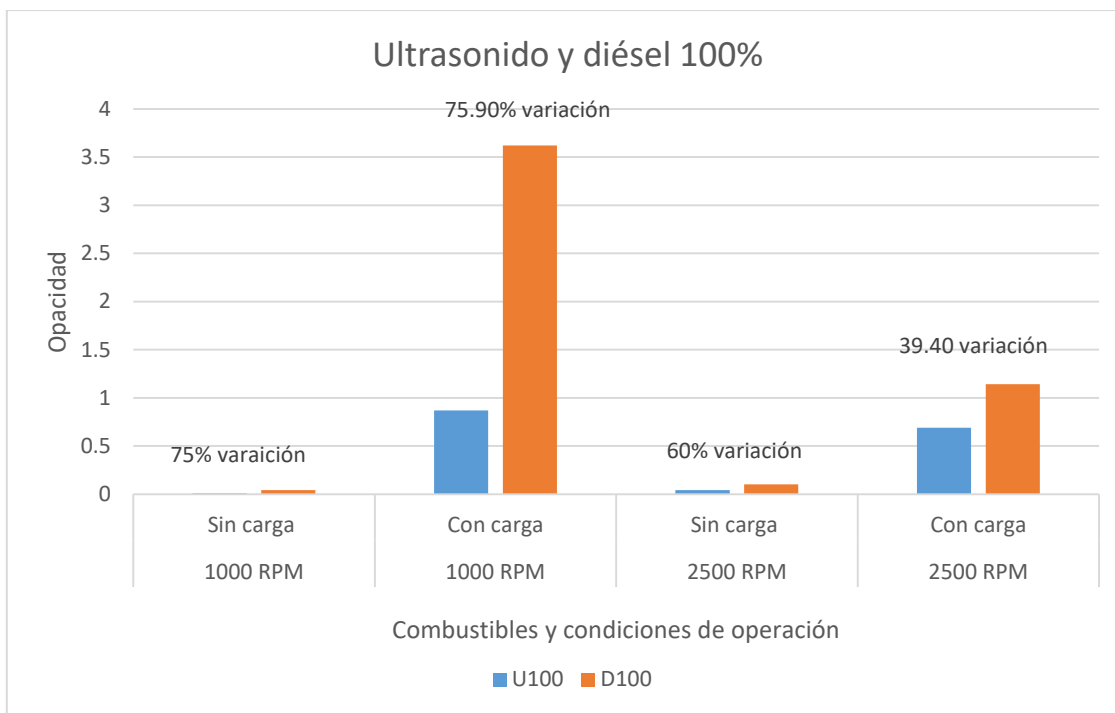
Tabla 33. Consumo de combustible del motor M-Power-178FD utilizando ambos biocombustibles al 100% y diésel convencional.

Variables de control			Variables de salida		
Tipo de Combustible	Velocidad (RPM)	Cargas (Nm)	Opacidad (m-1)	Opacidad (m-1)	Opacidad (m-1)
			Replica 1	Replica 2	Replica 3
Diésel 100%	1000	Sin carga	0.05 (m-1)	0.06 (m-1)	0.03 (m-1)
Diésel 100%	1000	Con carga	3.64 (m-1)	3.34 (m-1)	3.90 (m-1)
Diésel 100%	2500	Sin carga	0.09 (m-1)	0.11 (m-1)	0.12 (m-1)
Diésel 100%	2500	Con carga	1.20 (m-1)	1.06 (m-1)	1.16 (m-1)
B 100%	1000	Sin carga	0.02 (m-1)	0.01 (m-1)	0.03 (m-1)
B 100%	1000	Con carga	0.92 (m-1)	0.89 (m-1)	0.95 (m-1)
B 100%	2500	Sin carga	0.06 (m-1)	0.07 (m-1)	0.06 (m-1)
B 100%	2500	Con carga	0.76 (m-1)	0.71 (m-1)	0.69 (m-1)
U 100%	1000	Sin carga	0.01 (m-1)	0.02 (m-1)	0.01 (m-1)
U 100%	1000	Con carga	0.88 (m-1)	0.85 (m-1)	0.90 (m-1)
U 100%	2500	Sin carga	0.04 (m-1)	0.04 (m-1)	0.05 (m-1)
U 100%	2500	Con carga	0.70 (m-1)	0.69 (m-1)	0.68 (m-1)



Gráfica 3. Variación de la opacidad del biodiésel de reactor Batch con respecto al diésel.

En la **gráfica 3** se observa la emisión de opacidad del motor utilizando diésel y biodiésel transesterificado en reactor Batch. Se observó que a pesar de que la diferencia (variación) de la emisión de opacidad del diésel con el biodiésel alcanzó porcentaje de hasta 75%, se pudo concluir que algunas no tienen gran importancia debido a que sus valores son muy pequeños. El valor más significativo en la emisión de opacidad es cuando se tiene una carga alta aplicada al motor, velocidad baja (1000 rpm) y utilizando biodiésel, se obtuvo una reducción de 75% de emisión de opacidad comparado con la utilización de diésel, bajo las mismas condiciones de operación.



Gráfica 4. Variación de la opacidad del biodiésel de ultrasonido con respecto al diésel.

Analizando la **gráfica 4**, se observó que utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido, se obtienen resultados muy parecidos que los de la **gráfica 3**. La configuración con la que se obtuvo la mayor variación y emisión de opacidad del motor fue utilizando biodiésel, con una carga alta aplicada al motor (6.5 n.m) y a velocidad baja (1000 rpm). Con esta condición de operación se obtuvo una reducción del 76% en la emisión de opacidad, comparado con el diésel, utilizando la misma condición de operación.

En la **tabla 30 y 33** se hizo un análisis del biodiésel transesterificado en reactor con una proporción de 100% de biodiésel (B100) y se comparó con el diésel convencional, así mismo, el mismo análisis se hizo con el biodiésel transesterificado por ultrasonido y también se comparó con el diésel convencional. Estos datos se tomaron de una serie de corridas experimentales extras que se hicieron alternamente con los diseños de experimentos. La finalidad de estas corridas y la comparación del biodiésel, fue para obtener una referencia del biodiésel utilizado al

100% en el motor con respecto al diésel convencional. Cabe mencionar que la proporción de mezcla que recomienda la ASTM es de una concentración de 20% de biodiésel (B20) y para Europa la UNE-EN (Normalización Española) recomienda hasta un 30% de concentración de biodiésel (B30), sin embargo, los manuales de diferentes vehículos manejan la proporción recomendada para evitar fallas en el motor, cada motor es diferente y cada proveedor da diferentes recomendaciones para mezclar biocombustibles.

4.4.2.1 Análisis del impacto ambiental

Según la agencia internacional de la energía sobre emisiones de CO₂ originadas por la quema de combustibles (2014), en el año 2014 la contaminación a nivel mundial por emisiones de CO₂ fueron de 36 millones de kilo toneladas. La contribución a esta cifra por parte del sector de transporte fue de 8 millones de kilo toneladas y México contribuyó con 130 mil kilos toneladas. Tomando en cuenta que utilizando biodiésel a una concentración de 100% se podría disminuir en un 70% la cantidad de hollín que contamina el aire del planeta, utilizar biodiésel podría disminuir de gran manera las emisiones de CO₂. Ya que no se puede utilizar biodiésel al 100% en todos los autos, se habla de que las mezclas podrían ser de hasta un B-50, se podrían reducir en un 35% las emisiones de CO₂ a nivel mundial.

Bajo este panorama, se podría obtener una reducción anual de aproximadamente 4 millones de kilo toneladas de CO₂ a nivel mundial y los retos a enfrentar serían aumentar las tecnologías para la producción de biocombustibles que puedan llegar a todas las zonas del mundo para ser utilizados a mayor escala. Actualmente son muy pocos los países que producen biocombustibles a gran escala, mientras que la mayoría presenta un gran rezago en tecnologías y capacidad de producción. Los países que más fabrican biocombustibles son: Estados Unidos, Brasil, la Union Europea, China y Canadá (Fernández, 2017).

4.4.3 Validación del sistema de medición del consumo de combustible

Los datos obtenidos de las pruebas de opacidad del motor fueron validados con un equipo Bosch que está calibrado y certificado. Los datos obtenidos de las pruebas de consumo de combustible para el sistema de medición que se propuso, fueron validados mediante un análisis Gage RyR de una sola vía. Para hacer este estudio se hicieron 30 corridas con el motor en marcha mínima, sin carga y con un solo tipo de combustible. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 34. Datos obtenidos para el análisis del sistema de medición Gage RyR.

Operador	Consumo de combustible
Emanuel	171.5
Emanuel	172
Emanuel	171.5
Emanuel	172.5
Emanuel	171.5
Emanuel	172
Emanuel	171.5
Emanuel	171.5
Emanuel	172
Emanuel	172.5
Emanuel	171.5
Emanuel	172
Emanuel	172
Emanuel	172
Emanuel	172
Emanuel	171.5
Emanuel	171.5
Emanuel	172.5
Emanuel	172
Emanuel	172
Emanuel	171.5
Emanuel	171.5
Emanuel	171.5
Emanuel	172.5
Emanuel	172.5
Emanuel	171.5
Emanuel	172

Emanuel	171.5
Emanuel	172
Emanuel	171.5

Con estos datos se realizó un análisis Gage RyR y se obtuvieron los siguientes resultados:

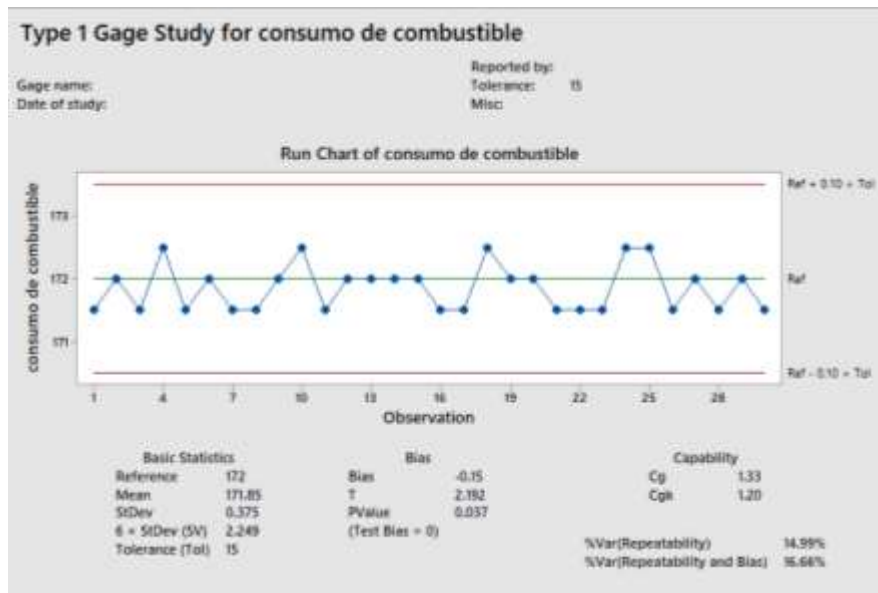


Figura 8. Estudio Gage RyR para el análisis del sistema de medición de consumo de combustible.

Se puede observar que los datos del sistema de medición están centrados cerca de la referencia de 172 mL. La tolerancia que se manejó en el sistema de medición fue de ± 15 mL por los derrames naturales que se producen al poner el combustible en el tanque y los restos que se quedan en la pipeta, el vaso y la manguera. El índice de capacidad del proceso Cg y Cgk son muy cercanos a la referencia comúnmente utilizada de 1.33, por lo que se puede decir que el proceso es bueno para la medición. El porcentaje de variabilidad y repetibilidad están muy cerca de la referencia de 15% que se utiliza comúnmente para estos porcentajes, por lo que se puede decir que el sistema tiene buena variabilidad y repetibilidad.

4.5 Análisis estadístico

Una vez que se terminó la recopilación de los datos de la caracterización y experimentación del proyecto, se procedió a analizar los datos mediante “pruebas t” para comparar las medias de los datos y mediante el uso de ANOVAS para analizar las varianzas. El análisis se realizó con ayuda de los softwares “Minitab” y “Rstudio”.

4.5.1 Comparación de medias de las características de calidad del biodiésel

Para hacer la comparación de medias mediante la “prueba t” se plantearon una serie de hipótesis que debemos comprobar estadísticamente, a continuación se presentan los resultados de las “pruebas t” de los parámetros de calidad del biodiésel reportados en las **Tablas 14, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 25 y 26**.

4.5.1.1 Comparación de las medias de la acidez de los biocombustibles

Para comprobar si el biodiésel transesterificado por ultrasonido tiene una menor concentración de acidez que el biodiésel transesterificado en reactor Batch, se propusieron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \text{Acidez b100} \leq \text{Acidez U100}$$

$$H_A: \text{Acidez b100} > \text{Acidez U100}$$

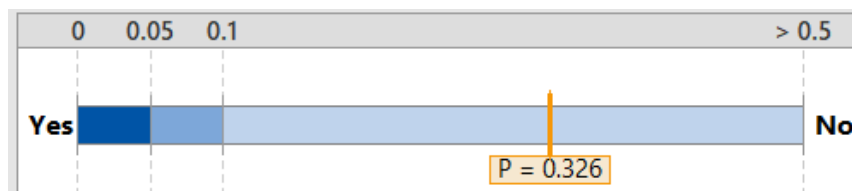


Figura 9. P-value de la “prueba t” de la acidez de los dos biocombustibles.

La media de la acidez del biodiésel transesterificado en reactor Batch (b100) es mayor que la acidez del biodiésel de ultrasonido (U100), se pudo observar un p-value arriba de 0.05, por lo que se aceptó la hipótesis nula y se dice que la acidez

del biodiésel de reactor es menor o igual a la acidez del biodiésel de ultrasonido, lo que significa que no existe una diferencia significativa entre ambos combustibles y no existe evidencia para decir que el biodiésel de ultrasonido contiene menor cantidad de ácidos grasos comparado con el biodiésel de reactor.

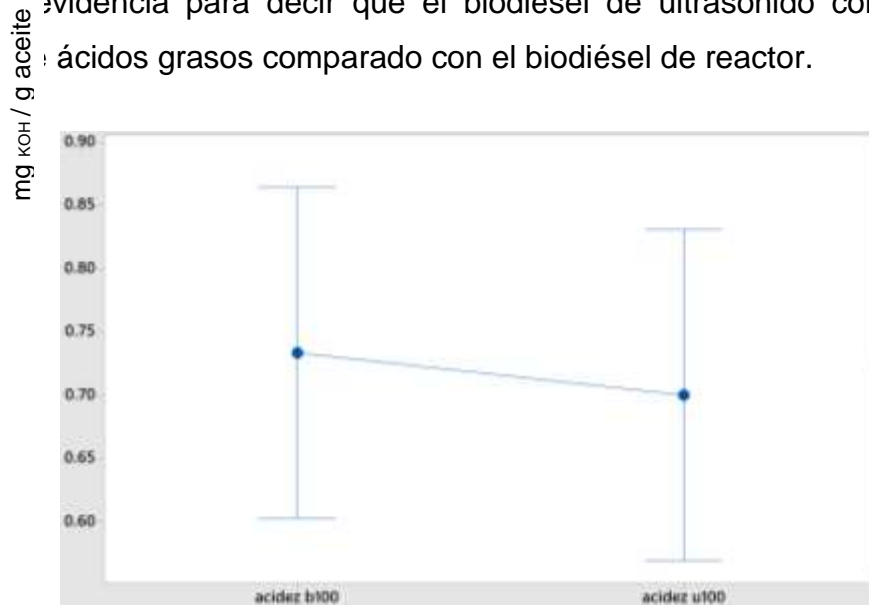


Figura 10. Comparación de medias de la acidez de los dos biocombustibles.

Observando la Figura 10, se aprecia que a pesar de que las medias tienen una mínima diferencia, no son estadísticamente diferentes y no hay suficiente evidencia para decir que el biodiésel de ultrasonido contiene menor porcentaje de ácidos grasos que el biodiésel de reactor.

4.5.1.2 Comparación de medias de la densidad de los biocombustibles y diésel

Para comprobar si el biodiésel transesterificado por ultrasonido tiene menor densidad que el biodiésel transesterificado en reactor Batch, se propusieron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \text{Densidad b100} \leq \text{Densidad U100}$$

$$H_A: \text{Densidad b100} > \text{Densidad U100}$$



Figura 11. P-value de la “prueba t” de la densidad de ambos biocombustibles.

Para los resultados de la densidad de ambos biocombustibles, se compararon individualmente y también se tomó como referencia la densidad del diésel. Para la comparación del biodiésel transesterificado por Batch (b100) y ultrasonido (U100), se estableció en la hipótesis nula que la densidad del biodiésel de Batch es menor o igual al biodiésel de ultrasonido, como se obtuvo un p-value menor a 0.05, se rechazó la hipótesis nula y decimos que la densidad del biodiésel de ultrasonido es menor que la densidad del biodiésel de reactor, por lo que se aceptó la hipótesis alterna.

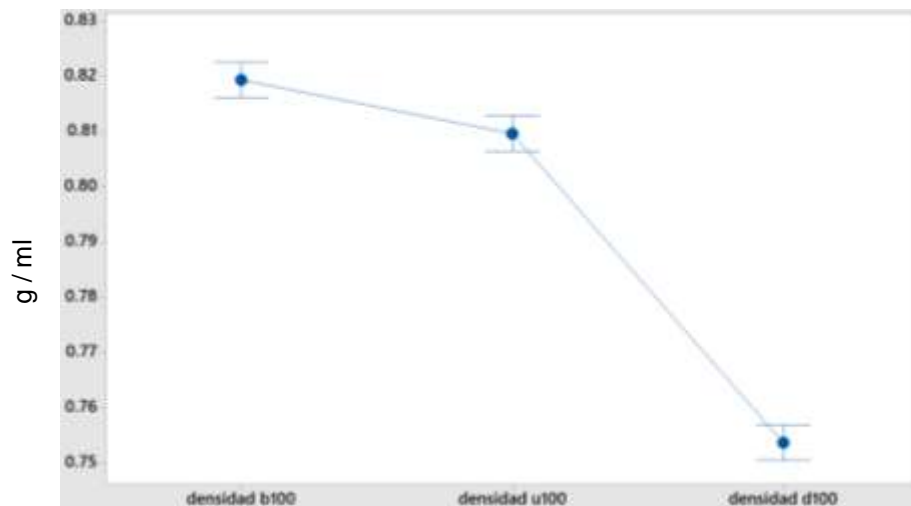


Figura 12. Comparación de las medias de la densidad de ambos biocombustibles y el diésel.

En la figura 12 se muestra que la densidad del diésel es claramente menor que la de ambos biocombustibles y también muestra que si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del biodiésel de ultrasonido y la de reactor.

4.5.1.3 Comparación de medias de la viscosidad de los biocombustibles y diésel

Para comprobar si el biodiésel transesterificado por ultrasonido tiene menor viscosidad que el biodiésel transesterificado en reactor Batch, se propusieron las siguientes hipótesis:

Ho: Viscosidad b100 \leq Viscosidad U100

HA: Viscosidad b100 $>$ Viscosidad U100

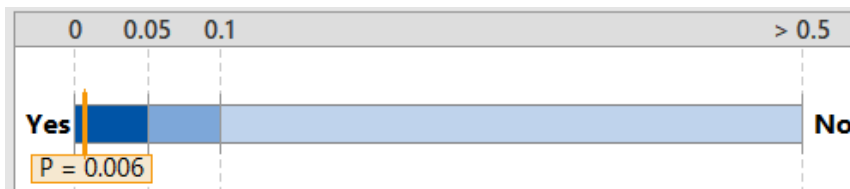


Figura 13. P-value de la “prueba t” de la viscosidad de ambos biocombustibles.

Se planteó la hipótesis nula de que la viscosidad del biodiésel transesterificado en reactor Batch (b100) sería menor o igual que la del biodiésel transesterificado por ultrasonido (U100), se observó que el p-value de la prueba es menor a 0.05, por lo tanto se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna que nos dice que el biodiésel de ultrasonido tiene una menor viscosidad que el biodiésel de reactor.

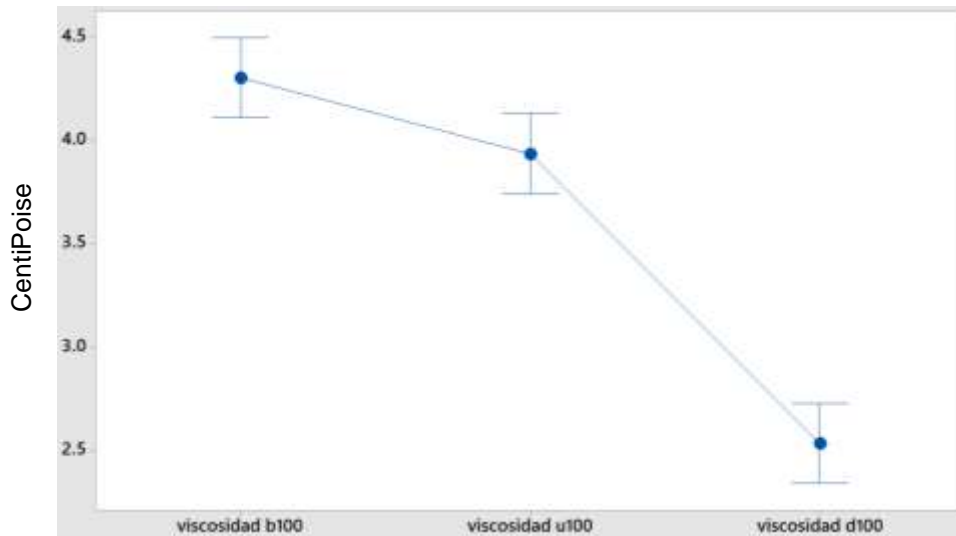


Figura 14. Comparación de las medias de la viscosidad de ambos biocombustibles y el diésel.

Al comparar los dos biocombustibles con el diésel, también se observó en la Figura 14, que la viscosidad del diésel es menor que la de los dos biocombustibles y que a pesar de que la viscosidad del biodiésel de ultrasonido es menor que la del biodiésel de reactor, no es estadísticamente diferente debido que hay un pequeño rango de operación en él se pueden obtener los mismos resultados con los dos biocombustibles.

4.5.1.4 Comparación de medias del poder calorífico de los biocombustibles y diésel

Para comprobar si el biodiésel transesterificado por ultrasonido (U100) tiene un mayor poder calorífico que el biodiésel transesterificado en reactor Batch (b100), se propusieron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \text{Poder calorífico b100} \geq \text{Poder calorífico U100}$$

$$H_A: \text{Poder calorífico b100} < \text{Poder calorífico U100}$$

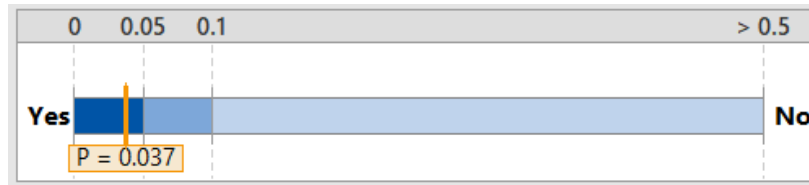


Figura 15. P-value de la “prueba t” del poder calorífico de ambos biocombustibles.

Para la “prueba t” del poder calorífico de ambos biocombustibles, se planteó como hipótesis nula que el biodiésel de reactor (b100) es mayor o igual al biodiésel de ultrasonido (U100). Se piensa que el poder calorífico del biodiésel de ultrasonido es mayor que el de reactor, así que se trató de comprobar que la hipótesis alterna es la correcta. Se obtuvo un p-value menor de 0.05, por lo tanto pudimos rechazar la hipótesis nula y decir que el biodiésel de ultrasonido tiene un mayor poder calorífico que el biodiésel de reactor, aceptando la hipótesis alternativa.

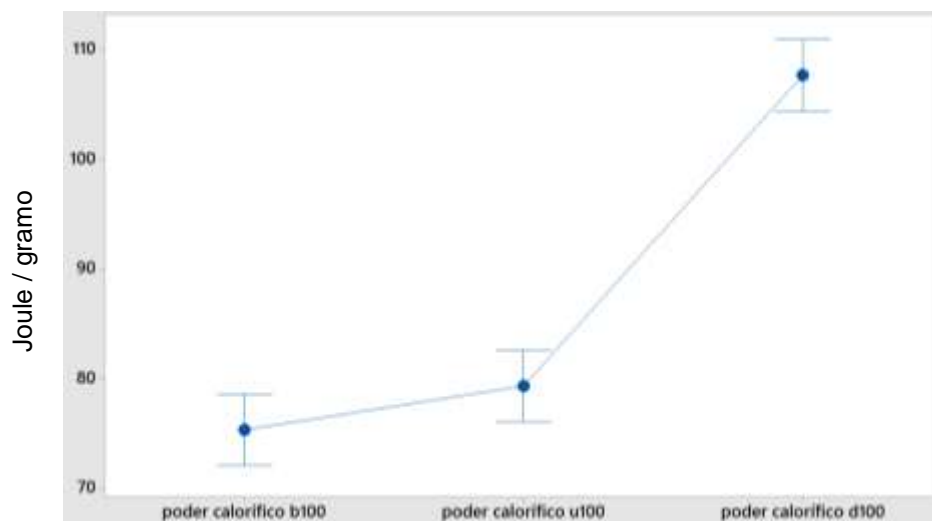


Figura 16. Comparación de las medias del poder calorífico de ambos biocombustibles y el diésel.

En la Figura 16 se observa que a pesar de que el poder calorífico del biodiésel de ultrasonido es mayor que el de reactor, no son estadísticamente diferentes ya que comparte un rango de operación en sus intervalos. El diésel se observa claramente con un mayor poder calorífico que el de los dos biocombustibles.

4.5.1.5 Comparación de medias del punto de inflamación de los biocombustibles y diésel

Para comprobar si el biodiésel transesterificado por ultrasonido tiene un mayor punto de inflamación que el biodiésel transesterificado en reactor Batch, se propusieron las siguientes hipótesis:

H_0 : Punto de inflamación b100 \geq Punto de inflamación U100

H_A : Punto de inflamación B100 < Punto de inflamación U100

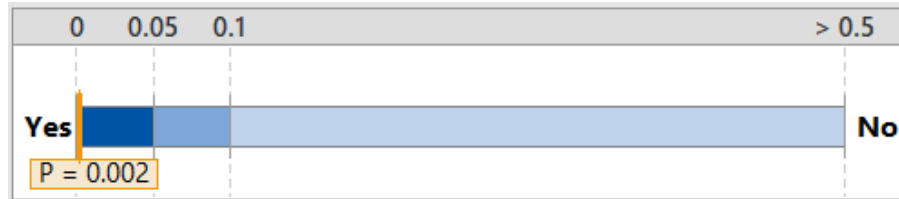


Figura 17. P-value de la “prueba t” del punto de inflamación de ambos biocombustibles.

Para comprobar la hipótesis alterna (H_A) que dice que el biodiésel transesterificado por ultrasonido (U100) tiene un mayor poder calorífico que el biodiésel de reactor (b100), se analizó el p-value obtenido, que fue menor a 0.05. Se rechazó la hipótesis nula que dice que el punto de inflamación del biodiésel de reactor es mayor que el biodiésel de ultrasonido, por lo que se aceptó la hipótesis alterna y se dice que el poder calorífico del biodiésel de ultrasonido, si es mayor que el de reactor.

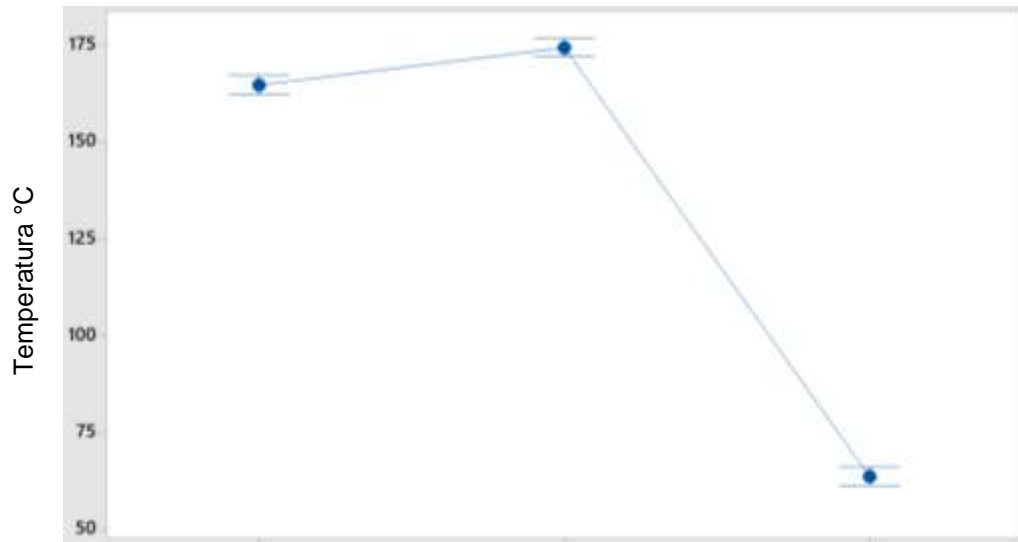


Figura 18. Comparación de las medias del punto de inflamación de ambos biocombustibles y el diésel.

En la Figura 18 se puede apreciar que el diésel tiene mucho menor punto de inflamación que ambos biocombustibles debido a su alta volatilidad y ambos biocombustibles son estadísticamente diferentes.

4.5.2 Correlación del poder calorífico de los biocombustibles con el consumo de combustible y opacidad del motor

La media del poder calorífico del biodiésel transesterificado en reactor Batch y ultrasonido se obtuvieron de un lote que se midió por triplicado. Para tener una referencia del efecto que tienen sobre el rendimiento del motor y con el fin de hacer la comparación entre ambos biocombustibles se hizo el siguiente análisis con los biocombustibles al 100%.

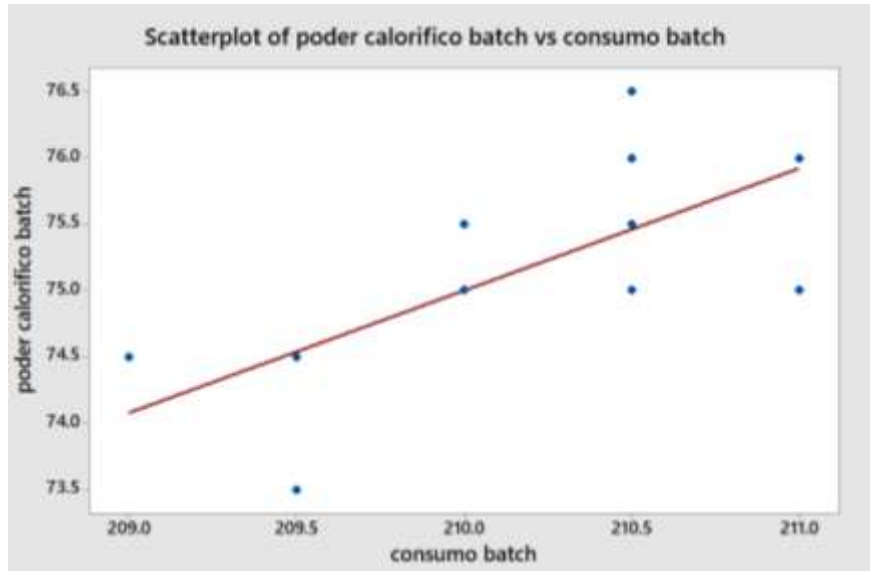


Figura 19. Gráfica de correlación del poder calorífico del biodiésel de reactor Batch con el consumo de combustible.

En la figura 20 se puede observar que el análisis de correlación Pearson nos dio un índice de 0.764, lo cual indica una alta correlación. El p-value de la prueba de correlación Pearson indica que los coeficientes de correlación son significativos.

Correlation: poder calorifico batch, consumo batch

Pearson correlation of poder calorifico batch and consumo batch = 0.764
P-Value = 0.000

Figura 20. Análisis de correlación del poder calorífico del biodiésel de reactor Batch y consumo de combustible.

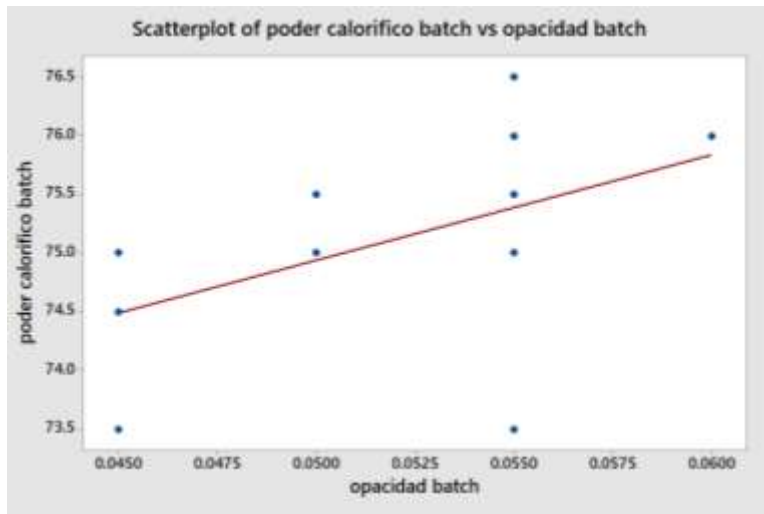


Figura 21. Gráfica de correlación del poder calorífico del biodiésel de reactor Batch y opacidad de motor.

En la figura 22 se puede observar que el índice de correlación R es de 0.611 lo cual indica que tienen una buena correlación. El p-value del análisis es de 0.001 lo que indica que el coeficiente de correlación si es significativo.

Correlation: poder calorifico batch, opacidad batch

Pearson correlation of poder calorifico batch and opacidad batch = 0.611
P-Value = 0.001

Figura 22. Análisis de correlación del poder calorífico del biodiésel de reactor Batch y opacidad de motor.

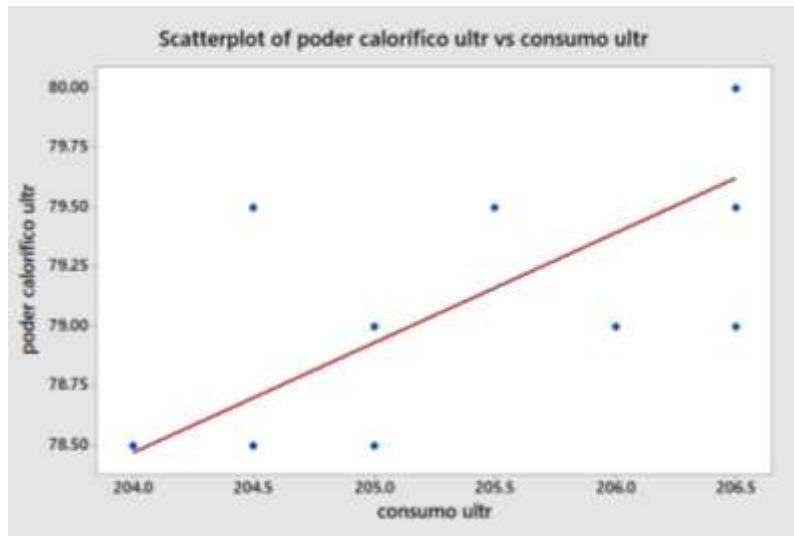


Figura 23. Gráfica de correlación del poder calorífico del biodiésel de ultrasonido y consumo de combustible.

En la figura 24 se puede observar que el índice de correlación R es de 0.718, lo que indica que se tiene una buena correlación. El p-value del análisis es de menor a .05 por lo que el análisis de correlación es significativo.

Correlation: poder calorífico ultr, consumo ultr

Pearson correlation of poder calorífico ultr and consumo ultr = 0.718
P-Value = 0.000

Figura 24. Análisis de correlación del poder calorífico del biodiésel de ultrasonido y consumo de combustible.

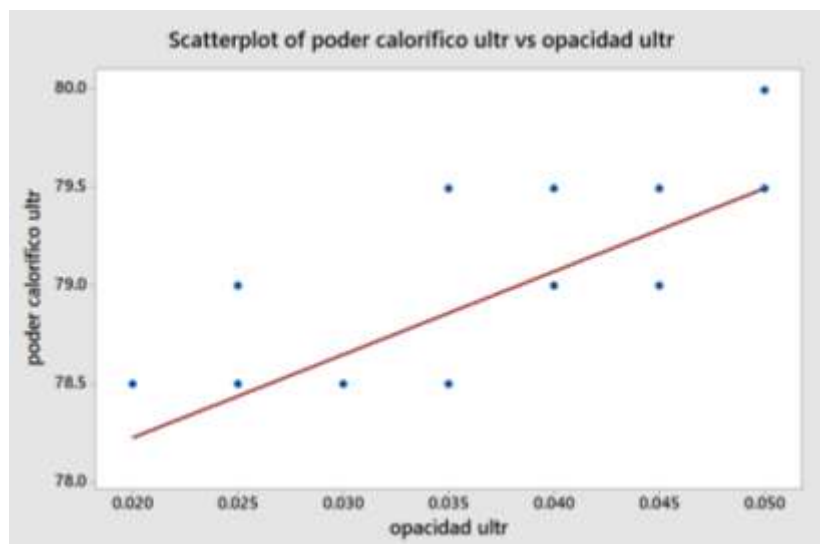


Figura 25. Gráfica de correlación del poder calorífico del biodiésel de ultrasonido y opacidad del motor.

En la figura 26 se puede observar que el índice R de correlación del análisis es de 0.740, lo cual indica que existe una buena correlación entre el poder calorífico y la opacidad del motor. El p-value del análisis es menor a .05 lo que significa que la correlación entre ambas variables es significativa.

Correlation: poder calorífico ultr, opacidad ultr

Pearson correlation of poder calorífico ultr and opacidad ultr = 0.740
P-Value = 0.000

Figura 26. Análisis de correlación del poder calorífico del biodiésel de ultrasonido y opacidad del motor.

Los datos del análisis de correlación corresponden con los datos de la experimentación, el análisis nos dice que entre más grande es el poder calorífico aumenta el consumo y las emisiones disminuyen, esto según la literatura, puede deberse a que al ser un combustible más oxigenado la combustión se da de manera más completa en la cámara de combustión y esto hace que el consumo de combustible sea mayor y las emisiones disminuyan.

4.5.3 ANOVA'S de los diseños de experimentos

Para analizar la varianza de los dos diseños de experimentos (el primero, pruebas de rendimiento utilizando biodiésel transesterificado en reactor Batch y el segundo, pruebas de rendimiento utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido) se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para cada diseño de experimentos.

4.5.3.1 ANOVA de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado en reactor Batch

En la Tabla 28 se muestran los resultados del diseño de experimentos de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado en reactor Batch y en la Figura 19 se muestra el resultado del análisis de la varianza de los datos y de las interacciones entre sus factores.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
carga	1	6.615	6.615	4628.57	< 2e-16	***
rpm	1	0.829	0.829	579.93	5.37e-14	***
mezclas	1	0.138	0.138	96.57	3.50e-08	***
carga:rpm	1	0.866	0.866	606.23	3.80e-14	***
carga:mezclas	1	0.077	0.077	53.92	1.65e-06	***
rpm:mezclas	1	0.084	0.084	58.79	9.58e-07	***
carga:rpm:mezclas	1	0.096	0.096	67.36	3.97e-07	***
Residuals	16	0.023	0.001			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Figura 19. ANOVA del diseño de experimentos para la Opacidad del motor utilizando biodiésel de reactor Batch.

Se observó que los valores P de los factores individuales, de las interacciones dobles y la triple, son significativas, el análisis dice que todos los factores son importantes para la opacidad del motor, si se aumenta o se disminuye los valores de los factores y se hacen interacciones de uno con otro, influirán de manera negativa o positiva en la emisión de opacidad del motor.

```

Call:
lm.default(formula = emisiones2 ~ carga + rpm + mezclas + carga:rpm +
  carga:mezclas + rpm:mezclas + carga:rpm:mezclas, data = DOFN)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.103333 -0.003333 -0.001667  0.010833  0.066667

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    0.567500   0.007717   73.541 < 2e-16 ***
carga1         0.525000   0.007717   68.034 < 2e-16 ***
rpm1          -0.185833   0.007717  -24.082 5.37e-14 ***
mezclas1     -0.075833   0.007717   -9.827 3.50e-08 ***
carga1:rpm1   -0.190000   0.007717  -24.622 3.80e-14 ***
carga1:mezclas1 -0.056667   0.007717   -7.343 1.65e-06 ***
rpm1:mezclas1  0.059167   0.007717    7.667 9.58e-07 ***
carga1:rpm1:mezclas1 0.063333   0.007717    8.207 3.97e-07 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0378 on 16 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9974,    Adjusted R-squared:  0.9962
F-statistic: 870.2 on 7 and 16 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 20. Coeficientes del modelo de regresión de la Opacidad del motor utilizando biodiésel de reactor Batch.

Analizando la Figura 20, la R^2 y la R^2 ajustada nos indican que el modelo de regresión se ajusta a los datos y que hacen al modelo predictivo, ya que describe la mayor parte de la variación del proceso.

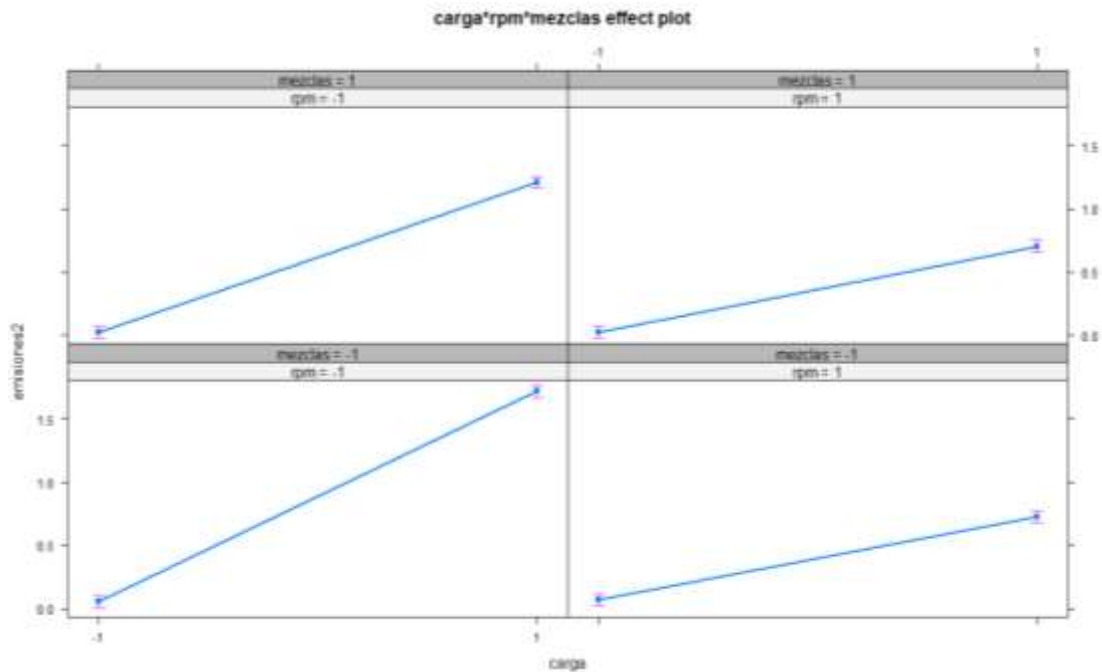


Figura 21. Gráficos de los efectos de las interacciones de los factores sobre la Opacidad utilizando biodiésel de reactor Batch.

En la Figura 21 se observa que la carga que se le aplica al motor influye mucho en la opacidad del motor, ya que siempre que se le aplica carga al motor, las emisiones aumentan considerablemente. La interacción que más impacto tuvo en la salida de hollín hacia el medio ambiente fue cuando se tuvo una mezcla de biodiésel-diésel al 10% (B10), velocidad baja (1000 RPM) y una carga alta (6.5 Nm de torque), por lo que se puede deducir que cuando se realiza una conducción forzada en la que se necesite aplicar más potencia al motor, se tendrá mayor opacidad en el motor.

4.5.3.2 ANOVA de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido

En la Tabla 29 se muestran los resultados del diseño de experimentos de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido y en la

Figura 22 se muestra el resultado del análisis de la varianza de los datos y de las interacciones entre sus factores.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
carga	1	5.871	5.871	6839.65	< 2e-16	***
rpm	1	0.690	0.690	804.12	4.16e-15	***
mezclas	1	0.067	0.067	78.30	1.46e-07	***
carga:rpm	1	0.677	0.677	788.39	4.85e-15	***
carga:mezclas	1	0.059	0.059	68.74	3.48e-07	***
rpm:mezclas	1	0.051	0.051	59.81	8.58e-07	***
carga:rpm:mezclas	1	0.048	0.048	55.58	1.37e-06	***
Residuals	16	0.014	0.001			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Figura 22. ANOVA del diseño de experimentos para la Opacidad del motor utilizando biodiésel de ultrasonido.

Se observa que los valores P de los factores individuales, de las interacciones dobles y la triple, son significativas, por lo que tienen un efecto sobre la variable de salida “Opacidad”.

```
Call:
lm.default(formula = emisiones ~ carga + rpm + mezclas + carga:rpm +
  carga:mezclas + rpm:mezclas + carga:rpm:mezclas, data = DOFN)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.060000 -0.006667  0.003333  0.010000  0.050000

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    0.51458    0.00598   86.047 < 2e-16 ***
carga1         0.49458    0.00598   82.702 < 2e-16 ***
rpm1          -0.16958    0.00598  -28.357 4.16e-15 ***
mezclas1     -0.05292    0.00598   -8.849 1.46e-07 ***
carga1:rpm1   -0.16792    0.00598  -28.078 4.85e-15 ***
carga1:mezclas1 -0.04958    0.00598   -8.291 3.48e-07 ***
rpm1:mezclas1  0.04625    0.00598    7.734 8.58e-07 ***
carga1:rpm1:mezclas1 0.04458    0.00598    7.455 1.37e-06 ***
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0293 on 16 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9982, Adjusted R-squared:  0.9974
F-statistic: 1242 on 7 and 16 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Figura 23. Coeficientes del modelo de regresión de la Opacidad del motor utilizando biodiésel de ultrasonido.

Analizando la Figura 23, la R^2 y la R^2 ajustada nos indican que el modelo de regresión se ajusta a los datos y que hacen al modelo predictivo, ya que describe la mayor parte de la variación del proceso.

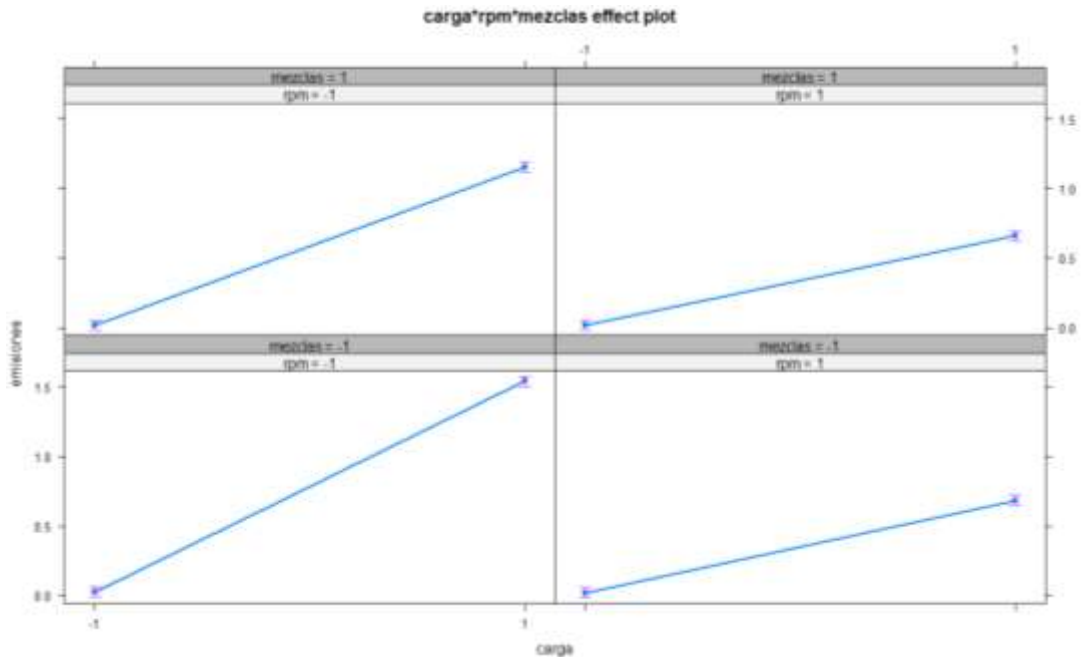


Figura 24. Gráficos de los efectos de las interacciones de los factores sobre la Opacidad utilizando biodiésel de ultrasonido.

En la Figura 24 se observa que la carga que se le aplica al motor influye mucho en la opacidad del motor, ya que siempre que se le aplica carga al motor, las emisiones aumentan considerablemente. La interacción que más impacto tuvo en la salida de hollín hacia el medio ambiente fue cuando se tuvo una mezcla de biodiésel-diésel al 10% (B10), velocidad baja (1000 RPM) y una carga alta (6.5 Nm de torque), por lo que se puede deducir que cuando se realiza una conducción forzada en la que se necesite aplicar más potencia al motor, se tendrá mayor opacidad en el motor.

4.5.3.3 ANOVA del consumo de combustible del motor utilizando biodiésel transesterificado en reactor Batch

En la **Tabla 24** se muestran los resultados del diseño de experimentos de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido y en la **Figura 25** se muestra el resultado del análisis de la varianza de los datos y de las interacciones entre sus factores.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
carga	1	0.3942	0.3942	2672.98	< 2e-16	***
rpm	1	0.3765	0.3765	2552.70	< 2e-16	***
mezclas	1	0.0036	0.0036	24.09	9.77e-05	***
carga:rpm	1	0.1710	0.1710	1159.58	< 2e-16	***
Residuals	19	0.0028	0.0001			

Figura 25. ANOVA del diseño de experimentos para el consumo de combustible del motor utilizando biodiésel de reactor Batch.

Se puede observar que para este diseño de experimentos, utilizando biodiésel de reactor, la interacción triple no fue significativa, la única interacción doble que tuvo un efecto significativo en el consumo de combustible del motor fue la interacción de la carga aplicada al motor con la velocidad. Por otro lado, el factor de la concentración de mezcla, por si solo tiene un efecto en el consumo de combustible del motor.

```

Call:
lm.default(formula = consumo2 ~ carga + rpm + mezclas + carga:rpm,
            data = DOFN)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0220000 -0.0054583 -0.0004167  0.0069583  0.0236667

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.536167   0.002479  216.283 < 2e-16 ***
carga1       0.128167   0.002479   51.701 < 2e-16 ***
rpm1         0.125250   0.002479   50.524 < 2e-16 ***
mezclas1     0.012167   0.002479    4.908 9.77e-05 ***
carga1:rpm1 -0.084417   0.002479  -34.053 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01214 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.997,    Adjusted R-squared:  0.9964
F-statistic: 1602 on 4 and 19 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 26. Coeficientes del modelo de regresión del consumo de combustible del motor utilizando biodiésel de reactor Batch.

Analizando la **Figura 26**, la R^2 y la R^2 ajustada indican que el modelo de regresión se ajusta a los datos y que hacen al modelo predictivo, ya que describe la mayor parte de la variación del proceso.

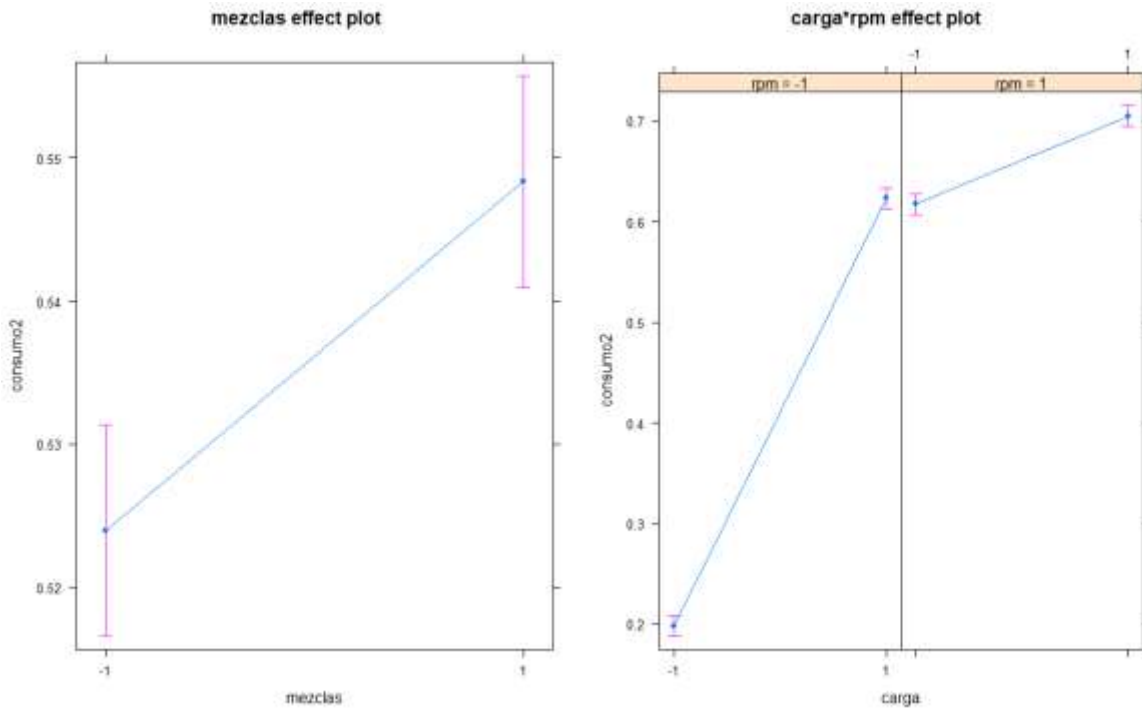


Figura 27. Gráficos de los efectos de las interacciones de los factores sobre la Opacidad utilizando biodiésel de reactor Batch.

Se puede observar en los gráficos que el factor de mezcla tiene un efecto significativo en el consumo de combustible, en el nivel alto, una concentración del 25% de biodiésel en la mezcla (B25), se tiene un mayor consumo de combustible en comparación de la mezcla B10. Por otro lado, la interacción de los factores de carga y RPM indica que cuando no se tiene carga y se mantienen la velocidad baja (1000 RPM), el consumo de combustible es muy bajo, cuando se aumenta la carga y se mantienen la velocidad en un nivel bajo (1000 RPM), el consumo de combustible aumenta drásticamente. Por último, este gráfico dice que al aumentar la velocidad (2500 RPM), hace que se aumente el consumo de combustible aunque no se aplique carga, sin embargo, la variación al aplicar carga no es tanta comparada con el efecto de la velocidad baja.

4.5.3.3 ANOVA del consumo de combustible del motor utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido

En la **Tabla 25** se muestran los resultados del diseño de experimentos de la opacidad del motor utilizando biodiésel transesterificado por ultrasonido y en la **Figura 28** se muestra el resultado del análisis de la varianza de los datos y de las interacciones entre sus factores.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
carga	1	0.3907	0.3907	6376.594	< 2e-16	***
rpm	1	0.3700	0.3700	6039.638	< 2e-16	***
mezclas	1	0.0040	0.0040	64.518	3.45e-07	***
carga:rpm	1	0.1775	0.1775	2897.329	< 2e-16	***
carga:mezclas	1	0.0010	0.0010	16.551	0.00080	***
rpm:mezclas	1	0.0005	0.0005	8.839	0.00853	**
Residuals	17	0.0010	0.0001			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Figura 28. ANOVA del diseño de experimentos para el consumo de combustible del motor utilizando biodiésel de ultrasonido.

En el experimento con el biodiésel transesterificado por ultrasonido, se observó que las interacciones dobles si tuvieron un efecto en el consumo de combustible. Al igual que con el biodiésel de reactor, la interacción triple no fue significativa, pero todas las interacciones dobles fueron significativas. Esto demuestra que con el biodiésel transesterificado por ultrasonido, la cantidad de mezcla combinado con la velocidad tiene un efecto significativo en el consumo de combustible, así como las mezclas con la carga y la carga con la velocidad.

```

Call:
lm.default(formula = consumo ~ carga + rpm + mezclas + carga:rpm +
  carga:mezclas + rpm:mezclas, data = DOFN)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.013250 -0.004292  0.001417  0.003250  0.012917

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   0.528250   0.001598  330.628 < 2e-16 ***
carga         0.127583   0.001598   79.854 < 2e-16 ***
rpm           0.124167   0.001598   77.715 < 2e-16 ***
mezclas1      0.012833   0.001598    8.032 3.45e-07 ***
carga:rpm     -0.086000   0.001598  -53.827 < 2e-16 ***
carga:mezclas1 0.006500   0.001598    4.068 0.00080 ***
rpm:mezclas1  0.004750   0.001598    2.973 0.00853 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.007827 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9989,    Adjusted R-squared:  0.9985
F-statistic: 2567 on 6 and 17 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Figura 29. Coeficientes del modelo de regresión del consumo de combustible del motor utilizando biodiésel de reactor Batch.

Analizando la **Figura 29**, la R^2 y la R^2 ajustada nos indican que el modelo de regresión se ajusta a los datos y que hacen al modelo predictivo, ya que describe la mayor parte de la variación del proceso.

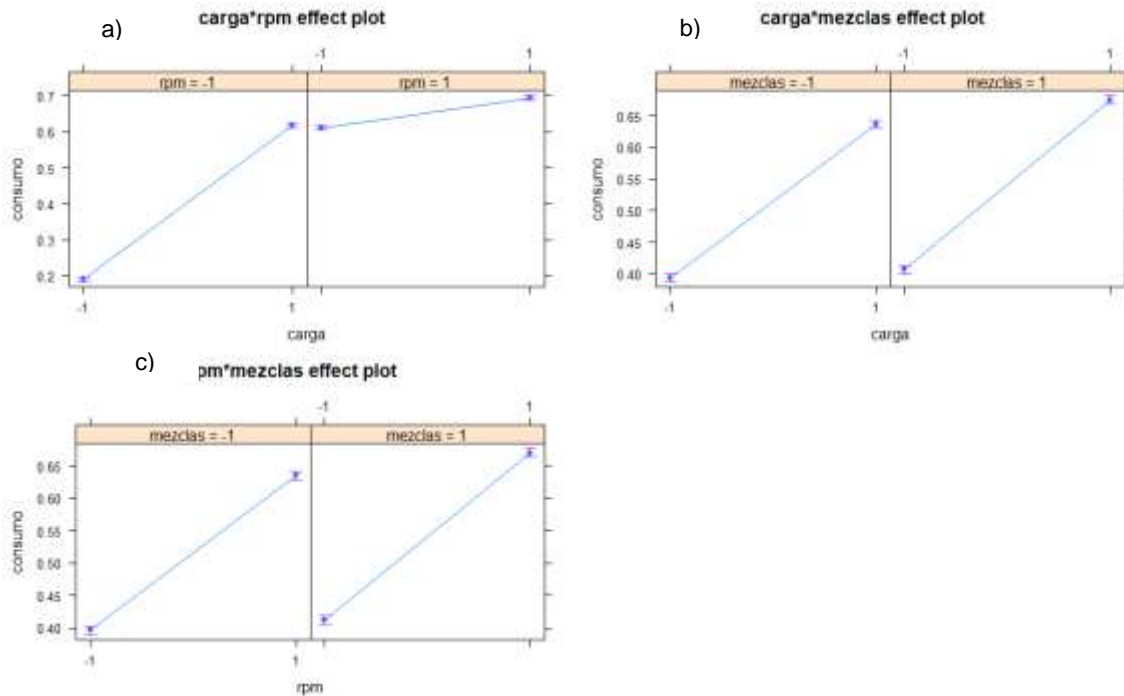


Figura 30. Gráficos de los efectos de las interacciones de los factores sobre la Opacidad utilizando biodiésel de ultrasonido.

En los gráficos de la **figura 30**, se puede observar que en la interacción de la carga con la velocidad (**figura 30 a**), tiene una tendencia en el comportamiento con el biodiésel de reactor, ya que al aumentar la carga, aumenta el consumo de combustible y al igual que con el biodiésel de reactor, se obtuvo el mayor consumo de combustible a velocidades bajas y con carga alta. Al aumentar la velocidad el consumo de combustible aumenta pero de una manera más gradual y no tiene mucha variación al quitar o poner carga.

La interacción de la carga con las mezclas tiene una tendencia parecida a la del biodiésel de reactor (**figura 30 b**), sin carga y con una concentración de B10 en la mezcla el consumo de combustible es bajo y al aumentar la carga, aumenta el consumo. Con una mezcla de B25 y sin carga, el consumo es bajo y al aumentar la carga, también aumenta el consumo de combustible.

Por último, la interacción de la velocidad con las mezclas (**figura 30 c**), tienen la misma tendencia de comportamiento que el biodiésel transesterificado en reactor. Utilizar RPM bajas y mezcla de B10 se traducen a un consumo bajo, al aumentar las RPM el consumo de combustible aumenta. Lo mismo sucede con una mezcla de B25, a bajas RPM el consumo es bajo y al aumentarlas, aumenta el consumo de combustible.

5. CONCLUSIONES

Al comparar las características de calidad del biocombustible transesterificado por reactor Batch y por ultrasonido y conociendo los efectos que producen en el consumo de combustible del motor y en la emisión de opacidad, se pudo observar que el biodiésel transesterificado por ultrasonido si produce un menor consumo de combustible en el motor y también emite menos hollín al medio ambiente, sin embargo, las diferencias en estos parámetros de rendimiento no son tan significativas como se esperaban. A pesar de que se cumple la hipótesis planteada en el proyecto y se concluyó que el biodiésel de ultrasonido da un mejor rendimiento en el motor, la diferencia de estos parámetros no es tan grande como para asegurar que el biodiésel de ultrasonido es muy superior comparado con el de reactor. Con el biodiésel transesterificado por ultrasonido se logra una reducción de hasta 76% de emisión de opacidad y con el biodiésel de reactor se obtuvo una reducción de hasta 74%, esto indica que en realidad no hay una gran diferencia entre ambos. Así mismo, con el biodiésel de ultrasonido tenemos un aumento de hasta un 18% de consumo de combustible y con el de reactor se obtuvo un aumento de hasta 21%, esto nos dice que tampoco existe una gran diferencia en este parámetro. Al hacer el análisis económico de ambos biocombustibles y al haber hecho una comparación entre las ventajas y desventajas de ambos, se pudo concluir que si es mejor implementar un proceso de transesterificación por ultrasonido, ya que se obtienen los mismos beneficios ambientales y de rendimiento en el motor pero con un proceso de producción más económico y con menos complejidad.

Al comparar los efectos que producen en el motor las mezclas de biodiésel-diésel transesterificado por reactor y ultrasonido, se pudo observar que tienen la misma tendencia que si se utilizara biodiésel al 100%. Conforme se aumenta la concentración de biodiésel en la mezcla, también aumenta el consumo de combustible y disminuyen las emisiones contaminantes. Con una mezcla de biodiésel B25 (25% de concentración de biodiésel en la mezcla) transesterificado en reactor, se obtiene un aumento de aproximadamente 9% en el consumo de combustible, a comparación del biodiésel de ultrasonido que tiene un aumento de aproximadamente 7%. La reducción de las emisiones utilizando mezclas tiene la misma tendencia y utilizando una mezcla de biodiésel B25 se obtiene hasta un 20% de reducción de emisión de opacidad del motor, comparada con un 23% que disminuye con biodiésel de ultrasonido. No son muy diferentes los rendimientos de ambos biocombustibles pero la mayor diferencia radica en el proceso para producir el biodiésel por ambos métodos.

Al analizar los datos obtenidos en el diseño de experimentos se pudo determinar cuáles eran las variables que tenían mayor efecto en el rendimiento del motor. Se concluyó que la carga que se le aplica a un motor, es la que tiene mayor efecto en el consumo de combustible y en la opacidad del motor, cuando la carga es alta, la velocidad y la mezcla no tienen un gran efecto sobre el rendimiento. A pesar de que el análisis dice que utilizar biodiésel aumenta el consumo de combustible, este consumo es despreciable cuando se tiene una carga que haga que el motor haga su máximo esfuerzo, esta variable de operación es la que hace que se consuma más combustible y que el motor contamine más. En otras palabras, cuando un motor tiene una fuerza en contra que le impida trabajar con libertad, es cuando aumenta el consumo de combustible y la emisión de opacidad.

Las características de calidad del biodiésel que se midieron no fueron muy diferentes entre ambos métodos de transesterificación, sin embargo, se mantuvieron dentro de los parámetros que marca la norma ASTM D6751 y como lo indica la literatura, son variables correlacionadas con las variables de rendimiento

del proyecto. Específicamente se hizo un análisis de correlación del poder calorífico del biodiésel con el consumo de combustible y la emisión de opacidad, ya que este parámetro no está especificado en la norma y es importante para determinar la cantidad de energía contenida en el biodiésel y saber si está correlacionada con el rendimiento. Se pudo determinar que esta característica si está correlacionada con el consumo de combustible y con la emisión de opacidad.

6. REFERNCIAS

- Adaileh, W. M., and K. S. Alqdah. 2012. Performance of diesel engine fuelled by a biodiesel extracted from a waste cooking oil. *Energy Procedia*.
- Atadashi, I. M., M. K. Aroua, A. R. Abdul Aziz, and N. M. N. Sulaiman. 2012. The effects of water on biodiesel production and refining technologies: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16:3456–3470.
- Benjumea H, P. N., G. Chaves, and C. M. Vargas R. 2006. Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional. *Rev. Energética* 36. c:50. doi:10.15446/energetica.
- Bhuiya, M. M. K., M. G. Rasul, M. M. K. Khan, N. Ashwath, A. K. Azad, and M. Mofijur. 2015. Optimisation of Oil Extraction Process from Australian Native Beauty Leaf Seed (*Calophyllum Inophyllum*). *Energy Procedia*. 75:56–61.
- Boog, J. H. F., E. L. C. Silveira, L. B. De Caland, and M. Tubino. 2011. Determining the residual alcohol in biodiesel through its flash point. *Fuel*. 90:905–907.
- Canesin, E. A., C. C. de Oliveira, M. Matsushita, L. Felicidade Dias, M. Reghiany Pedrão, and N. E. de Souza. 2014. Characterization of residual oils for biodiesel production. *Electron. J. Biotechnol.* 17:39–45.
- Carla, E., F. Alexandre, E. V Silveira, C. F. De Souza, J. F. Sales, L. Carlos, S. De Oliveira, L. H. Viana, L. Claudio, and A. Barbosa. 2015. Synthesis , characterization and study of the thermal behavior of methylic and ethylic biodiesel produced from tucumã (*Astrocaryum huaimi* Mart .) seed oil. *Fuel*. 161:233–238.
- Carrese, S., A. Gemma, and S. La Spada. 2013. Impacts of Driving Behaviours, Slope and Vehicle Load Factor on Bus Fuel Consumption and Emissions: A Real Case Study in the City of Rome. *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 87:211–221.
- Çelebi, K., E. Uludamar, and M. Özcanlı. 2017. Evaluation of fuel consumption and vibration characteristic of a compression ignition engine fuelled with high viscosity biodiesel and hydrogen addition. *Int. J. Hydrogen Energy*. 42:23379–23388.
- Chao, Y., J. X. Wang, W. Zhi, and S. J. Shuai. 2013. Comparative study on Gasoline Homogeneous Charge Induced Ignition (HCII) by diesel and Gasoline/Diesel Blend Fuels (GDBF) combustion. *Fuel*. 106:470–477.
- Du, Y., J. Wu, S. Yang, and L. Zhou. 2017. Predicting vehicle fuel consumption patterns using floating vehicle data. *J. Environ. Sci.* 59:24–29.
- Efe, Ş., M. A. Ceviz, and H. Temur. 2018. Comparative engine characteristics of

- biodiesels from hazelnut, corn, soybean, canola and sunflower oils on diesel engine. *Renew. Energy*.
- Elsanusi, O. A., M. M. Roy, and M. S. Sidhu. 2017. Experimental Investigation on a Diesel Engine Fueled by Diesel-Biodiesel Blends and their Emulsions at Various Engine Operating Conditions. *Appl. Energy*. 203:582–593.
- Fazal, M. A., N. R. Suhaila, A. S. M. A. Haseeb, S. Rubaiee, and A. Al-Zahrani. 2018. Influence of copper on the instability and corrosiveness of palm biodiesel and its blends: An assessment on biodiesel sustainability. *J. Clean. Prod.* 171:1407–1414.
- Fernández, A. P., and U. Autónoma. 2017. Producción de bioetanol en México: implicaciones socio-económicas. 10:13–24.
- Goel, V., N. Kumar, and P. Singh. 2017. Impact of modified parameters on diesel engine characteristics using biodiesel : A review.
- Hossain, F. M., T. J. Rainey, Z. Ristovski, and R. J. Brown. 2018. Performance and exhaust emissions of diesel engines using microalgae FAME and the prospects for microalgae HTL biocrude. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82:4269–4278.
- Hosseini, M., A. M. Nikbakht, and M. Tabatabaei. 2012. Biodiesel production in batch tank reactor equipped to helical ribbon-like agitator. *Mod. Appl. Sci.* 6:40–46.
- Hussain, M. N., and I. Janajreh. 2018. Acousto-chemical analysis in multi-transducer sonochemical reactors for biodiesel production. *Ultrason. Sonochem.* 40:184–193.
- Kim, T. H., and J. K. Han. 2012. Viscosity characteristics of waste cooking oil with ultrasonic energy irradiation. *J. Biosyst. Eng.* 37:429–433.
- Kirubakaran, M., and V. Arul Mozhi Selvan. 2018. A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82:390–401.
- Knothe, G. 2006. Analyzing biodiesel: Standards and other methods. *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.* 83:823–833.
- Kumar, D., G. Kumar, Poonam, and C. P. Singh. 2010. Ultrasonic-assisted transesterification of *Jatropha curcus* oil using solid catalyst, Na/SiO₂. *Ultrason. Sonochem.* 17:839–844.
- Lamara, A., P. Lanusse, A. Charlet, D. Nelson, G. Colin, A. Lesobre, A. Oustaloup, Y. Chamailard, A. Lamara, P. Lanusse, A. Charlet, D. N. Gruel, and G. Colin. 2014. High Dynamic Engine-Dynamometer Identification and Control.
- Li, B., Y. Li, H. Liu, F. Liu, Z. Wang, and J. Wang. 2017. Combustion and emission

- characteristics of diesel engine fueled with biodiesel/PODE blends. *Appl. Energy*. 206:425–431.
- Lore, S., and F. Saba. 2017. The Italian primary kinematic viscosity standard : The viscosity scale. 112:1–8.
- Mahajan, S., S. K. Konar, and D. G. B. Boocock. 2006. Determining the acid number of biodiesel. *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.* 83:567–570.
- Massera, M. M., F. Falconi, M. Piantanida, and R. Cantarutti. 2013. Analisis de los factores que influyen sobre la viscosidad del biodiesel obtenido a partir de la reaccion de transesterificacion utilizando aceite vegetal nuevo y usado.
- Mattarelli, E., C. A. Rinaldini, and T. Savioli. 2015. Combustion analysis of a diesel engine running on different biodiesel blends. *Energies*. 8:3047–3057.
- De Mattos, R. A., F. A. Bastos, and M. Tubino. 2015. Correlation between the composition and flash point of diesel-biodiesel blends. *J. Braz. Chem. Soc.* 26:393–395.
- Mauricio Medina Villadiego, and L. T. B. Yesid Ospino Roa. 2015. Esterificación Y Transesterificación De Aceites Residuales Para Obtener Biodiesel. *Luna Azul*. 25–34.
- Mejía, J. D., N. Salgado, and C. E. Orrego. 2013. Effect of blends of Diesel and Palm-Castor biodiesels on viscosity , cloud point and flash point. *Ind. Crop. Prod.* 43:791–797.
- Murugesan, A., D. Subramaniam, and A. Avinash. 2016. Heating value of biodiesel: An empirical and theoretical exploration. *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.* 38:1293–1298.
- Passenbrunner, T. E., and M. Sassano. 2013. Optimal Control of Internal Combustion Engine Test Benches equipped with Hydrodynamic Dynamometers. *IFAC*.
- Petranović, Z., T. Bešenić, M. Vujanović, and N. Duić. 2017. Modelling pollutant emissions in diesel engines, influence of biofuel on pollutant formation. *J. Environ. Manage.* 203:1038–1046.
- Pratas, M. J., S. V.D. Freitas, M. B. Oliveira, S. C. Monteiro, Á. S. Lima, and J. A. P. Coutinho. 2011. Biodiesel density: Experimental measurements and prediction models. *Energy and Fuels*. 25:2333–2340.
- Rahman, A., F. Razzak, R. Afroz, A. K. M. Mohiuddin, and M. N. A. Hawlader. 2015. Power generation from waste of IC engines. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51:382–395.
- Rakha, H., and Y. Ding. 2002. Impact of Stops on Vehicle Fuel Consumption and

Emissions. *J. Transp. Eng.* 129:23–32.

- Saifuddin, N., a. Z. Raziah, and H. N. Farah. 2009. Production of Biodiesel from High Acid Value Waste Cooking Oil Using an Optimized Lipase Enzyme/Acid-Catalyzed Hybrid Process. *E-Journal Chem.* 6:S485–S495.
- Seifi, M. R., S. R. Hassan-Beygi, B. Ghobadian, U. Desideri, and M. Antonelli. 2016. Experimental investigation of a diesel engine power, torque and noise emission using water-diesel emulsions. *Fuel.* 166:392–399.
- Suslick, K. S., Y. Didenko, M. M. Fang, T. Hyeon, K. J. Kolbeck, W. B. McNamara, M. M. Mdleleni, and M. Wong. 1999. Acoustic cavitation and its chemical consequences. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 357:335–353.
- Tacias Pascacio, V. G., A. Rosales Quintero, and B. Torrestiana Sánchez. 2016. Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: Un caso de estudio. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 32:303–313.
- Valente, O. S., V. M. D. Pasa, C. R. P. Belchior, and J. R. Sodr . 2011. Physical-chemical properties of waste cooking oil biodiesel and castor oil biodiesel blends. *Fuel.* 90:1700–1702.
- Varatharajan, K., and D. S. Pushparani. 2018. Screening of antioxidant additives for biodiesel fuels. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82:2017–2028.
- Varun, P. Singh, S. K. Tiwari, R. Singh, and N. Kumar. 2017. Modification in combustion chamber geometry of CI engines for suitability of biodiesel: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79:1016–1033.
- Wang, X., Y. Ge, L. Yu, and X. Feng. 2013. Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine. *Energy.* 59:543–548.
- Westwood, B. M., and V. N. Kabadi. 2003. A novel pycnometer for density measurements of liquids at elevated temperatures. 35:1965–1974.
- Yu, D., L. Tian, H. Wu, S. Wang, Y. Wang, D. Ma, and X. Fang. 2010. Ultrasonic irradiation with vibration for biodiesel production from soybean oil by Novozym 435. *Process Biochem.* 45:519–525.
- Yu, G. W., J. Nie, L. G. Lu, S. P. Wang, Z. G. Li, and M. R. Lee. 2017. Transesterification of soybean oil by using the synergistic microwave-ultrasonic irradiation. *Ultrason. Sonochem.* 39:281–290..
- Zaharin, M. S. M., N. R. Abdullah, G. Najafi, H. Sharudin, and T. Yusaf. 2017. Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79:475–493.

Zhixiong, L., G. Zhiwei, H. Chongqing, and L. Aihua. 2017. On-line indicated torque estimation for internal combustion engines using discrete observer. *Comput. Electr. Eng.* 60:100–115.