



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**LICENCIATURA EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad
Morelia

Biodiésel, ¿una alternativa viable al
diésel?

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T A**

STEPHANIE MICHELLE VILLAFÁN CÁCERES

DIRECTOR DE TESIS: M.C. Alfredo F. Fuentes Gutiérrez

CO- ASESOR: Dr. Víctor Manuel Ruiz García

MORELIA, MICHOACÁN

MARZO,2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE


Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 13** del **Comité Académico de la Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **12 de noviembre del 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Stephanie Michelle Villafán Cáceres** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **311112845**, con el trabajo profesional titulado: "Biodiésel, ¿una alternativa viable al diésel?", bajo la dirección como **tutor** del M. en C. Alfredo Fernando Fuentes Gutiérrez y como co-tutor el Dr. Víctor Manuel Ruiz García.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Omar Raúl Masera Cerutti
Vocal: Dr. Carlos Alberto García Bustamante
Secretario: M. en C. Alfredo Fernando Fuentes Gutiérrez
Suplente 1: Dr. Ricardo Musule Lagunes
Suplente 2: Dr. Emilio Arenas Guerrero

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 23 de noviembre del 2018.


DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

Agradecimientos institucionales

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de ella a lo largo de siete años. Por otorgarme la Beca de Titulación de Egresado de Alto Rendimiento y la Beca de Capacitación en Métodos de Investigación.

A la Escuela Nacional de Estudios Superiores Morelia y a toda la gente que forma parte de esta institución que me abrió las puertas y me hizo sentir como en casa.

A todo el personal de Servicios Escolares por ayudarme durante este trámite, en especial a Agustín y a Alex Rebollar.

Al Grupo CEDVA por su disponibilidad para poder realizar pruebas y por sus conocimientos, en el especial al ingeniero Guillermo Santana Arias.

Al grupo de ecotecnologías por brindarme su apoyo durante la elaboración de este proyecto, en especial a Quique, Juan Carlos y Dante.

Al Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica a través del proyecto SENER CONACYT 2014 246911, también al personal del Laboratorio de Bioenergía y de la Unidad de Ecotecnologías, especialmente a los técnicos académicos M.C. René D. Martínez Bravo y M.C. Alfredo F. Fuentes Gutiérrez por brindar el soporte técnico para el desarrollo de esta experimentación.

A los miembros de mi jurado, los doctores Omar Maserá, Carlos García, Ricardo Musule y Emilio Arenas, gracias por sus consejos y comentarios.

Agradecimientos personales

A mis papás, Bertha y Francisco, por impulsarme a seguir mis sueños sin importar la distancia, pues sin su amor jamás habría logrado esto. ¡Los amo!

A Liz y Karen, por la alegría y apoyo que me han dado toda la vida. Por estar presente en todos los momentos. ¡Las amo!

A mis abuelos, por siempre creer en mí y no dejarme sola nunca. Son parte importante de este logro.

A Carlos, por brindarme su apoyo, consejos y amor durante todo este tiempo.

A los ecochavos, Mitzi, Annie, César y Carla, gracias por todos los momentos tan divertidos que pasamos juntos.

A Karina, Emiliano, JJ, Mauricio, Jandy, Jairo y Javi, por brindarme su amistad a lo largo de la carrera.

A Jakie y Diana, por enseñarme que a pesar de la distancia se puede seguir conservando una amistad tan valiosa como la nuestra.

A Alfredo y Víctor, por su tiempo, sus comentarios y por sus enseñanzas.

A Emilio, por su apoyo durante todo este proceso y por compartirme su conocimiento.

A Juan Carlos, por toda su ayuda durante la realización de este trabajo de investigación.

A Jiminy (†) y a Panchito (†), por todo el amor que me brindaron

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Dependencia de los combustibles fósiles a nivel mundial.....	1
1.2 La transición energética y los compromisos de México en la COP 21	2
1.3 Innovación para la mitigación del cambio climático.....	4
Capítulo 2. Marco teórico	6
2.1 Fundamentos	6
2.1.1 Situación actual del diésel en México	6
2.1.2 Alternativas a los combustibles fósiles.....	7
2.1.3 Características generales del biodiésel	8
2.1.4 Clasificación del biodiésel.....	10
2.1.5 Ventajas del uso de biodiésel	11
2.1.6 Desventajas del uso de biodiésel	11
2.1.7 Funcionamiento de un motor a diésel.....	12
2.1.8 Emisiones de un motor a diésel.....	15
2.2 Antecedentes	17
2.2.1 Estudios de caso de biodiésel en México	17
2.2.2 Estudios sobre el uso de diésel y biodiésel a diferentes proporciones	18
2.2.3 Mezclas de diésel y biodiésel en el mundo.....	20
2.2.4 Estudios sobre biodiésel en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad	22
Capítulo 3. Justificación	23
Capítulo 4. Objetivos y pregunta de investigación	24
Objetivo general.....	24
Objetivos específicos	24
Pregunta de investigación.....	24
Capítulo 5. Metodología	25
5.1 Producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado	25
5.2 Características generales del biodiésel comercial	27
5.3 Elaboración de mezclas diésel y biodiésel con parámetros mínimos de calidad	27

5.4 Análisis de parámetros mínimos de calidad del biodiésel producido en el IIES y de un biodiésel comercial.....	27
5.5 Propiedades fisicoquímicas de diésel de PEMEX	28
5.6 Análisis de emisiones de CO, CO ₂ , NO _x , HC y material particulado (PM _{2.5}) producidas por las distintas mezclas de combustible en un motor a diésel	29
5.6.1 Características del motor a prueba	29
5.6.2 Medición de emisiones	30
5.6.3 Cálculo de emisiones.....	31
5.6.4 ANOVA	32
5.6.5 Diseño de captura de gases	32
5.7 Comparación del funcionamiento del diésel en diferentes proporciones de biodiésel en un motor de combustión interna.....	34
5.8 Escenarios sobre la implementación de biodiésel en el autotransporte de México y Morelia	34
Capítulo 6. Resultados y Discusión.....	35
6.1 Producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado	35
6.2 Análisis de parámetros mínimos de calidad del biodiésel producido en el IIES y de un biodiésel comercial.....	36
6.3 Elaboración de mezclas de diésel y biodiésel con parámetros mínimos de calidad.....	39
6.4 Análisis de emisiones de CO, CO ₂ , NO _x , HC y material particulado (PM _{2.5}) producidas por las distintas mezclas de combustible en un motor a diésel	40
6.5 Comparación del funcionamiento de diésel con diversas mezclas de biodiésel en un motor de combustión interna.....	48
6.6 Escenarios sobre la implementación de biodiésel en el autotransporte de México y Morelia	49
Capítulo 7. Conclusiones.....	53
Recomendaciones.....	55
Bibliografía.....	56
Anexos	62

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Proceso de transesterificación	9
Ilustración 2. Reacción química del proceso de transesterificación.....	10
Ilustración 3. Diferencias entre un motor a diésel y a gasolina.....	12
Ilustración 4. Demostración del PMS y PMI.....	13
Ilustración 5. Árbol de levas de un motor	13
Ilustración 6. Dinámica de un motor a cuatro tiempos.....	14
Ilustración 7. Inyector de un motor	15
Ilustración 8. Gases emitidos por un motor a diésel	16
Ilustración 9. Distintos tipos de aceite de cocina usados.....	26
Ilustración 10. Motor a diésel.....	30
Ilustración 11. Puertos de muestreo del FGA y VelociCalc	33
Ilustración 12. Medición de PM con dilución.....	33
Ilustración 13. Biodiésel obtenido de la planta piloto	35
Ilustración 14. Mezclas de combustibles D100, B5, B10, B20 y B100.....	39

Índice de Tablas

Tabla 1. Metas propuestas por México para la mitigación y adaptación al Cambio Climático durante el 2020-2030.....	3
Tabla 2. Porcentaje de biodiésel en las mezclas establecidas en distintos países...	21
Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de Diésel de PEMEX	28
Tabla 4. Características generales del motor diésel utilizado	29
Tabla 5. Parámetros mínimos de calidad para el biodiésel producido en el IIES	36
Tabla 6. Parámetros mínimos de calidad para el biodiésel comercial	38
Tabla 7. Parámetros de calidad para mezclas B5, B10 y B20 del biodiésel del IIES	39
Tabla 8. Tasa de emisión por minuto por cada mezcla.....	40
Tabla 9. Consumo de combustible por cada mezcla	48
Tabla 10. Energía consumida de diésel en México anualmente por autotransporte comparándola con un PRACU para biodiésel del 10% y 30%	49
Tabla 11. Energía consumida de diésel en Morelia por autotransporte anualmente	51

Índice de Gráficos

Gráfico 1. ANOVA del gas CO ₂	41
Gráfico 2. ANOVA del gas CO	41
Gráfico 3. ANOVA del gas HC.....	42
Gráfico 4. ANOVA del gas NO _x	42
Gráfico 5. ANOVA del material particulado 2.5	43
Gráfico 6. Tasa de emisión por minuto de NO _x , PM _{2.5} e HC	43
Gráfico 7. Tasa de emisión por minuto de CO ₂ y CO	44
Gráfico 8. Mitigación de diferentes mezclas de biocombustibles	45
Gráfico 9. Emisiones provenientes de dos tipos de biodiésel.....	45
Gráfico 10. Emisiones de CO ₂ y CO provenientes de dos tipos de biodiésel	46
Gráfico 11. Escenarios sobre consumo de diésel y biodiésel a partir de aceite de cocina usado en México	50
Gráfico 12. Escenario sobre consumo de diésel y biodiésel a partir de aceite de cocina usado en Morelia	52

Nomenclatura

B5	Diésel 95% y 5% biodiésel
B10	Diésel 90% y 10% biodiésel
B20	Diésel 80% y 20% biodiésel
B100	Biodiésel al cien porciento
CH₄	Metano
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
COP	Conferencia de las Partes
D100	Diésel al cien porciento
DOF	Diario Oficial de la Federación
FGA	Analizador de Flujo de Gases
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HC	Hidrocarburos
IER	Instituto de Energías Renovables (UNAM)
INDC's	Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
LINEB	Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa
N₂O	Óxido nitroso
NO	Monóxido de nitrógeno
NO_x	Óxidos de nitrógeno
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PM	Material Particulado
PMI	Peso Muerto Inferior
PMS	Peso Muerto Superior

PPM	Partes por millón
PRACU	Potencial de Recuperación de Aceites de Cocina Usados
REMBIO	Red Mexicana de Bioenergía
RPM	Revoluciones por minuto
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SO₂	Dióxido de azufre

Resumen

En los últimos 30 años el consumo de combustibles fósiles a nivel mundial se ha duplicado, por lo que estas fuentes proveen un 95% de la energía usada para el transporte. En México, durante los últimos 10 años hubo un aumento del 40% en relación al uso de diésel. Debido a este consumo, grandes cantidades de contaminantes son emitidas a la atmósfera generando problemáticas relacionadas a la salud humana, calidad del aire, cambio climático y otras. Por estas razones, es necesario desarrollar alternativas como los biocombustibles líquidos.

Dentro de los biocombustibles líquidos se encuentra el biodiésel, el cual se define como una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos que pueden sustituir al diésel y se consigue con la reacción de aceites vegetales o grasa con metanol, obteniendo como subproducto la glicerina.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el desempeño y las emisiones de un motor a diésel con distintas mezclas de biodiésel. Se produjo el biodiésel a partir de aceite de cocina usado en la planta piloto del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). El biodiésel producido fue sometido a pruebas de calidad comparándolo con un biodiésel comercial. Se elaboraron mezclas B5, B10 y B20 para ambos tipos de biodiésel y se les realizaron pruebas de emisiones, así como al diésel (D100) y biodiésel (B100). Se midió CO, CO₂, NO_x, HC y PM_{2.5} con un analizador de flujo de gases, un ciclón y un portador de filtro. Además, al finalizar de cada prueba se midió la cantidad de combustible consumido.

Por último, utilizando el Potencial de Recuperación de Aceites de Cocina Usado (PRACU) se desarrollaron dos posibles escenarios para la producción de biodiésel en México y Morelia.

Se realizaron siete pruebas de calidad para el biodiésel producido en el IIES, obteniendo densidad, viscosidad, poder calorífico, contenido de jabón, índice de yodo, *cloud point* y acidez del biodiésel. Este biodiésel cumplió con los límites establecidos en las normas de densidad, viscosidad y acidez del biodiésel. Por otro lado, el biodiésel comercial cumplió con los parámetros de calidad de densidad y residuo de carbón. Se

obtuvo la densidad, la viscosidad y el poder calorífico para las mezclas B5, B10 y B20, las cuales sí cumplieron con los límites establecidos en las ASTM y en la Norma Europea 14111.

Para analizar las emisiones de CO, CO₂, NO_x, HC y PM_{2.5} se obtuvo una tasa de emisión por minuto. Las emisiones de NO_x fueron disminuyendo conforme aumentaba la presencia de biodiésel en la mezcla, mientras que, los otros gases aumentaron.

En el tema del consumo de combustible, se encontró que entre mayor fuera la proporción de biodiésel en la mezcla, se incrementaba el consumo de combustible; esto se relacionó con el poder calorífico correspondiente a cada mezcla.

Para los escenarios de producción de biodiésel en México y Morelia se calculó la energía consumida al año de diésel por el sector autotransporte respectivamente. En ambos casos, se plantearon dos escenarios: el primero se basó en recuperar el 10% del aceite de cocina usado en México para la producción de biodiésel y el segundo escenario fue del 30%.

Con el primer escenario solo se podría abastecer el 0.8% de la demanda actual de diésel en el país, mientras que el escenario del 30% puede satisfacer un 2.3%. Con el PRACU nacional del 10% se podría satisfacer un 53% la demanda actual de diésel en la ciudad de Morelia y con el escenario del 30% se satisface la demanda total de diésel en dicha ciudad e inclusive se genera un excedente.

Se concluye que el potencial para la producción de biodiésel en México a partir de aceite de cocina usado es interesante pero limitado; sus aplicaciones deben ser concretas, por ejemplo, para apoyar el transporte de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia. También es importante garantizar la calidad del combustible pues de ésta dependen las emisiones obtenidas. En este estudio se encontró que la mezcla óptima para utilizarse fue la B10, pues es una de las mezclas con menos emisiones y no presentó un gran aumento en el consumo de combustible.

Abstract

During the last 30 years the fossil fuels' consumption has doubled around the world, because these energy sources provide 95% of the energy used for transportation. In Mexico, the last 10 years this has increased 40% compared to the use of diesel. Due to this consumption, large amounts of pollutants are sent to the atmosphere generating problems in human health, air quality, and climate change, among others. Therefore, it is necessary developing alternatives like liquid biofuels.

Among liquid biofuels is biodiesel, which is defined like a mixture of methyl esters of fatty acids that can replace diesel; this is gotten with the reaction of vegetable oils or fat with methanol, obtaining glycerine as a byproduct.

The objective of this research is to evaluate performance and emissions of a diesel engine with different biodiesel blends. Biodiesel was produced from used cooking oil in the pilot plant of the Ecosystems and Sustainability Research Institute (IIES). It was done quality tests comparing with commercial diesel. Mixtures B5, B10 y B20 were made for both kind of biodiesel. The emission's tests were performed for both; the established mixtures were used, as well as diesel (D100) and biodiesel (B100). CO, CO₂, NO_x, HC and PM 2.5 were measured with a gas flow analyzer, a cyclone and a filter carrier. Also, at the end of each test, it was measured the quantity of consumed fuel.

Finally, using the Potential for Recovery of Used Cooking Oils (PRACU), two possible scenarios were developed for the production of biodiesel in Mexico and Morelia.

Seven quality tests were made for the biodiesel produced in IIES, getting density, viscosity, calorific value, soap content, iodine value, cloud point and biodiesel acidity. It complied with the limits established in the density, viscosity and acidity of biodiesel standards. On the other hand, commercial biodiesel complied with the parameters of density quality and carbon residue. The density, the viscosity and the calorific value were obtained for the B5, B10 and B20 mixtures, which did comply with the limits established in the ASTM and in the European Standard 14111.

In order to analyze the emissions of CO, CO₂, NO_x, HC y PM it was obtained an emission rate per minute. The Nox emissions were decreasing as the presence of biodiesel in the mixture increased, while the other gases increased.

On the other hand, it was also analyzed the fuel's consumption during each test, verifying that, the more biodiesel there was in the mixture, the greater the fuel consumption; this was related to the calorific value corresponding to each mixture.

For the production of biodiesel in Mexico and Morelia, the energy consumed per year of diesel was calculated by the motor transport sector, respectively. In both cases, two scenarios were proposed: the first was based on recovering 10% of the cooking oil used in Mexico for the production of biodiesel and the second scenario was 30%.

In the first case, only 0.8% of the current diesel demand in the country could be supplied, while the 30% scenario could satisfy 2.3%. With the national PRACU of 10%, the current demand for diesel in the city of Morelia could be met by 53%, and with the 30% scenario, the total diesel demand in that city is met and a surplus is left over.

The conclusion is that the potential for the production of biodiesel in Mexico from used cooking oil is interesting but limited; its applications must be concrete, for example, to support the transportation of the National School of Higher Studies, Morelia. It is also important to guarantee the quality of the fuel since the emissions obtained depend on it. In this study it was found that the optimal mixture to be used was B10, as it is one of the mixtures with fewer emissions and did not show a large increase in fuel consumption.

Capítulo 1. Introducción

El primer capítulo se centra principalmente en la dependencia que se tiene a nivel mundial del uso de los combustibles fósiles. Además, se analizan las alternativas que está desarrollando México para lograr la transición energética hacia las fuentes renovables y cumplir con sus compromisos ante la Conferencia de las Partes (COP, por sus siglas en inglés). Por último, se exponen innovaciones que se han impulsado en el país para lograr la mitigación del cambio climático.

1.1 Dependencia de los combustibles fósiles a nivel mundial

La principal fuente de energía a nivel mundial proviene de los combustibles fósiles, ya que nuestro sistema económico actual se basa en un 80% en estas fuentes fósiles (Ferrari, 2013). Este consumo desmedido ha provocado que la producción mundial de petróleo llegue a su *peak oil* (Ferrari, 2013).

López (2008) define al *peak oil* como “el nivel máximo en la curva de producción de petróleo”. Por otro lado, Ferrari (2013) menciona que el *peak oil* “no significa el agotamiento del recurso, pero sí significa haber consumido el recurso de mayor calidad, de fácil extracción y más barato”.

A pesar de que en algunos países se siguen descubriendo nuevos campos de extracción, muchos de éstos ya han llegado a su pico de producción. De acuerdo con Ferrari (2007) 55 países de los 65 productores principales de petróleo han alcanzado el punto máximo de producción y sus tasas de producción van en declive. Dentro de estos países se encuentra Estados Unidos, Venezuela, Inglaterra, Noruega, China, Dinamarca y México.

En México el pico máximo de producción de petróleo fue en el 2004, a pesar de que el país contaba con una de las mayores reservas de petróleo en el mundo (Fuentes, s.f.). En el estado de Campeche se encontraba el segundo yacimiento más grande del mundo conocido como Cantarell descubierto en 1979. Este yacimiento llegó

a representar el 63% de la producción nacional, debido a la sobreexplotación de éste en los años 90 la producción comenzó a disminuir. Actualmente, Cantarell representa el 15% de la producción a nivel nacional, aunque existen otros yacimientos que han ayudado a compensar este declive en la producción (Fuentes, s.f.).

1.2 La transición energética y los compromisos de México en la COP 21

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) formada por 197 partes, surge en la Cumbre de la Tierra de 1992. Esta convención busca generar acciones en pro del planeta (UN, s.f).

Las Conferencias de las Partes (COP por sus siglas en inglés) son reuniones en donde los países miembros de la CMNUCC establecen los compromisos que realizará cada nación para hacer frente al cambio climático y fomentar acciones a favor del medio ambiente con el fin de lograr la sostenibilidad. Uno de los objetivos es evitar que la temperatura global del planeta aumente más de 2°C, para lograr esto se deben de planear estrategias encaminadas a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, los países dentro de esta conferencia se comprometieron a publicar sus inventarios de emisiones (IMCO, 2016).

México, que es uno de los países que participa en la CMNUCC emite 665,305 Gg de CO₂e. De acuerdo con el INECC (2015), las emisiones de México representan el 1.4% de las emisiones de GEI, colocándolo en el 12° país emisor a nivel global.

Para hacer frente a la problemática, se han desarrollado Contribuciones Intencionales Determinadas a nivel Nacional INDC's (por sus siglas en inglés) que son planes de acción climática en donde los países establecen las emisiones que reducirán y cómo lograrán esto (IMCO, 2016).

En sus INDC's, México se basó en cuatro sectores y dentro de cada sector propuso distintas medidas de mitigación. En la Tabla 1 se pueden observar estos compromisos.

Tabla 1. Metas propuestas por México para la mitigación y adaptación al Cambio Climático durante el 2020-2030

Compromisos de México en la COP 21	
Sector energético e industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Generar el 35% de energía eléctrica a partir de energías limpias para el 2024 • Sustituir en la industria nacional los combustibles pesados por gas natural, energías limpias y biomasa • Reducir un 25% las fugas y quemas de metano • Controlar las partículas negras de hollín en equipos e instalaciones industriales
Sector transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Abastecer de gasolinas y diésel de ultra bajo azufre • Incrementar la flota vehicular a gas natural y disponer de combustibles limpios • Modernizar el parque vehicular y reducir la importación de automóviles usados • Impulsar el Transporte Multimodal de carga y pasajeros

<p style="text-align: center;">Sector urbano</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Impulsar la construcción de edificaciones y la transformación hacia ciudades sustentables basadas en eficiencia energética • Promover el uso doméstico de calentadores y celdas solares • Recuperar el metano de los rellenos municipales y las plantas de tratamiento de aguas residuales
<p style="text-align: center;">Sector forestal y agropecuario</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para el 2030 tener una tasa cero de deforestación • Mejorar el manejo forestal • Impulsar la tecnificación sustentable del campo • Promover biodigestores en granjas agropecuarias • Recuperar pastizales

Nota: Información tomada de SEMARNAT (2015)

1.3 Innovación para la mitigación del cambio climático

Para hacer frente a la problemática del cambio climático se han desarrollado alternativas de mitigación. Dentro de estas estrategias de mitigación en el sector transporte se encuentra el sistema de transporte colectivo, la verificación vehicular, la promoción de uso de vehículos de bajas emisiones y la producción de biocombustibles (Melero et al, 2013).

Para lograr el desarrollo de estas alternativas de mitigación ha sido necesario impulsar la investigación. Para la producción de biocombustibles como el biodiésel, se ha desarrollado el Clúster Biodiésel Avanzado, el cual se define como un Consorcio de Investigación y Desarrollo Tecnológico que busca desarrollar, validar y transferir tecnologías limpias, sustentables y novedosas (CONACYT, 2017). Además, pretende ser un referente en investigación, desarrollo, transferencia tecnológica de Biodiésel Avanzado en México con el fin de incrementar la competitividad y productividad de los sectores público, privado y académico y que los mexicanos tengan acceso a los biocombustibles (CONACYT, 2017). Lo anterior se relaciona con una de las metas establecidas por México ante la COP 21 (Ver Tabla 1), debido a que el biodiésel se considera una alternativa para la reducción de emisiones nocivas provenientes de motores a diésel al minimizar los daños en el ambiente y en la salud (Llanes et al, 2017).

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Fundamentos

En este capítulo se exponen los principales sectores que utilizan combustibles fósiles en México, particularizando en el diésel. Además, se mencionan alternativas a los combustibles fósiles como son los biocombustibles. Se exponen los diferentes tipos de biocombustibles, haciendo énfasis en el biodiésel con el fin de comprender sus aspectos generales, ventajas y desventajas de su uso y, por último, el panorama a nivel mundial y nacional sobre este biocombustible.

Por otro lado, se explica el funcionamiento básico de un motor a diésel, así como algunas características generales sobre la mecánica de estos motores. También se exponen las emisiones provenientes de la quema de combustible diésel.

2.1.1 Situación actual del diésel en México

Durante los últimos 30 años el consumo de combustibles fósiles a nivel mundial se ha duplicado, pues las fuentes fósiles proveen en un 95% la energía usada para el transporte en el mundo (Ferrari, 2013).

En México el panorama es similar, pues de acuerdo con el Balance Nacional de Energía durante el periodo del 2005 al 2015 el uso de diésel aumentó un 40%. El consumo de este combustible varía con relación al sector en donde se esté empleando, dentro del sector agropecuario el diésel representa un 74.4%; en el sector industrial un 3.1%; mientras que para el sector transporte un 26.1% y dentro del sector residencial no se utiliza diésel (SENER, 2017).

Dentro del sector transporte existen subsectores, como son autotransporte, marítimo y ferroviario. En el subsector autotransporte, el diésel es utilizado en un 27.4%. Para los subsectores marítimos y ferroviarios el diésel es el combustible más utilizado en un 97.1% y un 99.4% respectivamente. Pese a que el porcentaje del consumo de diésel en los subsectores marítimos y ferroviarios es alto este sólo

representa el 5.3% y el 4.7% respectivamente del consumo total de diésel, pues en México el transporte marítimo y ferroviario no es muy utilizado (SENER, 2015).

Debido a este consumo, grandes cantidades de contaminantes son emitidas a la atmósfera generando problemáticas relacionadas con la salud humana, la calidad del aire, afectaciones a los océanos, etc.

2.1.2 Alternativas a los combustibles fósiles

De acuerdo con el IPCC (2014) la quema de combustibles fósiles genera altas emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), provocando lluvias ácidas y cambios en la temperatura. Lo anterior, acelera el fenómeno de cambio climático y al acelerar este proceso existen impactos en la biodiversidad pues la pérdida de especies irá en aumento, además las sequías serán más frecuentes y las inundaciones serán más intensas. Pese a esto, se ha necesitado desarrollar nuevas alternativas hacia los combustibles provenientes de una fuente fósil, dentro de estas alternativas se encuentran los biocombustibles.

Álvarez (2009) define a los biocombustibles como los recursos energéticos provenientes de la materia orgánica que al someterlos a la combustión liberan su energía. Estos se dividen en tres tipos: sólidos, líquidos y gaseosos. Los sólidos se pueden quemar directamente o someterlos al proceso de pirólisis, por ejemplo, la leña, los pellets, las briquetas, el desperdicio forestal, entre otros. Por otro lado, los biocombustibles líquidos son sometidos a procesos químicos y dentro de este grupo se encuentra el biodiésel, el bioetanol y la bioturbosina. Dentro de los biocombustibles gaseosos, se encuentra el biogás el cual se obtiene principalmente de residuos orgánicos y de estiércol (García y Masera, 2016).

Por su parte, la REMBIO (s.f.) define:

Los biocombustibles líquidos como aceites, alcoholes y otros compuestos químicos producidos a partir de materia orgánica tal como, plantas herbáceas,

oleaginosas y leñosas, residuos de la agricultura y actividad forestal, como también de gran cantidad de desechos biológicos industriales como los desperdicios y los subproductos de la industria alimenticia.

2.1.3 Características generales del biodiésel

Medina et al (2012) definen al biodiésel como un biocombustible líquido, renovable que posee propiedades similares a las del diésel derivado del petróleo y las materias primas que se utilizan para su producción son básicamente grasas animales y aceites vegetales comestibles y no comestibles; nuevos o usados.

Por su parte, la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO) (s.f.) define que “el biodiésel es una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos que pueden sustituir al diésel y se obtiene de la reacción de aceites vegetales o grasas con metanol, obteniendo como subproducto glicerina”.

Otra definición sobre biodiésel es la que menciona Kahraman (2005) donde señala que “el biodiésel se compone por cadenas de metil ésteres y por cadenas de ácidos grasos”. Para la producción de este biocombustible existen diversas materias primas como las plantas oleaginosas, los aceites comestibles usados y las grasas animales.

La producción de biodiésel se basa en distintos procesos químicos como: medición de acidez, esterificación y transesterificación. A continuación, se explican cada uno de estos procesos.

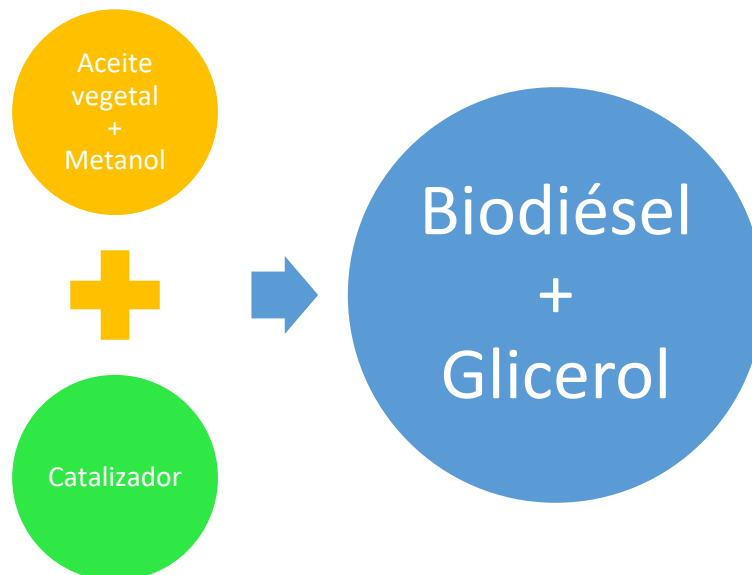
- a. Medición de acidez, es importante determinar el nivel de acidez del aceite vegetal usado. Torossi (2006) considera que el aceite al ser sometido a diferentes temperaturas y al estar en contacto con diversos alimentos provoca que se mezcle con el agua. Por lo tanto, es de suma importancia conocer la acidez del aceite para establecer la cantidad de catalizador que se utilizará y así evitar la saponificación o bien, la formación de jabones.

Para conocer este nivel, la Norma Mexicana para evaluación de biodiésel propone utilizar una “titulación con hidróxido de sodio (0.1N) y 5 gotas de

fenolftaleína” (DOF, 2012). Morales (2015) menciona que para la determinación de este índice es necesario aplicar una fórmula con el fin de obtener el gasto de la solución y así determinar el nivel de acidez. Ya que, “si el nivel es mayor o igual al 2.5 % se tendrá que realizar el proceso de esterificación. Por lo tanto, si el nivel es menor al 2.5% se realizará el proceso de transesterificación”.

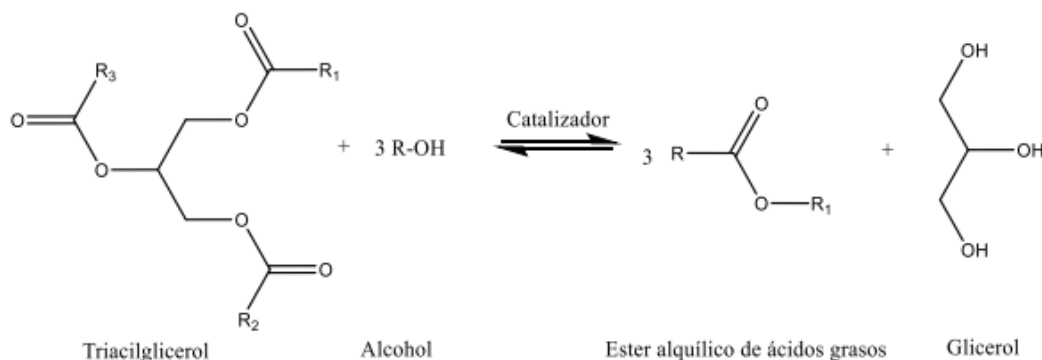
- b. Esterificación, el objetivo de realizar este proceso es “retirar los ácidos grasos libres para dejar al aceite base con una concentración inferior al 1%”. Este proceso consiste principalmente en “separar los ácidos grasos, esto se logra colocando un catalizador ácido (ácido sulfúrico) y metanol a la grasa con el fin de obtener un aceite bajo en ácidos grasos libres” (Castellanos y Guevara, 2014).
- c. Transesterificación, en las Ilustraciones 1 y 2 se puede observar este proceso, el cual se basa en mezclar un alcohol - como el metanol- y un triglicérido, como el aceite de cocina usado. Para acelerar la reacción se necesita emplear un catalizador, como lo es el hidróxido de sodio. Las principales materias primas que se obtienen al finalizar estos procesos son biodiésel y glicerol.

Ilustración 1. Proceso de transesterificación



(Elaboración propia, 2017)

Ilustración 2. Reacción química del proceso de transesterificación



(Imagen tomada de García, 2018).

2.1.4 Clasificación del biodiésel

La clasificación de biodiésel se basa con relación “a la materia prima o insumo utilizado y la tecnología aplicada, agrupándolos como: primera, segunda y tercera generación” (Álvarez, 2009).

Cavieres (s.f.) señala que la primera generación utiliza principalmente insumos agrícolas con un alto contenido en aceite o grasas animales. “La tecnología utilizada se basa en la conversión termoquímica, que consiste en retirar la glicerina de estos productos”.

Por otro lado, el biodiésel de segunda generación se produce con residuos agroindustriales y plantas herbáceas. La principal diferencia de un biodiésel de segunda generación es que éste utiliza materias primas que no son cultivadas en terrenos agrícolas con fines alimenticios (SIC,2011).

Por último, la última generación está compuesta por biocombustibles avanzados debido a las materias primas y la innovación en los procesos tecnológicos utilizados para su producción. Una materia prima que se utiliza en los biocombustibles de tercera generación, son las microalgas (González y Kafarov, 2009).

Por lo anterior, podríamos considerar que el biodiésel a base de aceite de cocina usado es de segunda generación pues utiliza como materia prima un residuo.

2.1.5 Ventajas del uso de biodiésel

En el siguiente apartado se exponen las ventajas que trae consigo el empleo de biodiésel en los motores.

- a. Es un combustible biodegradable.
- b. “Durante el proceso de combustión del biodiésel se reduce un 60% las emisiones de dióxido de carbono” (Ramírez, 2014).
- c. Cuando el biodiésel utiliza como materia prima un residuo, promueve un manejo óptimo de éstos.
- d. “Permite una mayor lubricidad al motor, y así reduce el ruido que éste provoca” (Ramírez, 2014).
- e. Punto de inflamación mayor al diésel, lo que lo vuelve un combustible menos peligroso.
- f. “Mayor poder disolvente, provocando que los inyectores se encuentren más limpios” (Castellanos y Guevara,2014).

2.1.6 Desventajas del uso de biodiésel

A continuación, se enlistan las desventajas que puede generar el uso de biodiésel.

- a) “Al existir un incremento de presión en la cámara de combustión los óxidos de nitrógeno aumentan” (Méndez, 2014).
- b) “La potencia disminuye un 5.5% en relación al diésel” (Fajardo, 2005).
- c) Aumenta el consumo del biocombustible debido a su poder calorífico (Ramírez, 2014).
- d) “El tiempo de almacenaje del biodiésel es de 21 días, posteriormente comienza un proceso de degradación” (Ramírez, 2014).
- e) “Si se utiliza una mezcla mayor a B30 provocará una solidificación en el sistema de alimentación, esto en lugares fríos” (Méndez, 2014).
- f) “Aumento en las emisiones de aldehídos, estos contribuyen a la formación de smog fotoquímico” (Castellanos y Guevara, 2014).

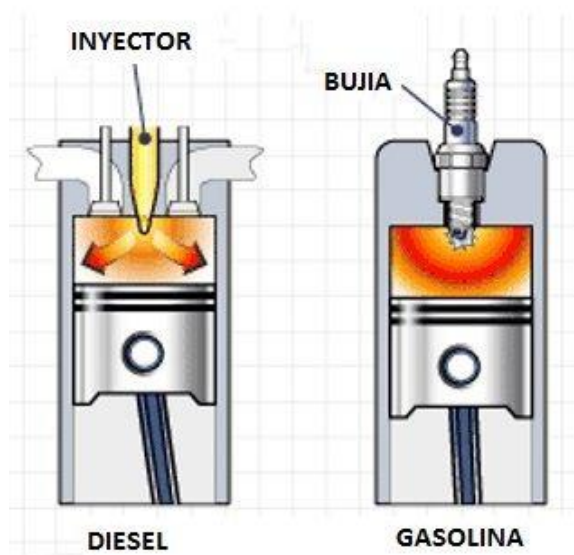
- g) “El poder calorífico del biodiésel a base de aceite residual es de 38.93 kJ, mientras que el de diésel es de 43.85 kJ, esto es debido a las cadenas de carbono” (Torres et al, 2015).

2.1.7 Funcionamiento de un motor a diésel

Álvarez (2006) define los motores a diésel como motores de combustión interna, los cuales se basan en el principio de la transformación de la energía química a energía mecánica dentro de la cámara de combustión.

Para llevar a cabo esta transformación es necesario que “la temperatura del aire y del combustible sea mayor al punto de inflamación, con el fin de producir calor desde la compresión. Por lo que, la compresión aumenta momentáneamente la temperatura para dar paso a la combustión. Para lograr esto es necesario contar con una bomba de inyección e inyectores” (Álvarez, 2006). En la Ilustración 3 se pueden observar las diferencias que hay entre un motor a gasolina, en donde se utiliza bujía y en el motor a diésel se observa un inyector.

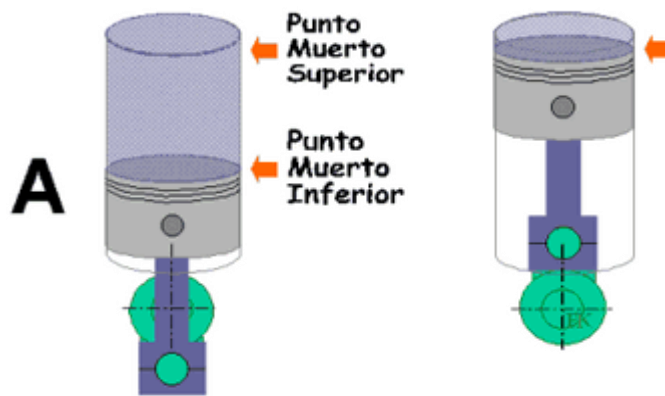
Ilustración 3. Diferencias entre un motor a diésel y a gasolina



(Imagen tomada de Toyocosta,2014)

El funcionamiento de un motor a diésel está determinado por distintos parámetros. Uno de estos parámetros es entender la carrera del pistón, pues así se puede identificar la posición en la que se encuentra éste dentro del cilindro. Existen dos posiciones PMI (Punto Muerto Inferior) y PMS (Punto Muerto Superior), en la Ilustración 4 se puede apreciar este funcionamiento. Se le denomina carrera del pistón a la distancia que hay entre estos puntos.

Ilustración 4. Demostración del PMS y PMI



(Imagen tomada de CATEDU, s.f.)

Un factor que determina en qué punto se encuentra el pistón es el árbol de levas, pues éste por las diferentes formas que tienen las levas determina el punto de apertura del cilindro (Ver Ilustración 5).

Ilustración 5. Árbol de levas de un motor

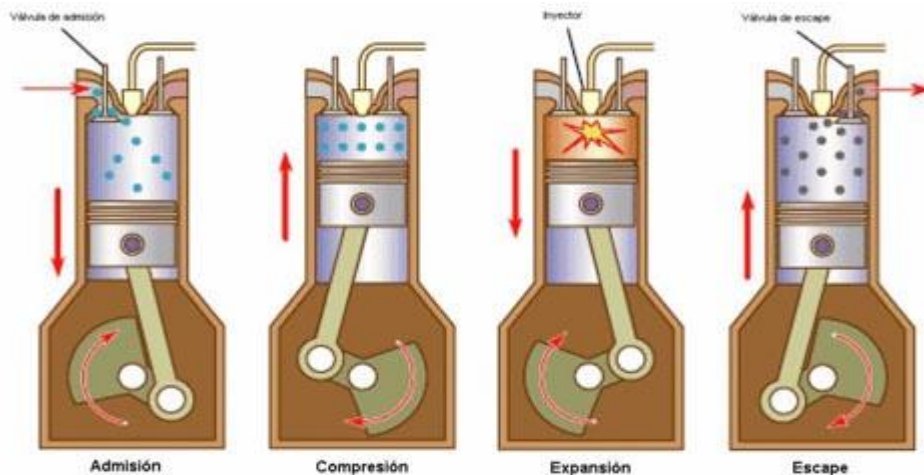


(Imagen tomada de Rosas, 2010)

Por el movimiento del árbol de levas, los motores a diésel de cuatro tiempos constan de cuatro fases, en la Ilustración 6 se puede observar este mecanismo. A continuación, se explican cada una de estas fases:

- a. Admisión, dentro de esta primera fase se introduce el aire al cilindro y el movimiento es descendente (PMS a PMI).
- b. Compresión, como su nombre lo indica en esta fase se comprime el aire, la temperatura aumenta en promedio 600°C y el movimiento que se genera es ascendente (PMI a PMS).
- c. Expansión o fuerza, esta fase es la más productiva del sistema pues se inyecta el combustible y se quema a alta presión. El movimiento que se genera es descendente (PMS a PMI).
- d. Escape, esta última fase tiene un movimiento ascendente (PMI a PMS) y los gases quemados son expulsados.

Ilustración 6. Dinámica de un motor a cuatro tiempos



(Imagen tomada de Lafayette, 2012)

Esta dinámica del motor determina el orden de encendido con el que empezará a operar el motor, pues variará en relación al número de cilindros con los que cuente y, de igual forma influye el tipo de motor que se utilice.

Por otro lado, el sistema de inyección de un motor a diésel puede ser de dos tipos: mecánicamente o electrónicamente y estos inyectores varían según la marca del motor. La función principal de éste es dosificar el combustible dentro del cilindro, como se puede ver en la Ilustración 7, el inyector en la punta cuenta con una aguja la cual es la encargada de rociar el combustible.

Ilustración 7. Inyector de un motor



(Imagen tomada de Toyocosta,2014)

2.1.8 Emisiones de un motor a diésel

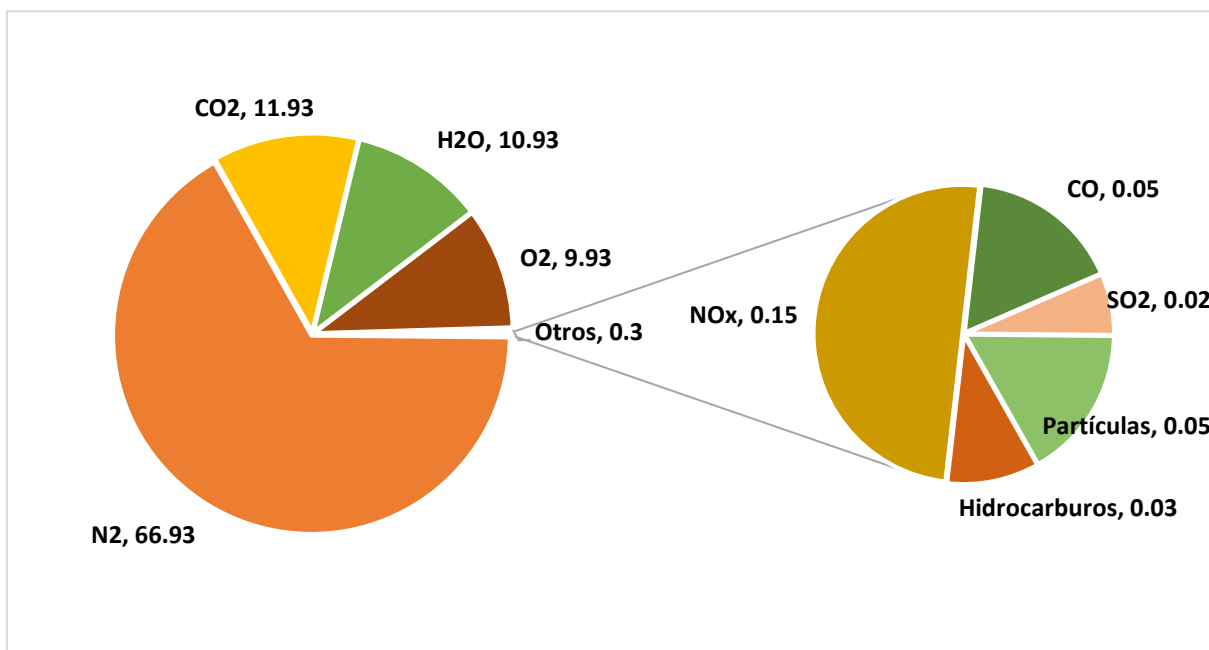
En México el sector transporte es la principal fuente de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). De acuerdo con el Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, el sector transporte en el 2015 contribuyó en un 25% a las emisiones totales a nivel nacional (INECC, 2015).

Las emisiones totales contabilizaron motores a gasolina y a diésel. Por lo tanto, el autotransporte a diésel representó el 36.9% de las emisiones totales. Dentro de estas emisiones se analizaron los siguientes gases: CO₂, CH₄, N₂O y HC (INECC, 2015).

A pesar de que el tema de emisiones en la atmósfera es cada día más estudiado, es poca la información acerca de las emisiones de motores a diésel. De

acuerdo con Rodrigo (2009) los principales gases que emite un motor a diésel dependen del tipo del motor y de la calidad del combustible. Algunos autores señalan que los gases emitidos por un motor a diésel principalmente son N_2 , CO_2 , H_2O , O_2 , entre otros (ver Ilustración 8). Cabe señalar que, el N_2 emitido proviene del aire que se introduce para el proceso de compresión (Augeri, 2011).

Ilustración 8. Gases emitidos por un motor a diésel



(Imagen modificada de Graña, 2015).

De acuerdo con SEMANART (2013) en el estado Michoacán México, 11% de las emisiones de $PM_{2.5}$ provienen del uso de combustibles fósiles en vehículos automotores.

2.2 Antecedentes

Dentro de este apartado se exponen algunos estudios de caso relacionados con proyectos de biodiésel en México. De igual forma, se muestran estudios sobre las mezclas utilizadas en motores que emplean biodiésel y diésel a diferentes proporciones y, por último, se exponen las mezclas de biocombustible utilizadas en el mundo.

2.2.1 Estudios de caso de biodiésel en México

En México, el mercado de biodiésel aún se encuentra en desarrollo pues en el país existen más de 40 plantas de producción (Sandoval, s.f.). A pesar de que el número de plantas de producción ha ido incrementando algunas empresas de biodiésel no han tenido el éxito esperado. A continuación, se exponen algunos casos.

Masera et al. (2011) analizaron el proyecto de la empresa Biocombustibles Internacionales de Nuevo León. Esta planta estaba destinada a la producción de biodiésel, utilizando como materia prima grasas animales y aceite de cocina usado. Esta empresa vendía el biocombustible a PEMEX, pero Petróleos Mexicanos decidió dejar de comprar el combustible provocando así el cierre de la planta.

De acuerdo con Prehn y Cumana (2010) otro caso el cual también fracasó, ocurrió en el estado de Chiapas en donde se impulsó un programa para la producción de biodiésel. El proyecto se dividía en 3 frases: (1) El cultivo de las plantas oleaginosas fue en conjunto con campesinos de la zona, los cuales participaron en la creación de una Sociedad Bioenergética; (2) Las plantas de extracción del aceite se ubicaron en dos sitios, una en Tuxtla y otra en Puerto Chiapas; (3) El biodiésel producido estaba destinado para que operan 113 unidades del transporte público, en donde se utilizó este biocombustible como un aditivo y sólo un camión utilizó un B100. Este programa fracasó porque no hubo apoyo técnico y talleres de capacitación para los campesinos de la zona sobre la manera de producir y mantener a la planta, lo anterior provocó una escasez de la materia prima. Además, muchas familias campesinas destinaron sus

tierras para estos cultivos generando así una escasez de alimento en la zona. Otro factor que afectó fue que los usuarios del transporte público no adoptaron la nueva modalidad de pago, pues para poder hacer uso del servicio se tenía que contar con una tarjeta y la unidad sólo tenía permitido hacer paradas en los lugares establecidos. Esto derivó en que las personas prefirieran seguir tomando las rutas de transporte con las que estaban familiarizadas.

Los casos expuestos anteriormente muestran la falta de políticas públicas especializadas en el tópico a nivel nacional, pues no existe un marco legal en donde se promueva el uso de biocombustibles en el país. Por otro lado, es de suma importancia tomar en cuenta a los usuarios de este biocombustible pues ellos determinarán el éxito que tenga el proyecto y también se debe de promover un diálogo constante entre todos los actores que conformen el proyecto.

2.2.2 Estudios sobre el uso de diésel y biodiésel a diferentes proporciones

Las mezclas de biodiésel y diésel se han comenzado a estudiar en los últimos años. Dentro de este apartado se exponen algunos estudios sobre este tema. Presentados de acuerdo al lugar en donde se desarrolló dicho experimento.

a) Colombia

- Ramírez (2012) en la Universidad Autónoma de Occidente realizó un estudio con mezclas de diésel y biodiésel en un D100, B20, B50, B70 y B100. Se analizaron gases como CO, CO₂, NO_x y SO₂, también se analizaron aspectos mecánicos como la temperatura del agua en el radiador, velocidad del motor y consumo de combustible; estas pruebas fueron realizadas a tres velocidades distintas. Los resultados obtenidos muestran que existe un aumento en las emisiones de NO y NO_x, pero hay una disminución en las emisiones de SO₂.
- Cuellar y Augusto (2007) llevaron a cabo un experimento en donde se analizaron diferentes mezclas de diésel y biodiésel en proporciones de

B2, B5, B10, B20 y B30. Estas pruebas fueron realizadas en motores distintos y en diferentes altitudes. Dentro de los resultados obtenidos encontraron que el biodiésel proveniente de aceite de palma mejora las propiedades del diésel. Además, al utilizar biodiésel existe una disminución significativa en las emisiones de material particulado. Por lo tanto, estos autores concluyen en que a medida en que se aumenta el uso de biodiésel existe una disminución en las emisiones.

- Agudelo et al. (2005) realizaron pruebas a un motor a diésel utilizando mezclas de biodiésel y diésel para un B5, B10 y B20. Los resultados relacionados a la mecánica del motor muestran que la energía mecánica se mantiene constante sin importar la mezcla que se esté utilizando. Por otro lado, encontraron que las emisiones de CO y la opacidad del humo disminuyen al incrementarse el uso de biodiésel. Mientras que existe un aumento en los NOx. Estos autores concluyen que el uso de biodiésel no representa afectaciones significativas al motor.
- Flórez y Rojas (2009) desarrollaron un estudio en donde se tenía como objetivo evaluar el desempeño mecánico y ambiental de un motor a diésel operando con mezclas de biodiésel y diésel. Se realizaron mezclas de diésel, B10, B20 y B30, estas mezclas fueron con biodiésel de higuierilla, de palma y aceite de cocina usado. La mezcla óptima fue de diésel a un 80%, biodiésel de palma 10% y biodiésel de higuierilla del 10%, pues existió un menor consumo de combustible y existió una buena composición de gases de ignición.

b. México

- Pérez et al. (2013) realizaron una simulación Aspen, la cual representó un proceso de combustión de un motor a diésel. Esta simulación analizaba mezclas de biodiésel y diésel con las siguientes proporciones B5, B10, B20, B50 y biodiésel. Los resultados reportados muestran que existe un aumento en el consumo de combustible, pues el biodiésel tiene un menor poder calorífico. También encontraron que existe una

disminución en la potencia generada y de igual forma, disminuyen las emisiones de CO₂.

c. Brasil

- Leite et al. (2008) desarrollaron un estudio en el cual evaluaron el desempeño de un motor a diésel funcionando en momentos distintos con diésel y biodiésel en las proporciones equivalentes a B2, B5, B20 y biodiésel. Los resultados obtenidos muestran que la potencia del motor fue menor cuando se utiliza biodiésel que cuando se utilizó diésel. Además, se observó que las proporciones B5 y B20 presentaron una potencia parecida o superior que cuando se utilizó diésel.
- Correa et al. (2008) evaluaron el uso de biodiésel proveniente de aceite de girasol y diésel. Se utilizaron las siguientes proporciones B5, B10, B20 y biodiésel, se evaluó la potencia del motor y el lubricante del motor antes y después de 96 horas de uso con biodiésel. Los resultados obtenidos muestran que el uso de biodiésel en todas las proporciones reduce la potencia del motor y aumenta el consumo de combustible.
- Castellanelli et al. (2008) desarrollaron un estudio en donde evaluaron el desempeño de un motor a diésel, la fuerza de torsión, de potencia y el consumo específico de combustible para las siguientes mezclas: B2, B5, B10, B20, B50, B75 y biodiésel. El mejor desempeño se logró con la muestra B20.

2.2.3 Mezclas de diésel y biodiésel en el mundo

En diferentes países del mundo se han desarrollado e impulsado políticas que establecen las mezclas obligatorias con las que debe operar el transporte. Estas mezclas compuestas por combustible fósil y biocombustible varían según el país o la región.

Stratta (2000) reporta que en Estados Unidos se utiliza una mezcla B20 y en Colombia la mezcla que se utiliza es B10. Mientras que, el Fondo de Apoyo para la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (2009) señala que en Australia el biodiésel representa un 4.7 de la mezcla total. Por otro lado, la REMBIO (s.f.) menciona que en Brasil y Argentina la mezcla obligatoria es un B5. En la Tabla 2 se observan las mezclas establecidas de biodiésel y diésel en diferentes países.

Tabla 2. Porcentaje de biodiésel en las mezclas establecidas en distintos países

País	Contenido de biodiésel en las mezclas
Alemania	>5%
Austria	
Chipre	
Dinamarca	
Eslovaquia	
España	
Estonia	
Finlandia	
Francia	
Grecia	
Holanda	
Hungría	
Lituania	
Luxemburgo	
Polonia	
Portugal	
República Checa	<5%
Italia	
Rumania	
Bulgaria	5%
Eslovenia	
Reino Unido	
Suecia	

Tabla tomada de Biofuels International Magazine, s.f., citado por la Federación Nacional de Biocombustibles Colombia, s.f.)

2.2.4 Estudios sobre biodiésel en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad

En el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida sobre la producción de biodiésel (Morales, 2015). En dicho análisis sólo se contabilizaron las emisiones provenientes de cinco etapas, como son (Morales, 2015):

- a. La recolección de materia prima, dentro de esta etapa se calculó el gasto energético por cada litro de aceite recolectado.
- b. Proceso de esterificación, se contabilizó la cantidad utilizada de ácido sulfúrico y metanol, así como, los watts utilizados al encender la bomba.
- c. Secado, en esta etapa se midió el consumo de energía de las resistencias utilizadas para la remoción de metanol y de agua.
- d. Proceso de transesterificación, se contabilizaron los litros utilizados de los insumos, así como el consumo de la bomba y de las resistencias.
- e. Lavado o refinación del biodiésel, en la última etapa se contabilizó el consumo de la bomba eléctrica.

Al final se obtuvo el consumo total de la energía requerida en cada proceso, esto con el fin de obtener el índice energético fósil.

Este estudio realizado no contabiliza las emisiones derivadas de la quema del combustible, por lo que es importante conocer el ciclo completo del biodiésel para conocer la mitigación total de este biocombustible.

Capítulo 3. Justificación

Las ciencias ambientales tienen como objetivo plantear estrategias para enfrentar problemáticas ambientales con un enfoque multidisciplinario. Estos planes estratégicos buscan minimizar el impacto en el ambiente, con el fin de lograr un balance entre las esferas económicas, sociales y ambientales, aunque en muchas ocasiones no es posible lograr este balance debido a la complejidad del problema.

Por lo tanto, frente a la crisis ambiental que se vive por el aumento de contaminantes en la atmósfera y la aceleración del fenómeno de cambio climático, han surgido alternativas que buscan minimizar estos impactos en el planeta. Dentro de estas estrategias de mitigación se encuentra la producción y uso de biodiésel. En términos ambientales este biocombustible busca reducir los niveles de contaminación atmosférica. Cuando el biodiésel es a base de aceite de cocina usado se busca reducir la contaminación en cuerpos de agua y al mismo tiempo se le da un valor agregado a un residuo, ya que en muchas ocasiones el aceite después de ser utilizado es arrojado en los desagües que desembocan en cuerpos de agua cuando se carece de un tratamiento de aguas residuales. Además, al utilizar el aceite de cocina usado como materia prima se reducen los costos de producción, la huella de carbono y la huella hídrica, pues se le da un aprovechamiento a un residuo.

El biodiésel es un biocombustible que no ha sido muy utilizado en el país, generalmente porque las personas desconocen los beneficios y desventajas que pueda generar en el motor el uso de éste. Es importante señalar que este biocombustible impulsa el desarrollo de nuevos mercados, así como, la transición energética en el país.

Por lo tanto, el objetivo de esta tesis es analizar si el biodiésel utilizado en diferentes proporciones representa cambios en las emisiones y en el funcionamiento del motor.

Capítulo 4. Objetivos y pregunta de investigación

Objetivo general

- Evaluar el desempeño y las emisiones de un motor a diésel con distintas mezclas de combustible

Objetivos específicos

- Producir biodiésel a partir de aceite de cocina usado
- Analizar parámetros mínimos de calidad del biodiésel producido en el IIES y de un biodiésel comercial
- Elaborar mezclas de diésel y biodiésel con parámetros mínimos de calidad
- Analizar las emisiones de CO, CO₂, NO_x, HC y material particulado (PM_{2.5}) producidas por las distintas mezclas de combustible en un motor a diésel
- Comparar el funcionamiento del diésel en diferentes proporciones de biodiésel en un motor de combustión interna
- Construir escenarios sobre la implementación de biodiésel en el autotransporte de México y Morelia

Pregunta de investigación

- ¿Qué mezcla de biodiésel y diésel permite obtener un mayor desempeño en el motor y menores emisiones de CO, CO₂, NO_x, HC y material particulado (PM_{2.5})?

Capítulo 5. Metodología

Para poder desarrollar este trabajo de investigación fue necesario contar con un motor a diésel, equipo de medición de gases y las distintas mezclas de combustible. Para descartar errores en la medición se utilizó en el mismo dispositivo de uso final (el motor) un biodiésel comercial y el biodiésel producido en el IIES.

5.1 Producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado

El biodiésel que se utilizó para realizar las pruebas fue producido a base de aceite de cocina usado. Este biodiésel fue producido en la planta piloto de producción de biodiésel ubicada en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Esta planta consta de tres partes: sistema de filtrado, sistema de reacción y sistema de mezclado de hidróxido de sodio y metanol.

Cabe mencionar que, la planta piloto no se encontraba en condiciones óptimas para su uso por lo que fue necesario darle mantenimiento de limpieza, revisar posibles fugas y conexiones, y, además se implementó una fase de purificación a la planta la cual consistió en una columna de aserrín.

Como se mencionó, la materia prima utilizada fue aceite de cocina usado, el cual provino en su mayoría de la cafetería de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Morelia y en menor proporción se utilizaron los aceites recolectados en viviendas (ver Ilustración 9).

Ilustración 9. Distintos tipos de aceite de cocina usados



(Imagen propia)

El proceso para la elaboración de biodiésel se basó en seis etapas:

1. Mezclado de distintos aceites. Se utilizaron 70 litros de aceite de cocina usado y se mezclaron hasta lograr la homogeneidad.
2. Filtrado. En una malla se recirculó por 20 minutos el aceite de cocina usado para que dentro de ésta se quedaran las partículas que pudiera haber en la materia prima.
3. Remoción de la humedad. Se calentó a 100°C el aceite con el objetivo de remover la humedad.
4. Preparación del metóxido. Por medio de la determinación de los ácidos grasos libres se obtuvo que, para producir 70 litros de biodiésel, se requería de 438 g de KOH y 17 L de metanol.
5. Transesterificación. Este proceso consistió en mezclar el metóxido con el aceite de cocina usado durante una hora a una temperatura de 65°C.
6. Lavado. Se realizó un lavado de biodiésel en una columna de aserrín. Se colocaron 5 Kg de aserrín de distintos grosores (fino, medio y grueso). Este paso duró aproximadamente 30 min.

5.2 Características generales del biodiésel comercial

El biodiésel comercial fue adquirido de la empresa BIOIL de México, la cual se encuentra en Guadalajara. La compra se realizó vía internet y el costo por litro fue de 18 pesos. El biodiésel fue elaborado con aceite vegetal usado y cuenta con certificado de calidad donde se evalúan cuatro parámetros, como son: agua y sedimentos, punto de nube, carbón residual y punto de inflamabilidad.

5.3 Elaboración de mezclas diésel y biodiésel con parámetros mínimos de calidad

Para la preparación de las mezclas fue necesario colocar los porcentajes establecidos para cada una de ellas. La mezcla B5 necesitó que el 5% del volumen fuera biodiésel y el 95% diésel; la mezcla B10 contenía 10% biodiésel y 90% diésel; la mezcla B20 se componía de 20% biodiésel y 80% diésel. Cabe señalar que, el D100 se compone en su totalidad de diésel y el B100 de biodiésel.

Se caracterizaron las mezclas establecidas, obteniendo densidad, viscosidad y poder calorífico para cada una de éstas.

5.4 Análisis de parámetros mínimos de calidad del biodiésel producido en el IIES y de un biodiésel comercial

Se evaluaron siete parámetros mínimos de calidad, de los cuales, la densidad, la viscosidad y el poder calorífico se obtuvieron en el IER. Para obtener la densidad se utilizó un densímetro Anton Par-DMA 200, en el cual se introdujeron las muestras. Para la viscosidad se usó un viscosímetro AMETEK donde se colocaron 200 μ L de cada mezcla. Para determinar la calorimetría se colocaron 0.05 gramos de cada una de las mezclas y en un calorímetro Par 6400.

En el laboratorio del IIES se realizaron cuatro pruebas más como la determinación de jabón, determinación de yodo, técnica para determinación de ceras por precipitación de frío y acidez de biodiésel (ver anexo 2).

5.5 Propiedades fisicoquímicas de diésel de PEMEX

El diésel utilizado en las pruebas fue el producido por PEMEX y en la Tabla 3 se observan las propiedades fisicoquímicas de éste.

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de Diésel de PEMEX

Propiedades (unidades)	Valor
Aromáticos (% volumen máximo)	35
Azufre (mg/Kg máximo)	500
Temperatura máxima para el 10% de destilación (°C)	275
Temperatura mínima de inflamación (°C)	45
Temperatura de auto ignición (°C)	254-285
Gravedad específica 20/4° C	Menor a 1
Color (ASTM D1500)	2.5 (máximo)
Olor	Característico a hidrocarburo
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	1.9-4.1
Límites de explosividad	0.6 inferior-6.5 superior
Solubilidad en agua (g/100 ml a 20°C)	Insoluble

Nota: Tabla tomada de PEMEX, p.16 2009, citado por IMP 2014

5.6 Análisis de emisiones de CO, CO₂, NO_x, HC y material particulado (PM_{2.5}) producidas por las distintas mezclas de combustible en un motor a diésel

En este apartado se exponen las características del motor utilizado, después se explica la medición de las emisiones, el cálculo de éstas y el diseño de la captura de gases. Cabe mencionar que se evaluaron las emisiones de las distintas mezclas utilizando el biodiésel producido en el IIES y el biodiésel comercial.

5.6.1 Características del motor a prueba

Para la realización de esta tesis se adquirió un motor a diésel, en la Tabla 4 se pueden observar los datos técnicos del motor utilizado.

Tabla 4. Características generales del motor diésel utilizado

Modelo	178 FD
Tipo de motor	Diésel, monocilíndrico, vertical, 4 tiempos enfriado por aire
Cilindro	78 x 62 mm
Desplazamiento	296 ml
Compresión	19.1
Torque máximo	13.6 N.m / 2,880 RPM
Sistema de ignición	Compresión
Arranque de motor	Eléctrica y manual
Filtro de aire	Tipo semiseco
Capacidad de aceite	1.1 lt
Capacidad de tanque combustible	3.5 lt
Consumo de combustible	280 g/ kW.h
Dimensiones	485 x 425 x 515 mm
Peso	36 kg

Ilustración 10. Motor a diésel



(Imagen propia)

5.6.2 Medición de emisiones

Las partículas y gases evaluados fueron seleccionados con base a lo registrado en la literatura, pues en la mayoría de los estudios se medían CO_2 , CO , NO_x , HC y $\text{PM}_{2.5}$.

La captura de emisiones se realizó mediante una campana de extracción de gases que produce un tiro inducido mediante sopladores, tal como lo describe Ruiz-García (2018). Las emisiones de CO , CO_2 , NO_x e HC se midieron mediante un analizador de flujo de gases (FGA, por sus siglas en inglés). Este equipo fue calibrado con gases de referencia de 500 ppm de CO , 5000 ppm de CO_2 y 120 ppm de HC . Se utilizó N_2 para verificar la respuesta de los sensores. Los sensores de los equipos FGA y VelociCalc fueron colocados directamente en el escape con el fin de que los gases no estuvieran diluidos.

Para las emisiones de $\text{PM}_{2.5}$, se utilizó una campana de extracción de gases y un sistema gravimétrico que consta de una bomba que captura un flujo de muestra de 16.7 LPM que posteriormente pasan a un ciclón y se impactan en un filtro de 4 in de fibra de vidrio. El pesado de filtros se realizó con un desionizador y una balanza semi micro-analítica (OHAUS- EX225D) con una capacidad mínima de 0.82 mg y una máxima de 220g. De acuerdo con Ruiz-García (2018) la balanza fue colocada “sobre

una barra de concreto para eliminar vibraciones y estabilizarla horizontalmente con ayuda de la burbuja”. Lo anterior se realizó en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa (21° C y 40%) y utilizando masa estándares de referencia. El pesado de filtros se realizó antes y después de usarlos con una estabilización de por lo menos 48 h y se resguardaron en gabinetes de secado para filtros.

Se realizaron tres réplicas con el siguiente orden de evaluación: D100, B5, B10, B20 y B100. No se pudieron realizar las pruebas aleatoriamente debido a que el sistema de inyección podría verse afectado por las distintas densidades del diésel y biodiésel a diferentes proporciones. Cabe mencionar que al término de cada prueba se vació el tanque de combustible para evitar que el motor se desestabilizara, se colocó la nueva mezcla y se encendió por cinco minutos para que el combustible que se encontraba en el sistema de inyección fuera quemado. Lo anterior, con el fin de evitar que los resultados obtenidos provinieran de la mezcla previa. Después de los cinco minutos transcurridos, el motor se usó a una potencia baja por 10 minutos.

5.6.3 Cálculo de emisiones

De acuerdo con Vázquez (2017) para el cálculo de emisiones es necesario emplear las siguientes fórmulas.

a) Cálculo de flujo en la tubería (m³/s)

*Velocidad en la tubería * Área transversal de tubería = Flujo en la tubería*

$$(m/s) * m^2 = m^3/s$$

b) Flujo másico (g/s)

*Flujo en tubería * densidad del flujo = Flujo másico*

$$(m^3/s) * (g/m^3) = g/s$$

c) Masa del contaminante (g)

$$\left(\frac{[\text{Concentración del gas aportado por el motor}] * \frac{\text{peso molecular del gas}}{R} * \text{temperatura}}{\text{Presión atmosférica}} \right) * (\text{Flujo en la tubería}) * (\text{Intervalo de tiempo}) = \text{Masa del contaminante}$$

$$\left(\frac{[\text{ppm}] * \frac{\frac{g}{\text{mol}}}{\text{atm} * L} * K}{\frac{\text{mol} * K}{\text{atm}}} \right) * \left(\frac{\text{m}^3}{s} \right) * (s) = \text{Masa del contaminante (mg)}$$

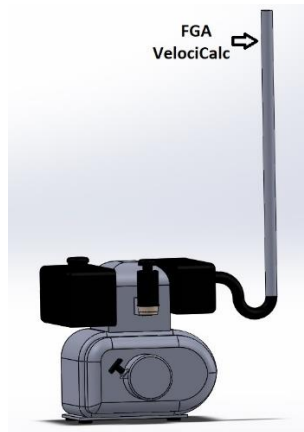
5.6.4 ANOVA

Debido a que los datos obtenidos no cumplieron los supuestos de una distribución normal, se realizó una transformación de rangos (Conover e Iman, 1981). Para esta transformación se elaboró una matriz con los datos obtenidos, en la cual las filas fueron las mezclas, el D100 y el B100, mientras que las columnas fueron los gases medidos. Posteriormente, en el programa R se aplicó un análisis de ANOVA de una vía y se empleó el post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95%.

5.6.5 Diseño de captura de gases

Las mediciones de CO, CO₂, HC y NO_x se realizaron sin dilución, se colocó un codo en la salida del escape, para posteriormente ensamblar un tubo de 1.7 metros de altura y 6.9 cm de diámetro. Como se muestra en la Ilustración 11, se colocaron los sensores del FGA y VelociCalc en la parte superior del tubo.

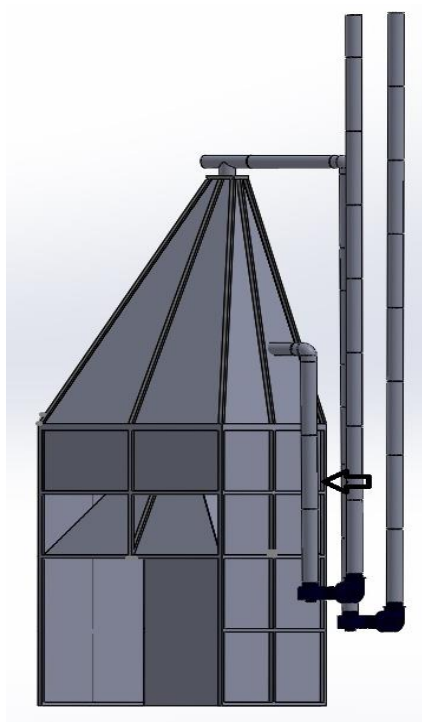
Ilustración 11. Puertos de muestreo del FGA (1) y VelociCalc (2)



(Imagen propia)

Para el material particulado 2.5, fue necesario utilizar la campana que se encuentra en el LINEB. En la Ilustración 12 se muestra la campana que se utilizó y la flecha nos señala la ubicación del ciclón y del porta filtros.

Ilustración 12. Medición de PM con dilución



(Imagen propia)

5.7 Comparación del funcionamiento del diésel en diferentes proporciones de biodiésel en un motor de combustión interna

Para el análisis del funcionamiento del motor sólo se pudo obtener el consumo de combustible como un parámetro. Para poder estimarlo se midió el volumen de cada mezcla antes de colocarla en el tanque de combustible, posteriormente se colocó la mezcla, se encendió el motor y al terminar cada prueba se vació el tanque y se midió el volumen de combustible. Se calculó la diferencia entre el volumen inicial y el volumen final.

5.8 Escenarios sobre la implementación de biodiésel en el autotransporte de México y Morelia

Para realizar los escenarios fue necesario conocer el Potencial de Recuperación de Aceites de Cocina Usados (PRACU). Riegelhaupt et al. (2016) estimaron el potencial de producción de biodiésel de aceites usados en México. Este dato se basa en dos hipótesis: la primera supone una baja recuperación que representa el 10% del consumo aparente y la segunda es una alta recuperación que representa el 30% del consumo nacional de aceite vegetales. Por lo tanto, el volumen para la primera hipótesis es de 120,546 m³/año y para la segunda el valor es de 361,639 m³/año.

Para calcular la cantidad de energía al año a partir de la producción de biodiésel a base de aceites de cocina usado, se utilizaron las dos hipótesis planteadas del PRACU y se empleó la siguiente fórmula.

$$\left(m^3/\text{año de aceite}\right) * (\text{densidad}) * (\text{poder calorífico}) = \text{MJ/año}$$

Los escenarios se basaron en distintos años y se analizaron los datos para México y para Morelia.

Capítulo 6. Resultados y Discusión

En este capítulo se exponen y discuten los resultados obtenidos con relación a la producción de biodiésel, las pruebas de calidad, las emisiones, el consumo de combustible y la estimación de las emisiones por la producción de biodiésel en México y Morelia.

6.1 Producción de biodiésel a partir de aceite de cocina usado

Se obtuvieron 70 litros de biodiésel a partir de aceite de cocina usado, en la Ilustración 13 se puede observar el biodiésel obtenido.

Ilustración 13. Biodiésel obtenido de la planta piloto



(Imagen propia)

Como se mencionó anteriormente, la planta piloto ubicada en el IIES estaba en desuso por lo que fue necesario reacondicionarla y comprender el funcionamiento de ésta. Una de las problemáticas identificadas fue que el reactor cuenta con resistencias muy pequeñas, también fue la primera corrida de biodiésel que se realizó por lo que no se conocía muy bien el funcionamiento y los tiempos de la planta. Se identificaron posibles mejoras: 1) Aumentar el tiempo de la reacción de transesterificación pues se

dejó por una hora, pero este tiempo pudo haber sido más por el volumen y 2) Aumentar el tiempo para la remoción de agua en el aceite, pues si éste aún contenía grandes cantidades de agua pudo haber favorecido la saponificación durante la reacción y esta saponificación puede provocar que el catalizador necesario para la transesterificación se consuma provocando emulsiones en el proceso de purificación (Calzadiaz, 2012).

6.2 Análisis de parámetros mínimos de calidad del biodiésel producido en el IIES y de un biodiésel comercial

Se realizaron pruebas mínimas de calidad, pues para realizar las pruebas básicas de calidad es necesario contar con equipos y reactivos costosos, con los cuales no cuenta el laboratorio. De igual forma se buscaron Institutos en donde se pudieran realizar dichas pruebas, pero los costos también eran muy elevados por lo que, se realizaron algunas pruebas en el IER y otras en el laboratorio de Agua y Biodiésel de la Unidad de Ecotecnologías.

En la Tabla 5 se muestran los parámetros mínimos de calidad que se obtuvieron para el biodiésel producido en el IIES, además se muestra si cumple o no con las normas establecidas.

Tabla 5. Parámetros mínimos de calidad para el biodiésel producido en el IIES

Parámetro	Valor	Límites	Método de ensayo	Cumple con la norma
Densidad a 15°C	0.8819 g/cm ³	0.86-0.90 g/m ³	ASTM D1298	Sí
Viscosidad a 40° C	5.964 cSt	1.9-6.0	ASTM D6751	Sí
Poder calorífico *	39.82 MJ/kg	-	-	-
Contenido de jabón	547.2 ppm	500	ASTM D2896	No

Índice de yodo	218 g yodo/ 100 g	máx 120 g yodo/ g	Norma Europea 14111	No
Cloud Point	-2 °C	-	ASTM D2500	-
Acidez del biodiésel	0.2 mg KOH / g	0.80 máximo	ASTM D6751	Sí

*Nota: el poder calorífico no es parámetro de calidad

El biodiésel producido en el IIES, cumple con los valores establecidos en las normas ASTM en relación a la densidad, viscosidad y a la acidez. Es importante conocer la densidad y viscosidad del biodiésel, pues al ser más viscoso que el diésel puede afectar los inyectores del motor.

Dentro de los parámetros que no cumplieron con los límites de las normas está el contenido de jabón y el índice de yodo. El contenido de jabón es un parámetro importante, pues los jabones al estar en contacto con el catalizador provocan que los ácidos grasos se transformen y así aumente el nivel de acidez en el biodiésel (Ruíz, 2016). Mientras que el índice de yodo mide la actividad oxidativa del biocombustible y este parámetro influye directamente en la densidad y en el punto de fusión del biodiésel.

Para el biodiésel comercial, como se muestra en la Tabla 6, se obtuvieron cinco parámetros de calidad, se presentan los resultados de las pruebas certificadas que expone el fabricante (punto de inflamabilidad, residuo de carbón, punto de nube y agua y sedimentos).

Tabla 6. Parámetros mínimos de calidad para el biodiésel comercial

Parámetro	Valores	Límites	Método de ensayo	Cumple con la norma
Densidad a 15°C	0.8962 g/cm ³	0.86-0.90 g/m ³	ASTM D1298	Sí
Viscosidad a 40° C	7.761 cSt	1.9-6.0	ASTM D445	No
Poder calorífico *	38.63 MJ/kg	-	-	-
Contenido de jabón	2036.8 ppm	500	ASTM D2896	No
Índice de yodo	429.86 g yodo/100 g	máx 120 g yodo/ g	Norma Europea 14111	No
Punto de inflamabilidad	>160 °C	130° C	ASTM D93	No
Residuo de carbón	0.028 %	0.050	ASTM D4530	Sí
Punto de nube	-9 ° C	-	ASTM D2500	-
Agua y sedimentos	0.10	0.050	ASTM D2709	No

*Nota: el poder calorífico no es parámetro de calidad

El biodiésel comercial no cumple con la viscosidad establecida en la norma, este parámetro nos indica la facilidad que tiene el biocombustible para circular por el sistema de inyección y en los inyectores. Cuando se tiene un combustible con un alto valor de viscosidad, como es el caso de este biodiésel, se forman lacas que afectan las toberas de los inyectores y los cilindros del motor (Vásquez, s.f).

Otro parámetro que no cumplió es con el contenido de jabón, pues éste se cuadruplica, esto puede ser porque el biodiésel tiene un alto contenido de ácidos grasos libres.

6.3 Elaboración de mezclas de diésel y biodiésel con parámetros mínimos de calidad

Se prepararon las mezclas establecidas, cada una fue de 500 mililitros (ver Ilustración 14).

Ilustración 14. Mezclas de combustibles D100, B5, B10, B20 y B100



(Imagen propia)

Cada una de las mezclas fueron caracterizadas, se determinó la densidad, la viscosidad y el poder calorífico, en la Tabla 7 se pueden ver los valores obtenidos.

Tabla 7. Parámetros de calidad para mezclas B5, B10 y B20 del biodiésel del IIES

Mezcla	Parámetro	Unidades	Límites	Método de ensayo	Cumple con la norma
B5	Densidad a 40°C	0.8199 g/cm ³	-	-	-
	Viscosidad a 40°C	3.706 cSt	1.9-4.1 cSt	D445	Sí
	Poder calorífico	45.32 MJ/kg	-	-	-
B10	Densidad a 40°C	0.8223 g/cm ³	-	-	-
	Viscosidad a 40°C	3.837 cSt	1.9-4.1 cSt	D445	Sí
	Poder calorífico	45.18 MJ/kg	-	-	-

B20	Densidad a 40°C	0.8269 g/cm ³	-	-	-
	Viscosidad a 40°C	3.986 cSt	1.9-4.1 cSt	D445	Sí
	Poder calorífico	44.44 MJ/kg	-	-	-

Nota: Los límites se obtuvieron de la ASTM D7467-13 (Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend)

En la tabla se puede observar que las tres mezclas establecidas cumplen con la norma de viscosidad, también se puede ver cómo al agregar más cantidad de biodiésel la densidad va en aumento y el poder calorífico disminuye.

6.4 Análisis de emisiones de CO, CO₂, NO_x, HC y material particulado (PM_{2.5}) producidas por las distintas mezclas de combustible en un motor a diésel

Los resultados obtenidos muestran las emisiones de un motor estático, pues no se simuló acelerado y frenado. Estos resultados varían con relación a las emisiones de un motor en condiciones reales.

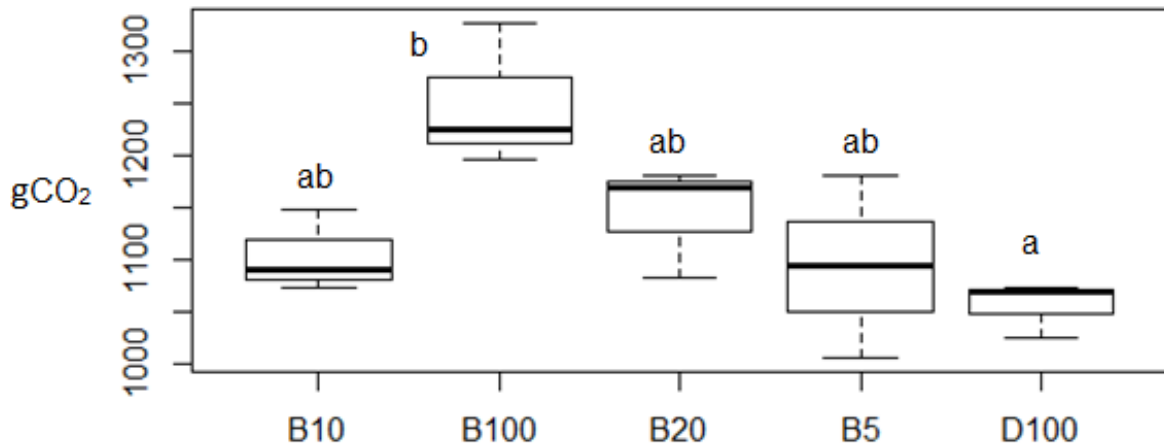
Dentro de los resultados obtenidos se calculó la tasa de emisión por minuto, la cual se muestra en la Tabla 8 donde podemos ver que la mezcla B100 en comparación al D100 emite más CO₂, CO, PM_{2.5} e HC.

Tabla 8. Tasa de emisión por minuto por cada mezcla

	Tasa de emisión									
	CO ₂		CO		NO _x		PM _{2.5}		HC	
	(g/ min)		(mg/ min)							
	Promedio	σ	Promedio	σ	Promedio	σ	Promedio	σ	Promedio	σ
D100	1056.7	26.5	510.8	53.3	15.1	1.2	50.6	9.1	29.9	3.2
B5	1093.5	86.8	509.4	93.8	14.8	1.3	62.5	17.3	32	10.1
B10	1104.0	39.7	519.6	22.4	21.6	4.5	59.1	14.2	27.7	3.6
B20	1144.2	53.	529.1	25.8	19.2	2.5	60.6	13.9	25.3	1.2
B100	1249.0	68.5	952.9	74.6	8.5	1.7	249.4	25.0	48.9	2.5

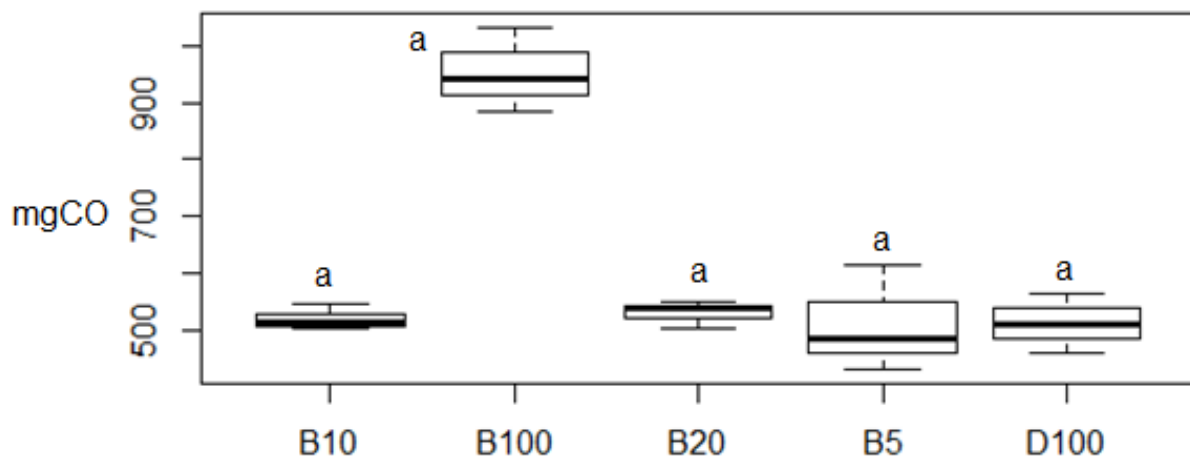
En el Gráfico 1 se muestra la ANOVA del CO₂, se puede observar que existen diferencias significativas entre el B100 y el D100. Mientras que entre la mezcla B10, B20 y B5 no hay diferencias significativas.

Gráfico 1. ANOVA del gas CO₂



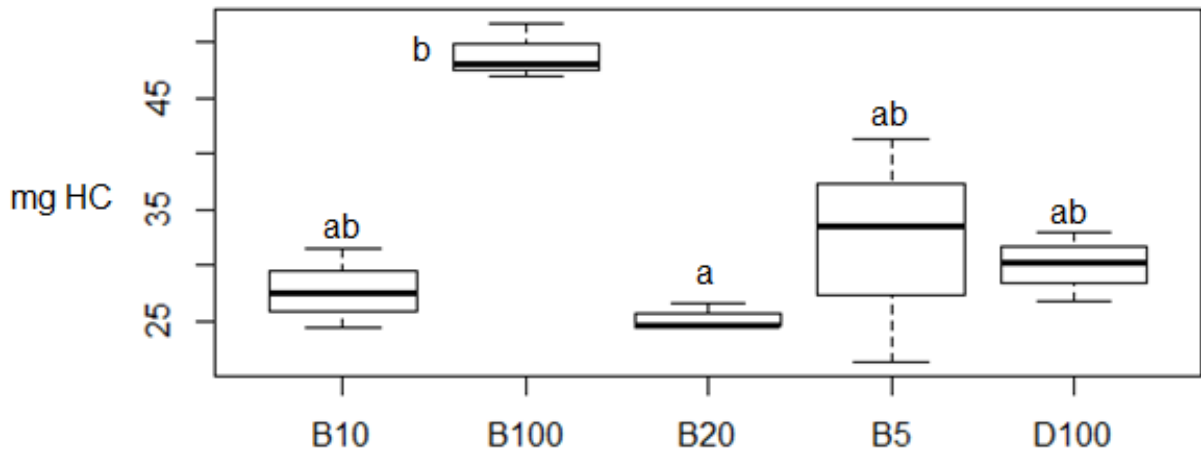
El Gráfico 2 muestra que con el estadístico utilizado no existen diferencias significativas con relación a las emisiones de CO entre las mezclas, el D100 y el B100.

Gráfico 2. ANOVA del gas CO



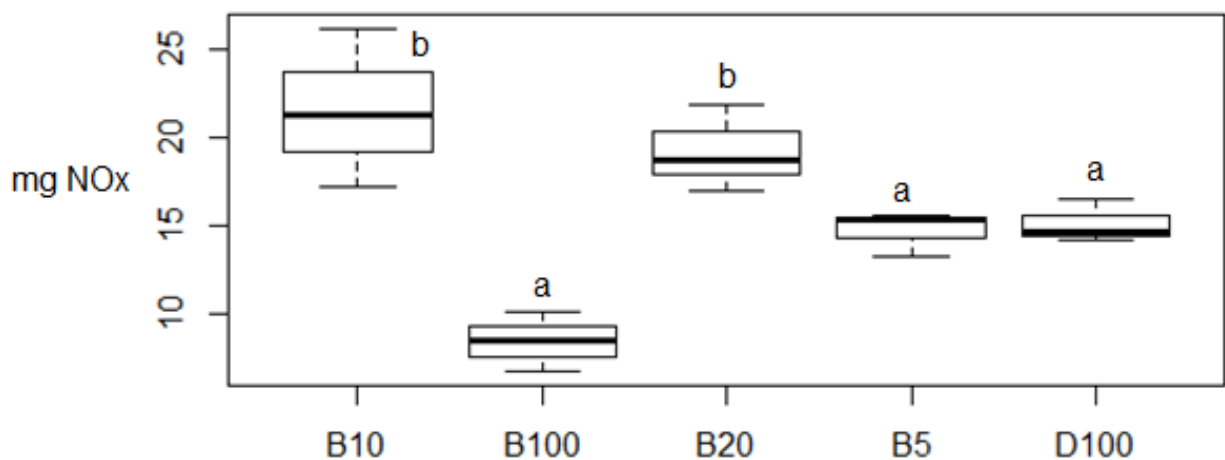
En el Gráfico 3 se observa que existen diferencias significativas entre la mezcla B20 y el B100. De igual forma, se ve que el B100 es el que más emite HC.

Gráfico 3. ANOVA del gas HC



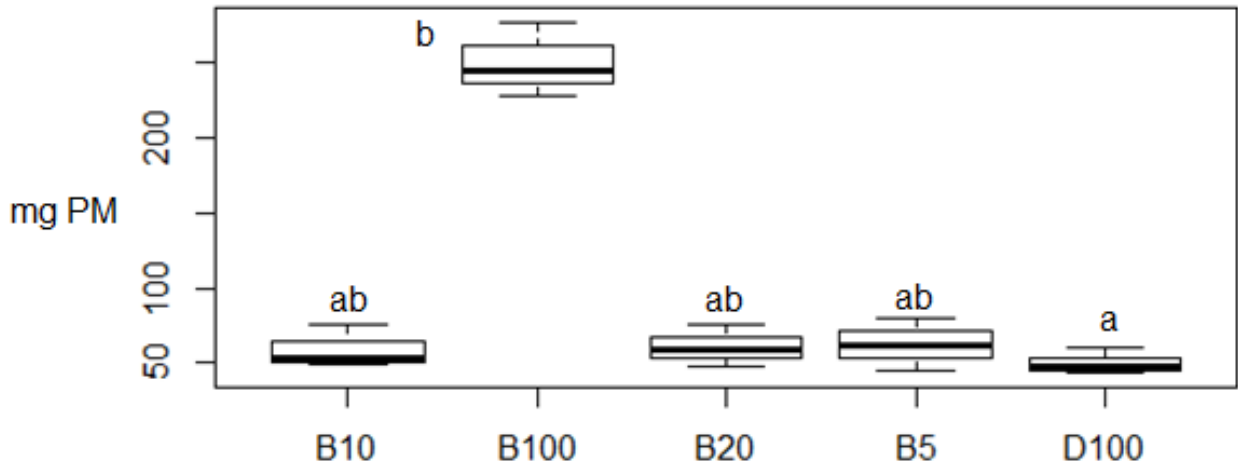
Respecto a las emisiones de NOx, en el Gráfico 4 se observa que la mezcla B10 y B20 no tienen diferencias significativas entre ellas, pero sí son diferentes con relación al B5, B100 y D100.

Gráfico 4. ANOVA del gas NOx



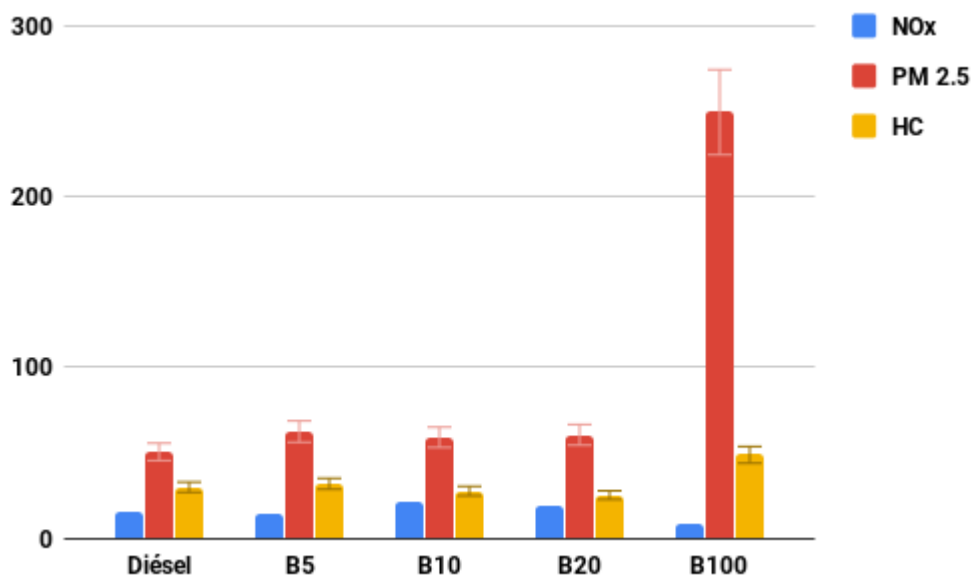
En el Gráfico 5 se observan las diferencias significativas entre el B100 y el D100, pero se puede observar que el biodiésel es el que más material particulado emitió.

Gráfico 5. ANOVA del material particulado 2.5



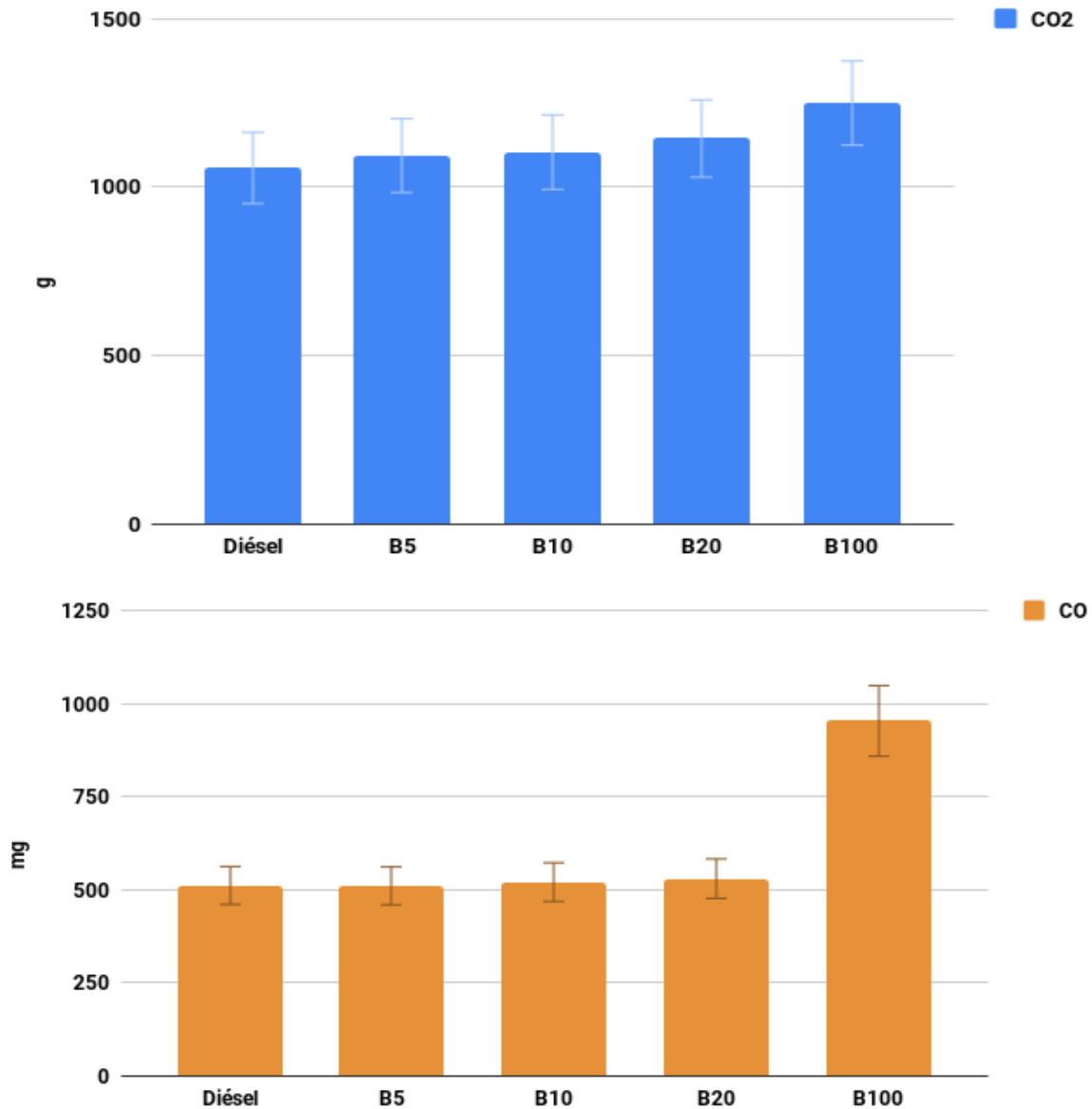
En el Gráfico 6 se muestran los mg emitidos de NOx, HC y de PM para cada mezcla, se muestra que con el B100 el PM_{2.5} aumenta en gran cantidad, mientras que los NOx disminuyen al existir una mezcla B100.

Gráfico 6. Tasa de emisión por minuto de NOx, PM_{2.5} e HC



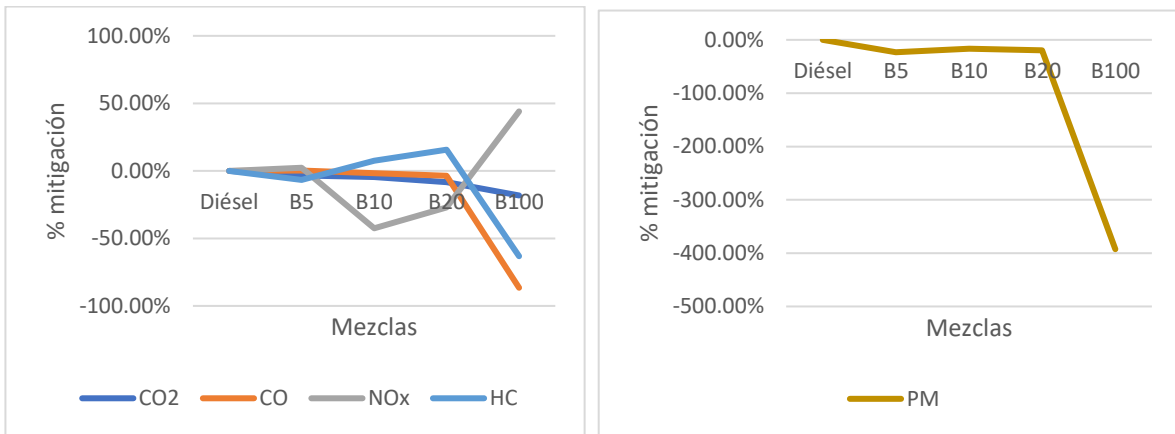
En el Gráfico 7 se muestra la tasa de emisión de CO₂ en g por minuto y CO en miligramos por minuto. Se puede observar que existe un incremento en las emisiones cuando aumenta la presencia de biodiésel en la mezcla.

Gráfico 7. Tasas de emisión por minuto de CO₂ y CO



Por otro lado, se calculó el porcentaje de mitigación entre el diésel utilizado y las distintas mezclas de biocombustible, en el Gráfico 8 se pueden ver los resultados obtenidos.

Gráfico 8. Mitigación de diferentes mezclas de biocombustibles



Por último, se compararon las emisiones provenientes del biodiésel producido en el IIES y del biodiésel comercial. En los Gráficos 9 y 10 se muestran los resultados, donde se puede ver que el biodiésel producido en el IIES tiene emisiones similares a las del biodiésel comercial. Aunque ambos emiten más CO₂, CO, HC y PM_{2.5} con relación al diésel.

Gráfico 9. Emisiones provenientes de dos tipos de biodiésel

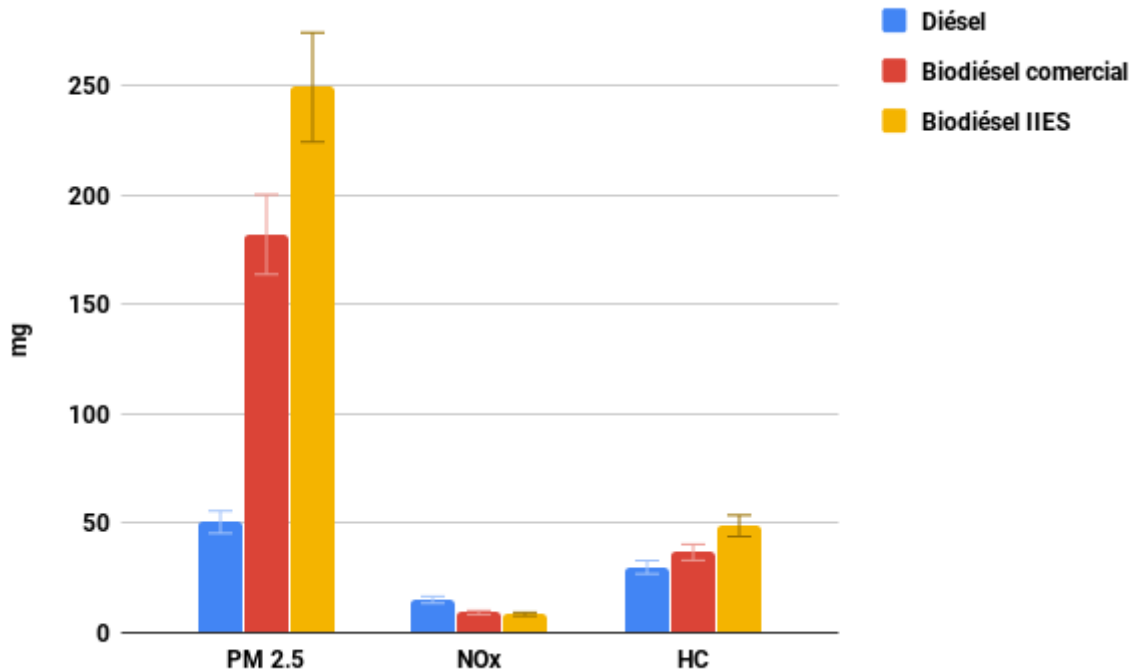
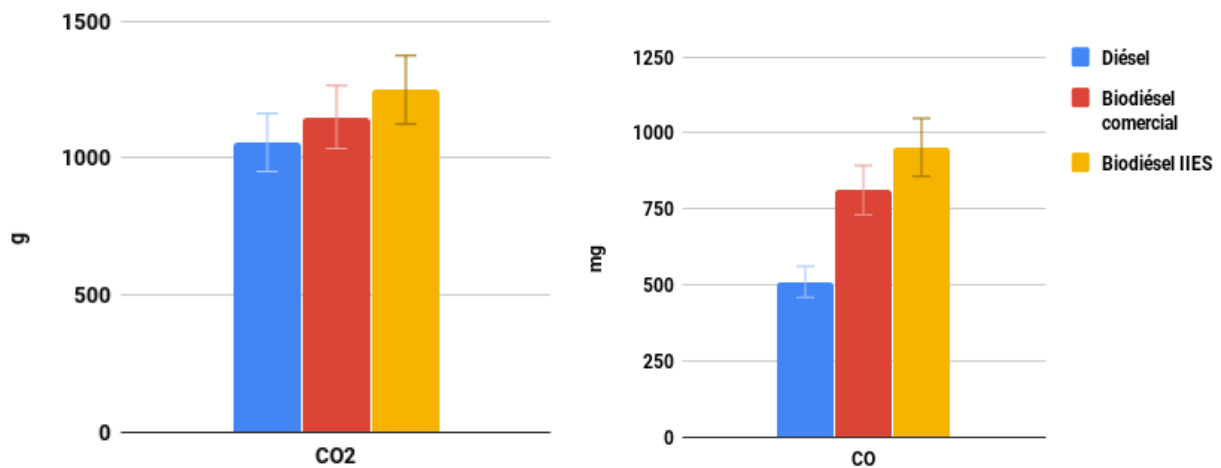


Gráfico 10. Emisiones de CO₂ y CO provenientes de dos tipos de biodiésel



Después de haber obtenido los valores de calidad y de emisión para cada mezcla se puede deducir que existe una gran correlación entre los valores obtenidos sobre calidad y emisiones. De acuerdo con Li et al (2013) la viscosidad del combustible tiene un efecto directo en el funcionamiento del motor, pues entre más viscoso sea el biodiésel más inestabilidad tendrán los inyectores lo cual provocará una mayor formación de depósitos en el cilindro. Esto se puede ver con los resultados obtenidos pues los dos tipos de biodiésel son más viscosos y las emisiones de material particulado 2.5 se triplicaron con relación al diésel. De igual forma, Araya (2009) menciona que al tener una alta viscosidad en el biodiésel se produce una combustión pobre o incompleta, generando depósitos de carbón. Cabe mencionar que el hollín se produce por el carbón contenido en el combustible. Otros factores que también influyen en la formación de PM_{2.5}, es la calidad de la combustión, Rojas (2004) establece que esta formación se da por mezclado del aire y el combustible a la hora de que los inyectores lo dosifiquen dentro de las paredes de la cámara de combustión.

Por otro lado, con relación a la formación de NO_x existe un debate entre autores sobre si estos realmente disminuyen o aumentan, pues más de la mitad de los artículos leídos mencionan que existe un aumento en los NO_x al utilizar B100. Los aumentos registrados en la literatura van desde un 5% a un 10%, mientras que, también existen

autores que no reportan los datos obtenidos de NOx pues mencionan que éstos varían dependiendo del motor.

En este estudio los NOx disminuyeron un 40% en relación al diésel, el biodiésel producido en el IIES obtuvo menores emisiones de este gas en comparación al biodiésel comercial. Las principales razones del aumento de las emisiones de NOx en un motor se relaciona con la carga, el tipo y la velocidad de éste, aunque en este estudio las pruebas se realizaron en el mismo motor y a la misma velocidad y carga. No obstante, también existen factores químicos que se relacionan con el aumento de este gas, pues Li (2009) menciona que un factor que influye en la combustión y emisión de NOx es la transferencia de calor que existe en el ambiente y el combustible. Esto se relaciona con lo que expone Agudelo et al (2005), el cual menciona que, entre más contenido de oxígeno esté presente en el biodiésel, el motor podrá trabajar con una relación de aire y combustible baja, lo cual, provoca una menor temperatura en el cilindro. Y si existe una mayor temperatura en la cámara de combustión las emisiones de NOx aumentarán, como lo es con el diésel o las mezclas.

En relación con las emisiones de CO, la mayoría de la literatura encontrada menciona que existe una disminución en las emisiones, algunos autores reportan disminuciones hasta del 50%. Sin embargo, los datos obtenidos en esta investigación registran un aumento en las emisiones de CO. Masjuki et al (1996) encontraron una correlación entre el aumento de las emisiones de CO en medida que aumenta la temperatura del biodiésel, esto se puede ver reflejado ya que las pruebas B100 fueron las últimas en realizarse, por lo que el motor pudo haber estado a una temperatura más elevada al introducir la mezcla.

Las emisiones de HC (estos son hidrocarburos no quemados durante la combustión) del biodiésel fueron mayores en comparación al diésel, aunque la literatura muestra que existe una disminución del 50%, estas emisiones se pueden relacionar con el oxígeno contenido en el biodiésel.

6.5 Comparación del funcionamiento de diésel con diversas mezclas de biodiésel en un motor de combustión interna

En Tabla 9 se pueden observar los resultados obtenidos del consumo de combustible en cada prueba, el promedio y la desviación estándar de cada mezcla.

Tabla 9. Consumo de combustible por cada mezcla

Mezcla	Consumo de mL por prueba
D100	40 (0)
B5	41.7 (2.9)
B10	41.7 (2.9)
B20	45 (0)
B100	55 (0)

Como se muestra en la Tabla 9, al aumentar la cantidad de biodiésel en la mezcla existe un incremento en el consumo de combustible. Comparando el D100 y B100 se consumieron 15 mL más con el biodiésel, esto se debe al poder calorífico del combustible pues el del diésel utilizado fue de 45.74 MJ/Kg y el del biodiésel fue de 39.82 MJ/Kg, por lo que se necesitó más cantidad de combustible por el mismo tiempo en el que el motor estuvo encendido.

Entre mezclas no hubo un gran cambio con relación al consumo de combustible, ya que el poder calorífico no varió tanto entre cada una de éstas: B5 con 45.32 MJ/Kg, B10 con 45.18 MJ/Kg y B20 con 44.44 MJ/Kg.

6.6 Escenarios sobre la implementación de biodiésel en el autotransporte de México y Morelia

En este apartado se muestra el diésel consumido por el autotransporte en México, así como dos posibles escenarios sobre distintos PRACU. Posteriormente se muestra una estimación del consumo de diésel en Morelia y de igual forma, dos posibles escenarios sobre distintos PRACU.

Para desarrollar estos escenarios fue necesario calcular la energía consumida en México anualmente por el diésel en autotransporte. De igual forma como se muestra en la Tabla 10, se calculó la energía de diésel que faltaría para satisfacer la demanda del país en relación con la hipótesis del 10% y del 30%, puesto que con la primera hipótesis se obtuvo que con el aceite de cocina usado se podría producir un 4.20 PJ /año, mientras que para la hipótesis del 30% se obtuvo 12.62 PJ/ año.

Tabla 10. Energía consumida de diésel en México anualmente por autotransporte comparándola con un PRACU para biodiésel del 10% y 30%

Año	PJ/año				
	Consumo anual	Escenario PRACU 10%		Escenario PRACU 30%	
	Diésel	Biodiésel	Diésel faltante	Biodiésel	Diésel faltante
2009	518.9	4.2	514.6	12.6	506.3
2010	537.1	4.2	532.9	12.6	524.5
2011	555.8	4.2	551.6	12.6	543.2
2012	558.1	4.2	553.9	12.6	545.5
2013	549.6	4.2	545.4	12.6	537
2014	542.3	4.2	538.1	12.6	529.7
2015	586.6	4.2	582.3	12.6	574
2016	575.4	4.2	571.2	12.6	562.8

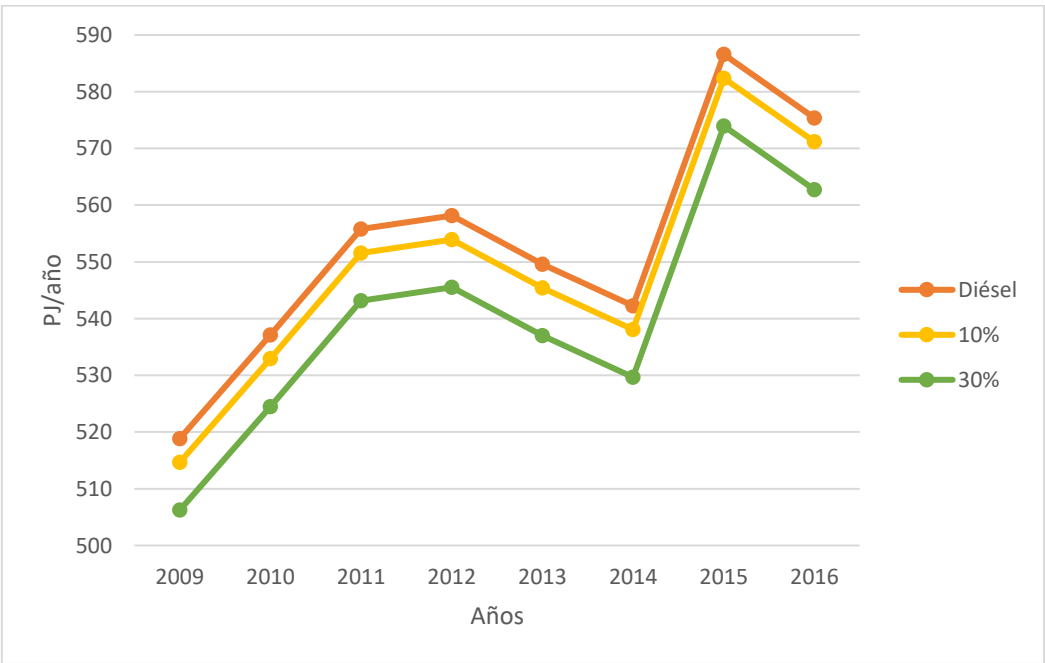
Nota: Datos obtenidos de los Balances Nacionales de la SENER de cada uno de los años se muestran aceites usados

En la Tabla 10 y Gráfico 11 se puede observar el consumo de diésel del autotransporte en México a lo largo de ocho años, en la columna o línea de diésel se observan los petajoules de diésel que consumen los mexicanos en un año. La columna del 10% es

una proyección sobre cuánto diésel se necesita para satisfacer la demanda, pues se estima que los petajoules restantes provienen del uso de biodiésel. Lo mismo ocurre para la columna del 30%, donde se muestran los petajoules provenientes de diésel y los petajoules restantes provienen del uso de biodiésel y diésel.

Esta proyección nos muestra que la cantidad que se puede cubrir con biodiésel a partir de aceite usado a nivel nacional es muy baja, pues con la hipótesis del PRACU del 10% la producción de biodiésel cubre un 0.8% de la demanda actual de diésel. Mientras que, con el escenario de 30%, sólo se cubre un 2.3 % de la demanda anual de diésel para autotransporte en México. Como se muestra en el Gráfico 11 la dependencia de diésel para autotransporte en México podría disminuir si se utilizara aceite de cocina usado para la producción de biodiésel.

Gráfico 11. Escenarios sobre consumo de diésel y biodiésel a partir de aceite de cocina usado en México



Para el escenario de Morelia, fue necesario buscar la información del consumo de diésel en esta ciudad. Se encontró la información de consumo de diésel para 13 años y se supuso que el consumo para autotransporte era de 90% basado en el comportamiento de los datos a nivel nacional.

Como se puede observar en la Tabla 11, se partió del consumo anual de diésel en Morelia, utilizando el valor obtenido del PRACU del 10% para la producción de biodiésel donde se observa que con esta hipótesis satisface con biodiésel un 53% de la demanda actual de diésel. Cabe mencionar que con el PRACU del 30% se cubre la demanda total de Morelia y existiría un excedente promedio de 4.6 petajoules al año.

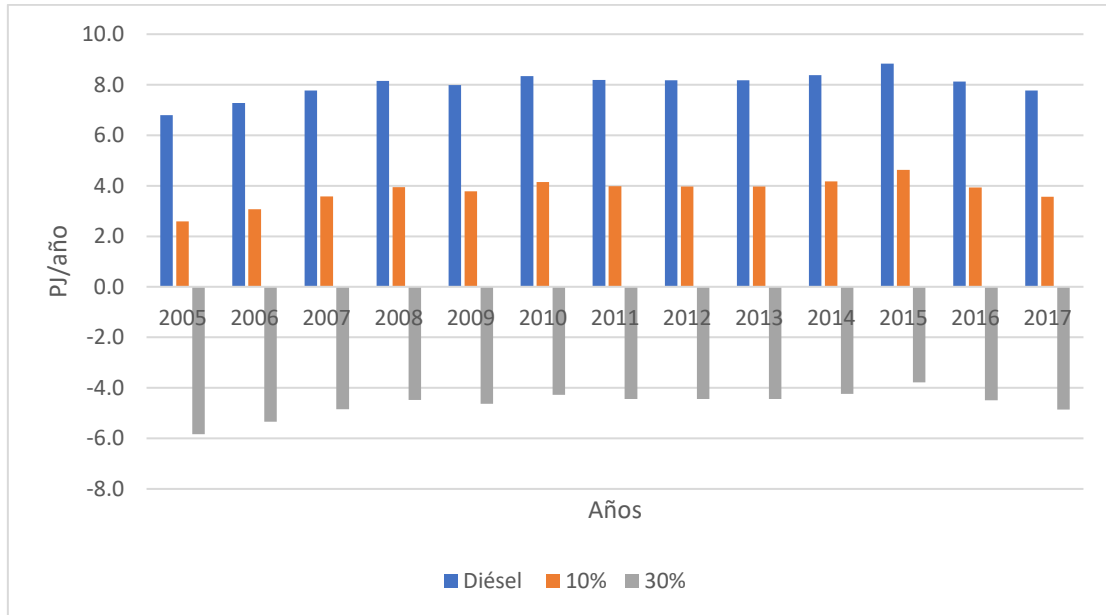
Tabla 11. Energía consumida de diésel en Morelia por autotransporte anualmente

Año	Consumo anual	Escenario PRACU 10%	
	Diésel (PJ/año)	Biodiésel (PJ/año)	Diésel (PJ/año)
2005	6.8	4.2	2.6
2006	7.3	4.2	3.1
2007	7.8	4.2	3.6
2008	8.1	4.2	3.9
2009	8	4.2	3.8
2010	8.3	4.2	4.1
2011	8.2	4.2	4
2012	8.2	4.2	4
2013	8.2	4.2	4
2014	8.4	4.2	4.2
2015	8.8	4.2	4.6
2016	8.1	4.2	3.9
2017	7.8	4.2	3.6

Nota: Información obtenida de la base de datos de la SENER sobre petrolíferos por entidad

En el Gráfico 12 se puede observar la cantidad restante de diésel para cada escenario, pues la columna de color azul nos muestra la demanda actual de diésel en la ciudad, mientras que la columna del 10% nos muestra la cantidad faltante de diésel para satisfacer la demanda de Morelia. Por otro lado, la columna de color gris muestra que al utilizar un PRACU del 30% se satisface la demanda de diésel en Morelia y habría un excedente, por lo tanto, los valores de esta columna son negativos.

Gráfico 12. Escenario sobre consumo de diésel y biodiésel a partir de aceite de cocina usado en Morelia



El uso de biodiésel en Morelia podría sustituir en un 53% el consumo de diésel, esto basándose en la hipótesis del 10% de la recolección de aceites usados a nivel nacional. La cantidad de petajoules que se podrían obtener a partir de un residuo es una cantidad considerable si lo analizamos para una ciudad.

A pesar de esto, sería más factible producir biodiésel a una escala más pequeña como el transporte de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Campus Morelia. El PUMABUS del campus realiza 16 recorridos al día, utilizando dos unidades por día. El consumo de cada unidad es de aproximadamente 125 litros a la semana, por lo que al mes por ambas unidades se consumen 1000 litros de diésel. Si se empleara una mezcla B10, se necesitarían 100 litros de biodiésel y 900 de diésel, lo cual representaría una disminución en el consumo de combustibles fósiles en el transporte universitario.

Capítulo 7. Conclusiones

- La producción de biodiésel se realizó en la planta piloto ubicada en el IIES, la cual, se reacondicionó para producir biodiésel. Se encontró que se puede aumentar el tiempo de transesterificación pues no se conoce si las resistencias utilizadas estaban en buen funcionamiento o si el flujo de la bomba era el suficiente para mezclar todo el lote de producción.
- Se realizaron pruebas de calidad para el biodiésel producido y a un biodiésel comercial. El biodiésel del IIES cumplió con los límites establecidos en las normas de densidad, viscosidad y acidez de biodiésel.
- Las emisiones de material particulado 2.5 aumentan con las mezclas de biodiésel, por lo que es necesario realizar más pruebas y garantizar la calidad del biocombustible; las impurezas o residuos del catalizador pueden provocar una mayor formación de hollín. Los resultados en este estudio muestran que la mezcla óptima para utilizar en un motor es la B10.
- Para analizar el funcionamiento del motor a diésel se midió el consumo de combustible, éste aumentó conforme se incrementó el contenido de biodiésel en la mezcla, esto se relaciona con el poder calorífico del diésel y del biodiésel utilizados.
- En México aún no es muy utilizado el biodiésel, por lo que es necesario impulsar el uso de mezclas de biocombustibles en motores de combustión, así como desarrollar estrategias para la recolección y utilización de residuos, tales como el aceite de cocina usado, aunque como fuente de producción de biodiésel no sea suficiente para satisfacer la demanda del país. Esta recuperación de aceite y producción de biodiésel sólo podría ser viable a una escala más pequeña.
- Las altas emisiones provenientes del sector transporte es un reto para el país, lo que implica la búsqueda de nuevas alternativas para solucionar esta problemática. Dentro de estas soluciones y como complemento al uso de biodiésel se propone impulsar la utilización de vehículos eléctricos, mientras que la energía que se utilice en éstos provenga de una fuente renovable; así

como el uso del transporte público eficiente pero que éste utilice energía de bajo impacto ambiental.

Recomendaciones

- Incrementar el tiempo de duración de las pruebas de medición de emisiones para garantizar una estabilidad en el funcionamiento del motor.
- Realizar las pruebas de emisiones a distintas RPM para saber cómo se comportan los gases a mayor y menor potencia.
- Realizar registros sobre temperatura del combustible antes y después de cada prueba.
- Realizar mayor número de pruebas de calidad antes de realizar las pruebas de emisiones.
- En la producción, aumentar el tiempo en la reacción de transesterificación.
- Mejorar la forma de medir el combustible consumido.
- Utilizar un motor de carro con simulaciones de frenado y aceleración.
- Dentro de los escenarios variar la recuperación de aceite ya que el consumo de aceite cambia cada año.

Bibliografía

- Citada

Agudelo, J., Bedoya, I. y Agudelo, A. (2005). Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiésel de palma. Redalyc, núm 18. Recuperado el 15 de marzo del 2017, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85201801>

Álvarez, I. (2006). *Efecto de la tecnología de los motores a diésel en el ahorro de combustible*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Álvarez, M. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. [versión electrónica]. *Economía Informa*. Vol. 4 (359), 63- 89.

Araya, P. (2009). *Efecto de la utilización de biodiesel sobre las emisiones de vehículos pesados*. Tesis de licenciatura. Universidad de Chile.

Augeri, F. (2011). Análisis de los gases de escape de los motores de combustión interna. Centro de Capacitación en Electrónica Automotriz.

Calzadías, L. (2012). *Análisis de la calidad en un prototipo para la producción de biodiésel a partir de aceites comestibles de desecho*. Tesis de química. Universidad Nacional Autónoma de México.

Castellanelli, M., De Souza, S., Silva, S. y Kailer, E. (2008). Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. *Engenharia Agrícola*, núm. 1. Recuperado el 16 de marzo del 2017, de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162008000100015

Castellanos, R. y Guevara E. (2014). *Ingeniería básica de una planta de biodiésel a partir de una mezcla de aceites comestibles vegetales de desecho para el transporte de la Ciudad de México*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cavieres, K. (s.f.). Biocombustibles de primera generación. Colegio de Ingenieros Agrónomos de Chile. Recuperado el 08 de enero del 2019, de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=959>

CONACYT. (2017). Biodiésel avanzado para México. Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología. Recuperado el 24 de mayo del 2017, de <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/biotecnologia/12789-biodiesel-avanzado-para-mexico>

Conover, W. e Iman, R. (1981). Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics. *Am Stat*. Vol 35, 124-129.

Correa, M., Valdemar, J., Úngaro, M., Bernardi, J. y Storino, M. (2007). Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de óleo de girassol. *Ciencias agrotecnológicas*, núm. 3. Recuperado el 16 de marzo del 2017, de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542008000300033

Cuellar, M. y Augusto, J. (2007). Posibilidades del biodiésel de palma y sus mezclas con diésel en Colombia y sus mezclas con diésel en Colombia [versión electrónica]. *Fedepalma*. Vol 28 (2), 63- 71.

Fajardo, J. y Navas, A. (2005). Análisis del desempeño de un motogenerador al usar biodiésel como combustible. *Redalyc*, núm 4. Recuperado el 06 de diciembre del 2018, de <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117588001.pdf>

Ferrari, L. (2007). El fin de la era del petróleo y el futuro de las geociencias en México. *Geociencias*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ferrari, L. (2013). Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas [versión electrónica]. *Revista Mexicana de Física*. Vol 59 (2), 36-41.

Flórez, A. y Rojas, A. (2009). Efecto de la proporción de mezclas biodiésel/petrodiésel en el desempeño mecánico-ambiental de motores. *Redalyc*, núm 2. Recuperado el 15 de marzo del 2017, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323541008>

Fondo de Apoyo para la Micro, Pequeña y Mediana Empresa. (2009). Informe de Mercado sobre Biocombustibles en Austria. *Exporta PYME*.

Fuentes, R. (s.f.). *Petróleo en México: Pozo de pasiones* [versión electrónica]. Woodrow Wilson International Center.

García, C, y Masera, O, (2016), Estado del arte de la Bioenergía en México. *Red Temática de Bioenergía del CONACYT*.

González, A, y Kafarov, V, (2009). Producción de biocombustibles de tercera generación: Extracción de aceite de microalgas para la producción de biodiésel. *Universidad del Quindío*.

Hackenberg, N. (2008). *Biocombustibles de segunda generación*. REDESMA.

IMCO. (2016). México ratifica el acuerdo de París sobre el cambio climático. Instituto Mexicano para la Competitividad. Recuperado el 24 de mayo el 2018, de https://imco.org.mx/medio_ambiente/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/

INECC. (2015). Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado (2017, marzo 13) de la base de datos del INECC.

Kahraman, B. (2005). Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union [version electronica]. *El Sevier*. Vol12, 542-552.

Leite, R., Moreira, F., Salvador, N. y Silva, C. (2007). Desempenho Comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. *Ciencias agrotecnológicas*, núm. 5. Recuperado el 16 de marzo del 2017, de <http://www.scielo.br/pdf/cagro/v32n5/35.pdf>

Li, Y., Tian, Y. y Xu, H. (2013). Application of Biodiesel un Automotive Diesel Engine. *Biodiesel Feedstocks, production and application*. 387-406.

Llanes, E., Rocha, J., Salazar, P., y Medrano, J. (2017). Producción e impacto del Biodiésel: Una revisión. *INNOVA*. Vol 2 (7), 59-76.

López, A. (2008). Geopolítica de petróleo y crisis mundial. *Dyna*. Vol 75 (156), 1-8.

Masjuki, H., Zaki, A. y Sapuan, S. (1996). A rapid test to measure performance, emissions and wear of a diesel engine fueled with palm oil diesel. *Jaocs*. Vol 70 (10), 10-21.

Masera, O., Coralli, F., García, C., Riegelhaupt, E., Arias, T., Vega, J., Díaz, R., Guerrero, G. y Cecotti, L. (2011). La bioenergía en México: Situación actual y perspectivas. México. Red Mexicana de Bioenergía.

Medina, I., Chávez, N., y Jáuregui J. (2012). Biodiésel, un combustible renovable. *Investigación y ciencia: De la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 55, 62-70.

Melero, A., Quintero, M. y Galindo, M. (2013). Análisis de las estrategias de mitigación y adaptación del sector transporte en la ciudad de Mexicali. *Estudios Fronterizos*. Vol 14 (28), 79-105.

Méndez, R. (2014). *Análisis Bibliométrico de la química de proceso para la transesterificación de ésteres triglicéridos a biodiesel*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Morales, F. (2015). *Análisis de Ciclo de Vida de la producción de biodiésel a partir de aceites usados*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Pérez, A., Montero, G., Ayala, R., Coronado, M., García, C. y Campbell, H. (2013). Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diésel-biodiésel [versión electrónica]. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. Vol 16 (1), 83-92.

Prehn, M., y Cumana, I. (2010) La bioenergía en México: Estudios de caso *no. 1*. México. Red Mexicana de Bioenergía.

Ramírez, A. (2014). *Obtención de Biodiésel para motores de combustión interna tipo OTTO a partir de la transesterificación de aceite de micro alga*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ramírez, J. (2012). Evaluación del uso de biodiésel obtenido a partir de aceite de cocina usado en un motor diésel. Redalyc, núm 40. Recuperado el 15 de marzo 2017, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47826850011>

REMBIO. (s.f.). ¿Qué son los biocombustibles líquidos?. Recuperado el 17 de octubre del 2017, de <http://rembio.org.mx/areas-tematicas/biocombustibles-liquidos/>

Rleegelhaupt, E., Odenthal, J. y Janeiro, L. (2016). Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento. Secretaría de Energía.

Rodrigo, J. (2009). Emisiones contaminantes- Catalizadores para motores diésel [versión electrónica]. *Mecánica y electrónica*. (39) 1-4.

Rojas, N. (2004). Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diésel y biodiésel. *Revista de ingeniería*, núm. 20. Recuperado el 13 de marzo 2017, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932004000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Ruíz, M. (2016). *Metodología de purificación del biodiésel producido en la planta experimental de RECOPE, utilizando resinas de intercambio iónico*. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica.

Ruíz, V. (2018). *Evaluación comparativa del desempeño energético, emisiones intramuros y a la atmosfera de diferentes modelos de estufas eficientes de leña*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sandoval, G. (s.f.). Resumen ejecutivo de Clúster Biodiésel Avanzado. Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía.

SENER. (2017). Balance Nacional de Energía. Secretaría Nacional de Energía. México.

SEMARNAT. (2013). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en el estado de Michoacán 2015-2024. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

SIC. (2011). Tecnologías para una movilidad en beneficio del medio ambiente: Biodiésel de segunda y tercera generación. Superintendencia de Industria y Comercio patentes.

Stratta, J. (2000). Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel. *Investigación y Desarrollo*. Recuperado el 24 de marzo del 2017, de http://www.bcr.com.ar/publicaciones/investigaciones/biocombustibles_stratta.pdf

Torossi, F. D. (2006). Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 102 (3), 43-49.

Torres, A., Castillo, V., Lugo, R., Lugo, H., Cervantes, J. y Aguilar, R. (2015) Poder calorífico inferior de biodiésel de distintas fuentes y su desempeño en el motor. Memorias del XXX Congreso Nacional de Termodinámica. México.

UN, (s.f.) Cambio Climático. Naciones Unidas. Recuperado el 23 de enero del 2019, de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>

Vásquez, E., (s.f.) Viscosidad Alta y Baja del combustible. Universidad Técnica de Ambato.

Vázquez, J. (2017). *Determinación de las emisiones intra-domiciliarias de los contaminantes CO y PM_{2.5} por el uso de la estufa Patsari, mediante la prueba de ebullición de agua WBT*. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- Imágenes

CATEDU. (s.f.). *Parámetros de diseño*. Repositorio. Centro Aragonés de Tecnologías para la Educación. Recuperado el 10 de marzo del 2017, de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4935/html/9_parmetros_de_diseo.html

García, R. (2008). *Transformación del aceite de las semillas de toronja (Citrus Paradisi) para la producción sustentable de biodiésel*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Graña, J. (2015). *Contaminación ambiental por NOX: Influencia de edad de los vehículos*. EADIC. Recuperado el 14 de marzo del 2017, de <http://www.eadic.com/contaminacion-ambiental-por-nox-influencia-de-edad-de-los-vehiculos/#>

Lafayette, C. (2012). *Internal-combustion engine*. Enciclopedia Británica. Recuperado el 10 de marzo del 2017, de <https://global.britannica.com/technology/internal-combustion-engine>

Rosas, R. (2010). *Partes principales*. Blog motores a diésel. Recuperado el 10 de marzo del 2017, de <http://contenido-del-blog.blogspot.mx/2010/07/partes-principales.html>

Toyocosta. (2014). *Diferencia entre los motores a diésel y gasolina*. Toyota. Recuperado el 10 de marzo del 2017, de <http://www.toyocosta.com/blog/diferencia-entre-motores-diesel-gasonlia/>

- Tablas

Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (s.f.). *Preguntas Frecuentes de los Biocombustibles*. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. Recuperado el 24 de marzo del 2017, de <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>

IMP. (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles que se consumen en México*. Instituto Mexicano del Petróleo. Recuperado el 28 de marzo del 2017, de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2014_inf_parc_tipos_comb_fosiles.pdf

SEMARNAT. (2015). *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Anexos

- Anexo 1

Dentro de este anexo se muestran los equipos e instalaciones utilizadas para realizar las pruebas de emisiones.

- **FGA**

Este equipo permite cuantificar emisiones en tiempo real de hidrocarburos, compuestos nitrogenados (NOx) y monóxido y dióxido de carbono durante la combustión.



Imagen A1. Equipo FGA (Imagen propia)

- **VelociCalc**

Con este equipo se obtienen los registros en tiempo real de la velocidad y temperatura del flujo.



Imagen A2. Equipo VelociCalc (Imagen propia)

- **Bomba de extracción**

Esta bomba succiona con un flujo de 16.7 L/min, con el fin de que en el ciclón se separe el material particulado 2.5 y éste se quede en el filtro de fibra de vidrio.

- **Ciclón y portador de filtro**

El objetivo de este sistema es separar las partículas que son menores a 2.5 micrómetros, esto con el fin de capturar las partículas de 2.5 micrómetros. Este ciclón necesita un flujo de 4 L/min. Una vez separadas las partículas, se quedarán en el filtro que está colocado dentro del porta filtro.

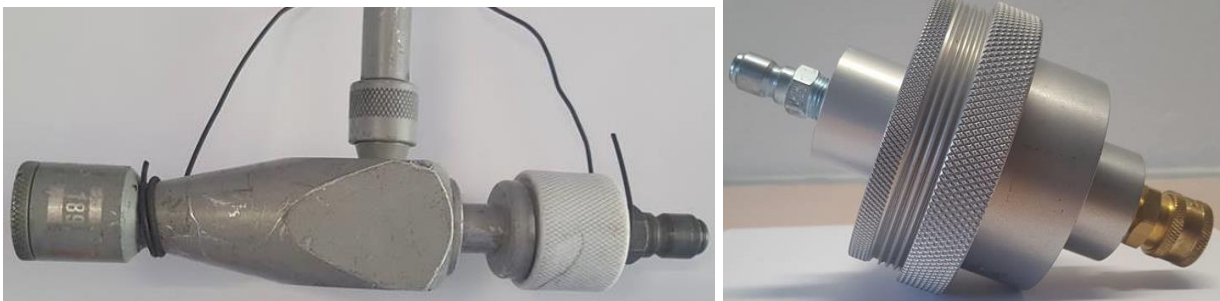


Imagen A3. Ciclón y porta filtros (Imagen propia)

- **Cuarto de pesado**

El objetivo de este cuarto es mantener los equipos como la balanza, los filtros y los gabinetes de secado libres de polvo y de humedad. Además, debe de contar con medidas de limpieza específicas, como el uso obligatorio de guantes para manipular los filtros.



Imagen A4. Cuarto de pesado del LINEB (Imagen propia)

- **Balanza semi micro-analítica**

La báscula utilizada permite pesar máximo 220 gramos y mínimo 0. 82 mg. En este equipo se pesaron los filtros antes y después de las pruebas, ya que, por medio de la diferencia del peso se obtuvo la masa total del material particulado.



Imagen A5. Balanza semi micro-analítica (Imagen propia)

- **Kit de masas estándar**

Este kit permite corroborar la exactitud de las básculas utilizadas, cuenta con 12 pesos distintos los cuáles van desde 0.001 gr a 5 g.



Imagen A6. Kit de masa estándar (Imagen propia)

- **Filtro de fibra de vidrio de 4 in**

Este filtro permite retener las partículas 2.5, las medidas de éste fue un diámetro de 4 pulgadas y diámetro de 37 milímetros.



Imagen A7. Filtro de fibra de vidrio de 4 in

- **Desionizador**

Debido a que en la superficie de los filtros puede existir estática, estas cargas deben ser eliminadas por medio de un choque eléctrico. El desionizador se utilizó antes de pesar los filtros.



Imagen A8. Desionizador (Imagen propia)

- **Gabinetes de secado para filtros**

En la parte inferior de las cámaras de secado se coloca silica gel para que ésta capture la humedad que contengan los filtros.

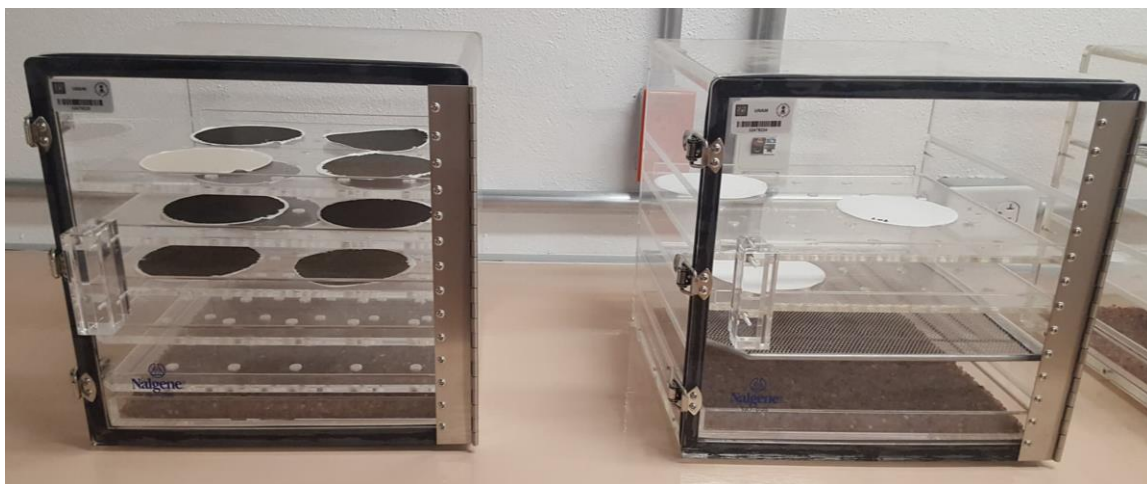


Imagen A9. Gabinetes de secado para filtros (Imagen propia)

- Anexo 2

Para la determinación de jabón, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se disolvieron 10 ml de biodiésel en 100 ml de alcohol isopropílico grado reactivo.

2. A la mezcla anterior se le agregaron 10 gotas de azul bromofenol
3. Se preparó la titulación con 0.24 gramos de ácido clorhídrico y se aforó a 250 ml con agua destilada
4. Posteriormente, se tituló el biodiésel y se obtuvieron los siguientes valores:

	Inicio	Final	Gastado
B100	26.8	28.6	1.8

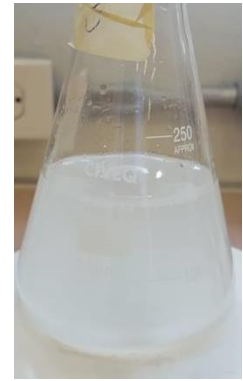
5. Se determinó las ppm de jabón que hay en nuestra muestra de biodiésel, esto se hizo por medio de la siguiente fórmula:

$$(ml \text{ de solución de ácido clorhídrico gastado}) * (304) = ppm \text{ jabón}$$

Para determinar el índice de yodo, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se pesaron 0.20 gramos de biodiésel
2. Se realizó una mezcla de ácido acético y ciclohexano al 50% cada uno
3. Al aceite pesado se le agregó 15 ml de la mezcla anterior y 25 ml de solución Wijs, se dejó reposar por 30 minutos en un lugar oscuro y cada matraz se tapó con papel aluminio.
4. Se preparó la solución para titular, la cuál consistió en aforar a 500 ml 6.2 gramos de tiosulfato de sodio pentahidratado
5. Después de la media hora, se agregó a cada matraz 100 ml de agua destilada y 25 ml de yoduro de potasio
6. Se tituló el blanco y posteriormente las demás muestras, la titulación se detenía cuando la solución adquiría un color amarillo, posteriormente se agregaron 2 ml de almidón al 1% y se siguió titulando hasta obtener un color entre blanco y transparente.
7. Para obtener el resultado se utilizó la siguiente fórmula:

$$(V_{\text{gastado blanco}} - V_{\text{gastado muestra}}) * (N) (12.69) / \text{gramos} = ppm \text{ jabón}$$



Para determinar las ceras por precipitación de frío, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se colocaron 100 gramos de biodiésel
2. Se tomó la temperatura a la que se encontraba la mezcla
3. Las mezclas se colocaron dentro de un congelador y se fue tomando la temperatura cada tres minutos
4. Se tomó lectura cuando comenzaron a aparecer cristales



Para determinar la acidez del biodiésel, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se preparó una mezcla de 75 ml, la cual era en un 50% alcohol isopropílico y 50% tolueno.
2. A la mezcla anterior se le agregaron 10 gotas de fenofaleína al 1%.
3. Se preparó la titulación con 1.5 gramos de KOH y se aforó a 250 ml con agua destilada



4. A la mezcla de tolueno y alcohol isopropílico se le agregaron 5 gramos de biodiésel.
5. Posteriormente, se tituló el biodiésel y se obtuvieron los siguientes valores.



	Inicio	Final	Gastado
Mezcla de alcohol isopropílico y tolueno	14.3	14.5	0.2
Mezcla de alcohol isopropílico, tolueno y biodiésel	14.5	14.9	0.4

6. Se obtuvo el valor ácido
7. Se obtuvo la cantidad de ácidos grasos libres