



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

**“OBTENCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y
SUSTENTABILIDAD DEL BIODIÉSEL OBTENIDO
EN LABORATORIOS DE DOCENCIA”**

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN QUÍMICA

PRESENTA

ALEJANDRO ROJAS OLIVAREZ

DIRECTOR DE TESIS

Dra. ELSA ADRIANA CAMARILLO JIMÉNEZ

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. HENOC FLORES SEGURA

Puebla, Pue.

ENERO 2025

Índice General

Índice de Tablas	4
Índice de Figuras	5
1 Introducción	6
2 Objetivos	8
2.1 Objetivo general	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3 Antecedentes	9
3.1 La revolución industrial y sus consecuencias ambientales.....	9
3.2 Energías renovables y biomasa.....	10
3.3 Biodiésel como alternativa ecológica.	12
3.3.1 Métodos de obtención de biodiésel.....	13
3.3.2 Factores que afectan el rendimiento de la reacción de transesterificación	15
3.3.3 Composición del biodiésel.	16
3.3.4 Ventajas y desventajas del uso de biodiésel	17
3.4 Normas internacionales acerca de la calidad del biodiésel.	19
3.5 Índice de acidez.	21
3.6 Densidad.	25
3.7 Viscosidad.	27
3.8 Poder calorífico.....	32
3.9 Temperatura de ignición.	36
4 Desarrollo Experimental.....	39
4.1 Obtención del biodiésel.	39
4.2 Índice de acidez	41
4.3 Densidad.	42
4.4 Viscosidad.	43
4.5 Poder calorífico.....	46
4.6 Temperatura de ignición.	49
5 Resultados y Discusión	52

5.1 Rendimiento de biodiésel.	52
5.2 Índice de acidez.	52
5.2.1 Determinación del índice de acidez del aceite residual de cocina.	52
5.2.2 Determinación del índice de acidez del biodiésel.	53
5.3 Densidad.	54
5.3.1 Determinación de la densidad del aceite residual de cocina.	54
5.3.2 Determinación de la densidad del biodiésel.	54
5.4 Viscosidad.	55
5.4.1 Determinación de la viscosidad cinemática del aceite residual de cocina.	55
5.4.2 Determinación de la viscosidad cinemática del biodiésel.	56
5.5 Calorimetría de combustión.	57
5.5.1 Determinación del poder calorífico del biodiésel.	57
5.6 Temperatura de ignición.	58
6 Conclusiones	60
7 Bibliografía	61

Índice de Tablas

No.	Título	Página
1	Nivel de gases de efecto invernadero.	9
2	Relación metanol – aceite según el catalizador utilizado.	16
3	Ácidos grasos más comunes en aceites de cocina.	16
4	Composición de ácidos grasos en aceites de cocina.	17
5	Parámetros de la norma ASTM D6751.	19
6	Parámetros de la norma EN 14214.	20
7	Poder calorífico de biodiésel obtenido de diferentes materias primas.	20
8	Valores de índice de acidez de diferentes aceites de cocina residuales.	23
9	Especificaciones del agua de calidad reactivo tipo II.	26
10	Densidad del agua a diferentes temperaturas.	27
11	Temperatura de ignición de biodiésel de diferentes materias primas.	37
12	Relación óptima para la obtención de biodiésel.	39
13	Condiciones óptimas para la reacción de transesterificación.	39
14	Densidad de etanol a 25 °C.	42
15	Densidad de agua destilada a 25°C.	43
16	Viscosidad dinámica del agua a 25 °C.	44
17	Viscosidad dinámica del etanol a 25°C.	44
18	Valores para el rendimiento del biodiésel.	52
19	Índice de acidez del aceite residual de cocina.	53
20	Índice de acidez de biodiésel.	53
21	Valores de densidad del aceite residual de cocina.	54
22	Valores para la densidad de biodiésel.	54
23	Valores de agua destilada como referente de viscosidad a 25 °C.	55
24	Valores de viscosidad del aceite residual de cocina a 40 °C.	55
25	Valores de viscosidad dinámica y cinemática del biodiésel a 40 °C.	56
26	Propiedades de los materiales involucrados durante la combustión.	57
27	Valores experimentales de la combustión de biodiésel.	57
28	Valores de la temperatura de ignición de biodiésel.	59

Índice de Figuras

No.	Título	Página
1	Gráfico del consumo de energía y su fuente de origen.	11
2	Reacción de transesterificación.	13
3	Cambios en la emisión de gases a diferentes concentraciones de biodiésel.	18
4	a) Triglicérido. b) Fosfolípido. c) Glucolípidos.	21
5	Hidrólisis de triglicéridos.	22
6	Reacción para la formación de jabón.	22
7	Molécula de fenolftaleína a diferentes pH.	24
8	Sistema para valoración volumétrica.	24
9	Tipos de picnómetros.	26
10	Proceso de autooxidación	30
11	Etapas de la reacción que genera el aumento de la viscosidad del biodiésel.	30
12	Viscosímetros de capilar de vidrio.	31
13	Partes de un calorímetro de combustión.	34
14	Termograma de un experimento de combustión.	34
15	Medidor de la temperatura de ignición de copa cerrada Pensky – Martens.	36
16	Medidor de la temperatura de ignición de Cleveland.	37
17	Embudo de separación con biodiésel y glicerol.	40
18	Picnómetro de 5 cm^3 utilizado en este trabajo.	42
19	Viscosímetro tipo Ostwald.	44
20	Sistema para medir la viscosidad.	45
21	Calorímetro de combustión de bomba estática.	46
22	Equipo para realizar las cápsulas de polietileno.	47
23	Aparato para la determinación de la temperatura de ignición basado en el método de copa abierta de Cleveland.	50
24	Sistema diseñado para la determinación de la temperatura de ignición.	50

1 Introducción

En la mitología griega se cuenta que Prometeo robó el fuego del conocimiento en el monte Olimpo para dárselo a la humanidad. Desde aquel momento la humanidad se ha nutrido de él, jugando y dando lugar a innovaciones.

Todas las innovaciones que se han desarrollado a lo largo de la historia han llevado a la humanidad hasta la vida actual, donde se cuenta con diferentes productos y servicios que le facilitan la vida, pero requieren de energía para funcionar.

Por muchos años la mayor fuente de obtención de energía fue a través de la quema de combustibles fósiles, generando consecuencias como:

- La dependencia de los combustibles fósiles.
- El cambio climático.

La quema de combustibles fósiles genera la emisión de gases nocivos como $\text{CO}_2(\text{g})$, $\text{CH}_4(\text{g})$ y $\text{N}_2\text{O}(\text{g})$, que contribuyen a la contaminación atmosférica y al calentamiento global. Después de años de usar combustibles fósiles, se han buscado alternativas para cubrir la demanda ya que éstos son recursos finitos.

Las energías renovables son una fuente de energía que se obtiene a partir de recursos naturales. Existen diferentes tipos de energías renovables, por ejemplo, la energía solar, eólica y mareomotriz que obtienen la energía a partir de la luz solar, el aire y las mareas respectivamente.

Además, existe una fuente de energía renovable conocida como biomasa que se basa en el uso de materia o desechos orgánicos para obtener energía. Este tipo de energía es sostenible con una administración adecuada de los recursos. Entre la biomasa se encuentra el biodiésel como una alternativa al diésel obtenido de fósiles, el biodiésel es un biocombustible que se obtiene a partir de grasas, aceites comestibles y aceites residuales.

En la Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla dentro del programa de la carrera de Químico Farmacobiólogo, se lleva a cabo una práctica de obtención de biodiésel realizada por los estudiantes. Mediante esta práctica se estudia el tipo de reacción y se promueve la obtención de biodiésel a partir de aceites residuales. Sin embargo, el biodiésel obtenido no se caracteriza ni se dispone para realizar ninguna actividad posterior.

En el presente trabajo se reporta la obtención de biodiésel a partir de aceites residuales, la determinación de algunas propiedades fisicoquímicas y su comparación con los valores reportados en la literatura. Además de la determinación de algunas propiedades

establecidas por las normas internacionales, se obtuvo el poder calorífico por calorimetría de combustión para ampliar su caracterización, de esta forma proponer el uso del biodiésel para otras actividades académicas, impulsando un ciclo de reciclaje, producción y aplicación del biodiésel.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Producir biodiésel a partir de aceite residual de cocina y caracterizarlo con base en las normas internacionales.

2.2 Objetivos específicos

- Producir biodiésel mediante una reacción de transesterificación, utilizando un catalizador básico.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas del aceite residual de cocina y biodiésel, como densidad, viscosidad, temperatura de ignición, índice de acidez y poder calorífico, siguiendo las especificaciones de las normas ASTM D6751 y EN 14214.
- Determinar el poder calorífico del biodiésel obtenido a través de calorimetría de combustión.
- Comparar los resultados obtenidos con los parámetros establecidos en las normas internacionales.

3 Antecedentes

3.1 La revolución industrial y sus consecuencias ambientales

Todas las innovaciones del hombre lo han llevado a grandes cambios y revoluciones que han cimentado el presente. En una de estas revoluciones se produjo una transición en la que los métodos de producción manuales no ofrecían los resultados esperados, lo que llevó a un auge en el uso de máquinas, los procesos de fabricación, la producción de hierro y el uso de los combustibles fósiles, iniciando lo que se conoce como la primera revolución industrial [1].

A partir de la primera revolución industrial, las actividades humanas han liberado grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, como metano y óxido nitroso.

Durante la primera revolución industrial los niveles atmosféricos de CO₂(g) eran aproximadamente de 280 partes por millón (ppm). Actualmente, esa cifra ha alcanzado los 415 ppm [2] con una tasa de incremento de 2.6 ppm por año [3].

En la tabla 1 se compara el nivel de los gases de efecto invernadero en la atmósfera durante la revolución industrial con los niveles actuales.

Tabla 1. Nivel de gases de efecto invernadero.

Gases de efecto invernadero	Pre-Revolución Industrial (Siglo XVIII)	Actualmente (2024)
Dióxido de carbono	280 ppm [4]	425.55 ppm [5]
Metano	722 ppb [4]	1920.56 ppb [6]
Óxido Nitroso	270 ppb [4]	336.58 ppb [6]

ppb: Partes por billón.
ppm: Partes por millón.

Como se muestra en la tabla 1, la concentración de CO₂(g) ha incrementado aproximadamente 50 %, el CH₄(g) ha aumentado más de 250 % y N₂O(g) ha aumentado un 20 %. Los aumentos en las concentraciones de los gases de efecto invernadero son el resultado de la actividad industrial y la quema de combustibles fósiles. En la actualidad existe una dependencia de los combustibles fósiles para mantener las comodidades de la vida moderna. Según la Administración de Información Energética de los Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) el consumo de energía total en el año 2023 provino en un 38 % de petróleo, el 36 % de gas natural y el 9 % de carbón [7].

Aunque el uso de combustibles fósiles a nivel industrial es visto como el mayor productor de gases de efecto de invernadero, en realidad es el sector eléctrico el que libera una mayor cantidad de CO₂(g) a la atmósfera, seguido por el sector de transporte [8].

Los gases que se liberan por la quema de combustibles fósiles provocan lo que se conoce como efecto invernadero. El efecto invernadero sucede cuando la energía solar que llega a la tierra es parcialmente absorbida por la biosfera, mientras que la energía sobrante es devuelta al espacio, sin embargo, parte de esta última es absorbida en la atmósfera por gases como CO₂(g), CH₄(g) y N₂O(g) incrementando la temperatura ambiental [9].

El efecto invernadero es importante ya que sin este proceso la tierra no tendría una temperatura apta para la vida humana. Pero a una mayor cantidad de gases de efecto invernadero, aumenta la temperatura del planeta, generando diversos problemas como los que se describen a continuación [10]:

- La temperatura superficial de la tierra fue 1.09 °C mayor en el periodo 2011 – 2020 que durante el período de 1850 a 1900.
- El nivel medio del mar incrementó 0.20 m durante 1901 y 2018.
- En los últimos 50 años ha disminuido el crecimiento agrícola.
- El calentamiento global ha provocado la acidificación de los océanos afectando la pesca.
- Aumenta el riesgo de escasez de agua en zonas áridas.
- Aumento de las olas de calor en ciudades alrededor del mundo.
- La salud física y mental se ven afectadas por el aumento de la temperatura.
- La búsqueda de zonas aptas para la agricultura genera una vulnerabilidad de los ecosistemas y una competencia por los recursos.

3.2 Energías renovables y biomasa

Para reducir el uso de combustibles fósiles, se han propuesto diferentes alternativas que generen una menor cantidad de gases de efecto invernadero. Entre estas propuestas se encuentran el uso de la energía solar, eólica, geotérmica, mareomotriz y de biomasa [11]. Las propuestas mencionadas se conocen como energías renovables porque se originan de fuentes naturales que se reponen, así como se consumen y, además, se encuentran en cantidades abundantes.

Aún con la gran variedad de energías renovables, su aplicación es mucho menor en comparación con los combustibles fósiles. Por ejemplo, en Estados Unidos solamente el 9 % del consumo de energía proviene de energías renovables, siendo los biocombustibles

el de mayor uso y la energía geotérmica el de menor uso [7]. En la Figura 1 se muestra un gráfico del consumo energía en Estados Unidos según su fuente de origen.

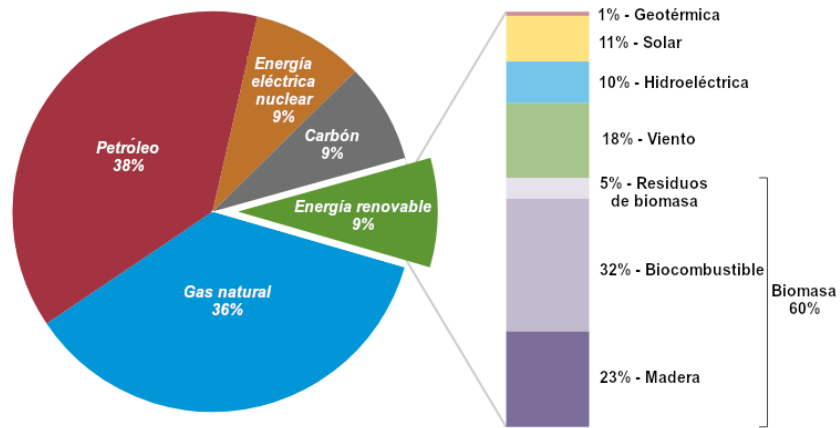


Figura 1. Gráfico del consumo de energía y su fuente de origen.

Dentro del área de energías renovables, se observa a la biomasa como el sector de energía más utilizada. La biomasa es un recurso que proviene de materia biodegradable originada de desechos y residuos de origen biológico que proceden de diferentes áreas como agricultura, acuicultura y silvicultura, además de algunos residuos biodegradables provenientes de la industria [11].

Las ventajas que ofrece el uso de las energías provenientes de la biomasa son [12]:

- Fuente de energía renovable, si la materia prima se administra correctamente.
- La materia orgánica como cultivos y residuos urbanos están disponibles si se gestionan de una forma adecuada y sostenible.
- En algunos procesos la cantidad de carbono que se reabsorbe llega a ser mayor que la cantidad de carbono liberada durante la combustión de biomasa.

Las desventajas del uso de biomasa son [12]:

- La materia prima debe reponerse, así como es utilizada para que pueda considerarse renovable.
- Se necesita de tierra fértil y apta para cultivo, generando una competencia entre el uso del campo para alimento o biomasa.
- La biomasa no genera la misma cantidad de energía de los combustibles fósiles, entonces se necesita mezclar para ser económicamente viable.

Existen dos formas de obtener energía a partir de biomasa, de manera directa e indirecta [12]. La manera directa es quemando la biomasa y generando energía en forma de calor, este proceso conlleva un pretratamiento del material como la deshidratación. La manera indirecta es procesando la biomasa a través de diferentes técnicas obteniendo un líquido combustible.

En México, el consumo de aceite comestible durante el periodo 2022-2023 se estima que fue de 2,200,000 Toneladas Métricas (MT) y se pronostica que el periodo 2023-2024 sea de 2,250,000 MT [13]. Un estudio en 2011 [14], estimó que solo el 11 % del aceite consumido en México está disponible para su uso en biocombustibles.

El aceite vegetal usado para alimentos se convierte en aceite residual de cocina que no es apto para el consumo humano, por lo que se genera un problema al no tener un lugar donde disponer las grandes cantidades de aceite residual, además, se genera un problema ambiental si se desecha en el drenaje porque puede provocar bloqueos y en plantas de tratamiento por la contaminación del agua y la tierra [14].

Además del aumento en los precios del crudo, la inminente escasez del petróleo, la preocupación por el medio ambiente y los problemas que generan se destaca la necesidad del cambio de combustibles fósiles a fuentes de energía renovable.

3.3 Biodiésel como alternativa ecológica

Una alternativa al diésel obtenido de combustibles fósiles es el biodiésel, se define como un combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga (FAME, por sus siglas en inglés), derivados de aceites comestibles o grasas animales que se componen de triglicéridos.

Actualmente se generó un interés en el uso de aceites vegetales para la producción de biodiésel debido a su baja emisión de gases contaminantes, es biodegradable y proviene de un origen renovable en comparación del petrodiésel que proviene de combustibles fósiles finitos.

Como se mencionó previamente, el biodiésel se puede obtener a partir de aceites vegetales, pero también se puede utilizar aceite residual de cocina sin comprometer la calidad del biodiésel, por lo que, además de ser renovable resuelve el problema de la disposición de aceites residuales.

3.3.1 Métodos de obtención de biodiésel

El biodiésel es producido por un proceso químico conocido como reacción de transesterificación, donde la materia prima que contiene triglicéridos se hace reaccionar con metanol en presencia de un catalizador, obteniendo ésteres monoalquílicos de ácidos grasos y glicerol como subproducto [14].

La reacción de transesterificación se muestra en la figura 2, en la cual un triglicérido (éster) y un metanol reaccionan para dar como producto ésteres de metilo de ácidos grasos (biodiésel) y glicerol [15].

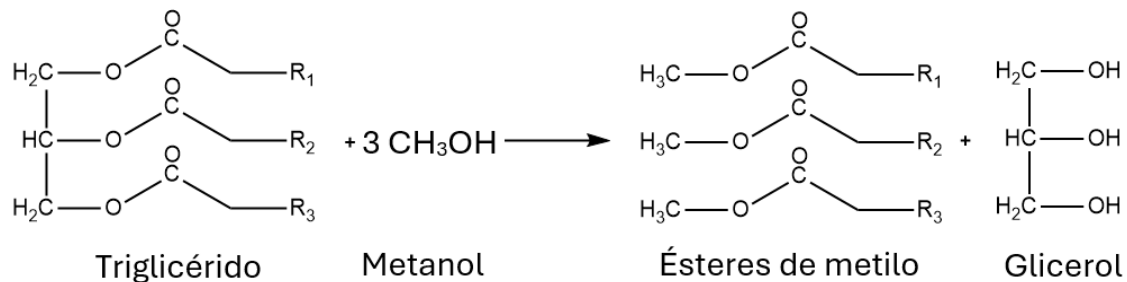


Figura 2. Reacción de transesterificación.

Existen diferentes métodos para la producción de biodiésel que se diferencian por el catalizador utilizado. A continuación, se presentan algunos ejemplos [16]:

Reacción de transesterificación utilizando un catalizador básico.

La catálisis básica es la técnica más utilizada para la obtención de biodiésel debido a que el proceso es económico y no requiere de temperaturas y presiones altas.

El rendimiento final puede alcanzar hasta un 98 % si la materia prima está en buenas condiciones, es decir, con un bajo contenido de humedad y una mínima presencia de ácidos grasos libres. Los ácidos grasos son cadenas hidrocarbonadas con un grupo carboxilo (-COOH) en un extremo. Cuando no se encuentran unidas a otras moléculas se conocen como ácidos grasos libres y son un indicador de degradación.

La desventaja del uso de esta técnica es que con un alto contenido en ácidos grasos libres la reacción da como resultado la formación de jabón, disminuyendo la eficiencia del catalizador e incrementando la viscosidad del biodiésel. En este caso, es necesario el pretratamiento de la materia prima para reducir la humedad y la cantidad de ácidos grasos presentes.

Reacción de transesterificación utilizando un catalizador ácido.

Como se mencionó, la catálisis básica tiene la desventaja de que la materia prima no debe tener un contenido alto de humedad y ácidos grasos libres, pero en la catálisis ácida no es un problema, ya que aún en aceites vegetales con un alto índice de ácidos grasos libres se puede producir biodiésel directamente. La desventaja y la razón por la cual no es tan utilizada este tipo de transesterificación es por su prolongado tiempo de reacción y el uso de equipo costoso.

Reacción de transesterificación utilizando catalizadores ácido – base.

En la transesterificación ácido – base o también conocida como transesterificación en dos etapas, se utiliza un catalizador ácido y uno básico, obteniendo las ventajas que ambos ofrecen.

En el primer paso, el catalizador ácido actúa eliminando los ácidos grasos libres presentes, reduciendo la cantidad para mejorar la calidad del proceso. Posteriormente en la segunda etapa, se utiliza el catalizador básico para realizar la reacción de transesterificación. Aún con las ventajas que ofrece esta catálisis, se tiene el problema de la eliminación del catalizador en ambas etapas y el alto costo que implica el uso de ambos catalizadores.

Reacción de transesterificación utilizando un catalizador heterogéneo.

A diferencia de otros tipos de catalizadores como ácidos y básicos, los catalizadores heterogéneos se encuentran en una fase distinta a la de los reactivos. Su ventaja radica en la facilidad con la que pueden separarse al finalizar la reacción, lo que permite su reutilización, convirtiéndolos en una opción más sostenible y ecológica. Algunos ejemplos de catalizadores heterogéneos son las zeolitas y las resinas sulfónicas.

La principal desventaja es que se requieren condiciones de presión y temperatura elevadas, tienen un rendimiento menor en comparación con otro tipo de catalizadores (ácido y básico) y con el tiempo, el catalizador tiende a desactivarse.

Reacción de transesterificación utilizando un catalizador enzimático.

En la catálisis enzimática se utilizan biocatalizadores como lipasas, teniendo como ventajas una mayor eficiencia, son selectivas al catalizar la hidrólisis de ácidos grasos y favorecen la formación de ésteres de cadena lineal. Además, que las condiciones de reacción involucran presiones y temperaturas bajas.

Las desventajas de su uso son el costo y dificultad de su producción, ya que es necesario optimizar los factores de la reacción y mantenerlos controlados durante la reacción.

3.3.2 Factores que afectan el rendimiento de la reacción de transesterificación

Para una reacción de transesterificación se deben tomar en cuenta los diversos factores que están implicados en el rendimiento. A continuación, se enlistan los principales factores [15]:

- *Tiempo de reacción:*

En una reacción de transesterificación se debe cuidar el tiempo de reacción, ya que un tiempo de reacción corto (<50 min.) da como resultado una reacción incompleta, sin embargo, un tiempo de reacción prolongado (>60 min.) puede disminuir el rendimiento ya que genera la desaparición de ésteres, provocando la formación de jabón y aumentando la viscosidad, por lo que se dificulta la purificación del biodiésel.

- *Temperatura de reacción:*

La temperatura de reacción varía de acuerdo con cada tipo de aceite debido a que cada aceite tiene una composición de ácidos grasos diferente. Comúnmente la temperatura de reacción debe ser menor a la temperatura de ebullición del metanol para evitar su evaporación, además, la alta temperatura de reacción afecta a los ésteres generando la formación de jabón.

- *Tipo de catalizador y concentración:*

En un estudio realizado [17] se demostró que, a una mayor concentración de catalizador, se obtuvo un mayor rendimiento en la reacción de transesterificación. Se observó que al colocar un catalizador a una concentración de 0.25 % en peso dio como resultado una reacción lenta y un rendimiento de solo 60 %. Al aumentar la concentración del catalizador en un rango de (0.5 – 1) % el rendimiento aumento (94 – 99) %.

La desventaja en el aumento en la concentración del catalizador es la dificultad para eliminarlo y un posible aumento en la formación del jabón y la viscosidad.

- *Cantidad de metanol:*

La estequiometría de la reacción de transesterificación establece que se requieren tres moles de metanol y un mol de triglicérido para dar como productos tres moles de biodiésel y un mol de glicerol. La cantidad de metanol puede variar dependiendo del tipo de catalizador que se utilice, pero comúnmente se recomienda un exceso de metanol para

conducir a la reacción hacia la derecha y obtener una mayor conversión de reactivos a productos. Esto se debe a que, al proporcionar un exceso de reactivo, se asegura que las moléculas del reactivo limitante tengan mayor probabilidad de interactuar, aumentando la formación del producto. En la tabla 2, se presentan las relaciones metanol – aceite según el catalizador sugeridas por Mainali et al. [15].

Tabla 2. Relación metanol – aceite según el catalizador utilizado.

Catalizador	Relación metanol – aceite
Ácido	30:1 [15]
Básico	6:1 [15]
Heterogéneo	1:15 [15]

- *Calidad de la materia prima:*

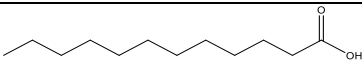
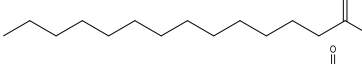
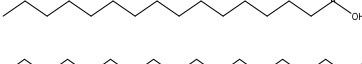
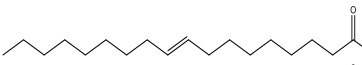
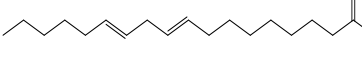

Para obtener los rendimientos deseados, es necesario que la materia prima tenga una alta calidad, es decir, un bajo contenido de humedad y ácidos grasos libres. De lo contrario, se producirá una reacción de saponificación, generando jabón como producto no deseado.

3.3.3 Composición del biodiésel.

El biodiésel se conforma de una mezcla de numerosas especies de ácidos grasos de ésteres metílicos (FAME), estos se obtienen a partir de la reacción de transesterificación de los triglicéridos del aceite de cocina que a su vez se componen de una mezcla de ácidos grasos. Por lo que la composición de FAME en el biodiésel, dependerá del ácido graso mayoritario en el aceite de cocina.

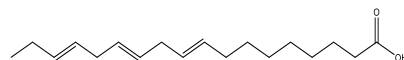
En la tabla 3 se presentan los ácidos grasos más comunes en aceites de cocina y en la tabla 4 se encuentran algunos aceites con su composición [14].

Tabla 3. Ácidos grasos más comunes en aceites de cocina.

Nombre Común	Abreviatura	Fórmula Molecular	
Láurico	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$	
Mirístico	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$	
Palmítico	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$	
Estérico	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$	
Oleico	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$	
Linoleico	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$	

Linolénico

18:3

 $C_{18}H_{30}O_2$ **Tabla 4.** Composición de ácidos grasos en aceites de cocina.

Aceite Vegetal	Porcentaje de ácido graso presente en el aceite vegetal						
	Láurico	Mirístico	Palmítico	Estérico	Oleico	Linoleico	Linolénico
	%	%	%	%	%	%	%
Canola	---	---	---	2.0	60.4	21.2	9.6
Coco	47.7	18.5	9.1	2.7	6.8	2.1	0.1
Maíz	---	---	11.5	1.9	26.6	58.7	0.6
Soya	0.1	0.1	11.6	3.9	23.7	53.8	5.9
Girasol	0.1	0.1	6.4	3.6	21.7	66.3	1.5

3.3.4 Ventajas y desventajas del uso de biodiésel

La producción de biodiésel a partir de aceites vegetales reciclados cuenta con varias ventajas que impulsan su uso a mayor escala, por ejemplo, si se produce a partir de los desechos generados en casas, cocinas e industrias, se contribuye con la solución al problema de manejo de esos desechos que en otro caso terminan contaminando y afectando la infraestructura pública, ocasionando la corrosión del metal y concreto de las alcantarillas [14]. Además, que el uso de mezclas de biodiésel con diésel en los motores de combustión genera una menor emisión de gases de efecto invernadero.

En la figura 3 se muestra un gráfico que relaciona el porcentaje de biodiésel en una mezcla de biodiésel – diésel, con los cambios porcentuales en las emisiones de distintos contaminantes: $NO_x(g)$, PM, $CO(g)$ y $HC(g)$. El eje X representa la proporción de biodiésel en la mezcla con diésel, variando del 0% (diésel) al 100%(biodiésel.) El eje Y indica el cambio (%) en las emisiones de los contaminantes al usar biodiésel en comparación con diésel. Los valores positivos significan un aumento en las emisiones, mientras los valores negativos indican una disminución [18].

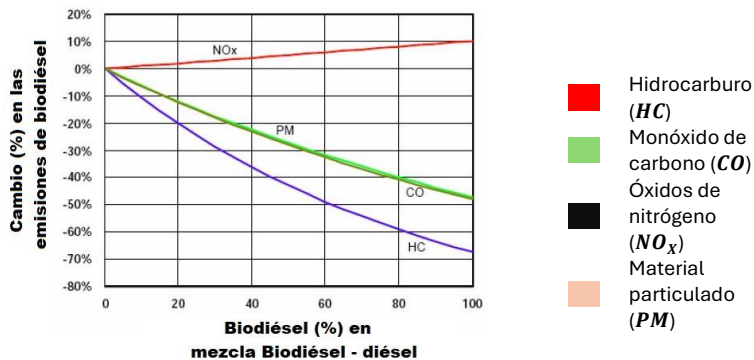


Figura 3. Cambios en la emisión de gases a diferentes concentraciones de biodiésel.

En la figura 3 se logra apreciar como a un mayor porcentaje de biodiésel, las emisiones de CO, NO_x y PM disminuyen. Las emisiones de CO₂ liberadas durante la combustión, se compensan con el dióxido de carbono capturado por las plantas que se utilizan para la producción de aceite para biodiésel [19].

Existe un debate entre si la materia prima, como los aceites vegetales, se les debe de dar una prioridad hacia su uso para la producción de biodiésel o hacia la batalla contra la hambruna que existe en el mundo. Es por tal razón que es recomendable la producción de biodiésel a partir de los desechos del aceite vegetal y la grasa animal.

La recolección de biodiésel es un tema que se debe planear, el aceite vegetal residual proviene de diferentes fuentes, a partir del ámbito doméstico, comercial e industrial [19]. Se debe formular una logística que sea apta para conectar a los lugares que recolectan el aceite vegetal residual con los lugares que realizan el procedimiento de convertir la materia prima en biodiésel y que siga siendo económicamente viable. El aceite vegetal que se ocupa en restaurantes e industrias para fritura puede tener cualidades que los demás aceites no tienen. Por ejemplo, el aceite de cocina se expone a altas temperaturas, aire y humedad. Las condiciones en las que se encuentra el aceite pueden provocar reacciones hidrolíticas, oxidativas y térmicas. Además, no es sencillo conocer el grado de degradación del aceite residual por las variables que intervienen en el proceso de fritura como temperatura, tiempo de calentamiento o la composición del alimento [16].

El biodiésel que se encuentra comercialmente no puede ser utilizado al 100 % en motores de combustión diésel, por lo que se utiliza una mezcla que se nombra dependiendo de la cantidad de biodiésel – diésel, ejemplo, la mezcla B20 y B5 contiene 20 % y 5 % de biodiésel respectivamente y el resto petrodiésel. Para mezclas arriba del B20 se necesita modificar el motor para ajustarse a las propiedades físicas del biodiésel y que no afecte el rendimiento del motor.

3.4 Normas internacionales acerca de la calidad del biodiésel

A principios del siglo XX Rudolph Diesel presentó en la convención de Paris el motor diésel utilizando solamente aceite de cacahuete como combustible. El motor funcionaba con distintos aceites vegetales a altas temperaturas [19]. La idea de utilizar aceite residual de cocina como una alternativa para la producción de biodiésel fue propuesta en 1983 [20] y años más tarde comenzó a comercializarse.

Para que el biodiésel pueda ser utilizado en motores de combustión y comercializado debe cumplir con ciertos estándares de calidad. Debido a esto, se han publicado diferentes normas de calidad, una de ellas es la establecida por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). La ASTM es una organización reconocida por el desarrollo y publicación de normas técnicas para materiales, productos y sistemas. Más de 12,000 normas de la ASTM se aplican en todo el mundo [21].

La ASTM publicó una norma donde describe las características que debe cumplir el biodiésel, esta es la norma ASTM D6751 que abarca las especificaciones estándar para la mezcla de biodiésel (B100) para combustibles destilados. En la norma se especifica la definición de biodiésel, la terminología, los métodos de análisis, las normas de referencia y los parámetros que debe cumplir el biodiésel. En la tabla 5 se presentan algunas propiedades y los límites establecidos para el biodiésel.

Tabla 5. Parámetros de la norma ASTM D6751.

Propiedad	Unidad	Límite
Temperatura de ignición	°C	130 mínimo
Densidad	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.880
Viscosidad cinemática	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	1.9 – 6.0
Índice de acidez	$\text{mg}(\text{KOH}) \cdot \text{g}^{-1}$	0.5 máximo
Número de cetano	---	47 mínimo
Temperatura de niebla	°C	-3 a -12
Residuos de carbono	% m/m	0.050 máximo
Ceniza sulfatada	% masa	0.002 máximo
Agua y sedimento	% volumen	0.005 máximo
Glicerina libre	% masa	0.020 máximo

Valores obtenidos de la referencia [22].

Las normas europeas (EN, por sus siglas en inglés) son estándares técnicos que especifican los requerimientos de productos, producciones, procesos, servicios y métodos de análisis, son desarrolladas y publicadas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) para el desarrollo del mercado europeo de bienes y servicios [23].

El comité europeo publicó la norma EN 14214 donde establece los parámetros que deben cumplir los combustibles de ésteres metílicos de ácidos grasos para su uso en motores diésel, además de los métodos de ensayo que se deben realizar para cada propiedad. En la tabla 6 se presentan algunas propiedades de la norma EN 14214.

Tabla 6. Parámetros de la norma EN 14214.

Propiedad	Unidad	Límite
Temperatura de ignición	°C	101 mínimo
Densidad	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.860 – 0.900
Viscosidad Cinemática	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	3.5 – 5.0
Índice de acidez	$\text{mg (KOH)} \cdot \text{g}^{-1}$	0.5 máximo
Número de cetano	---	51 mínimo
Temperatura de niebla	°C	---
Residuos de carbono	% m/m	0.3 máximo
Ceniza sulfatada	% masa	0.02 máximo
Agua y sedimento	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	500
Glicerina libre	% masa	0.02 máximo

Valores tomados de la referencia [24].

Un valor importante y que se considera en el presente trabajo es el poder calorífico del biodiésel. Aunque este parámetro no se menciona en las normas ASTM D6751 y EN 14214, se tomó como referencia otra norma relacionada con el uso del biodiésel como combustible para calefacción, así como varios artículos científicos que abordan este tema.

En la tabla 7 se muestran valores de poder calorífico de diferentes artículos que utilizaron aceite residual de cocina como materia prima para la producción de biodiésel. Basado en la información recolectada por Sakthivel et al. [25] se puede establecer que el poder calorífico del biodiésel obtenido a partir de aceite residual puede estar en un intervalo de (-35.401 – -43.210) $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$.

Tabla 7. Poder calorífico de biodiésel obtenido de diferentes materias primas.

Materia prima del biodiésel	Poder calorífico $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$
Residuo de aceite de palma para freír	-38.730 [26]
Aceite de cocina residual de palma	-39.767 [27]
Aceite de cocina residual De canola y soya	-37.900 [28]
Aceite de cocina residual	-35.401 [29]
Aceite de cocina residual	-41.200 [30]
Aceite de cocina residual	-43.210 [31]

3.5 Índice de acidez

Para determinar si la calidad de un biodiésel producido es la adecuada para su uso en motores, se deben llevar a cabo diferentes análisis. En el ámbito universitario se realiza la obtención del biodiésel utilizando el material y reactivos disponibles, los análisis que se llevan a cabo para determinar la calidad del biodiésel, son la medición del rendimiento final y el índice de acidez.

Es importante que un combustible no contenga altas cantidades de compuestos que puedan afectar la combustión, generando una menor potencia o un aumento en los gases nocivos y afectar el rendimiento del motor. De igual manera en el biodiésel se realizan análisis para determinar su calidad y permitir su uso, los parámetros utilizados se basan en las normas previamente mencionadas y pueden ser de los siguientes tipos:

- Propiedades físicas: Permite conocer si el flujo es el adecuado para su uso en un motor, en esta clasificación entran propiedades como densidad y viscosidad.
- De combustión: Se basan en conocer si la energía que liberan durante la combustión es la suficiente, como el poder calorífico.
- Sustancias contaminantes: Informa si cuenta con una cantidad considerable de componentes ajenos que puedan afectar el rendimiento del motor, como índice de acidez, glicerina, etc.

El primer análisis que se realiza en el biodiésel es la obtención del índice de acidez o también conocido como valor ácido. Como se mencionó anteriormente, los ácidos grasos son un tipo de ácido carboxílico (con el grupo funcional $-COOH$) con una larga cadena de hidrocarburos que se encuentra en la grasa animal, aceite vegetal y membranas celulares [32]. Los ácidos grasos forman parte de moléculas más grandes como los triglicéridos, fosfolípidos y glucolípidos (Figura 4).

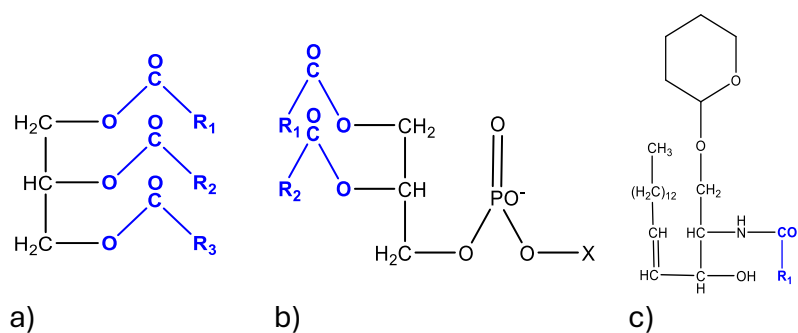


Figura 4. a) Triglicérido. b) Fosfolípido. c) Glucolípidio.

Los ácidos grasos libres son moléculas individuales que no se encuentran unidos a otras moléculas debido a que no se encuentran esterificadas. Éstas se encuentran en cantidades relativamente pequeñas en alimentos y aceites comestibles, la mayor parte se elimina

durante el refinado de aceites vegetales para evitar problemas en el aceite como un sabor desagradable y una reducción en el punto de humo.

La presencia de ácidos grasos libres en el aceite vegetal es inevitable, aunque su porcentaje es bajo, no se puede evitar su formación. Durante el uso de aceite para fritura, ocurre un intercambio de masa y calor durante el proceso entre la comida, la humedad y el aire del entorno provocando varias reacciones químicas en el aceite como hidrólisis y polimerización que decrecen la calidad del aceite, tornándolo oscuro y aumentando su viscosidad [33].

En la figura 5 se muestra el proceso de hidrólisis que conlleva el rompimiento de enlaces en triglicéridos con la presencia de agua y calor que da como producto ácidos grasos libres.

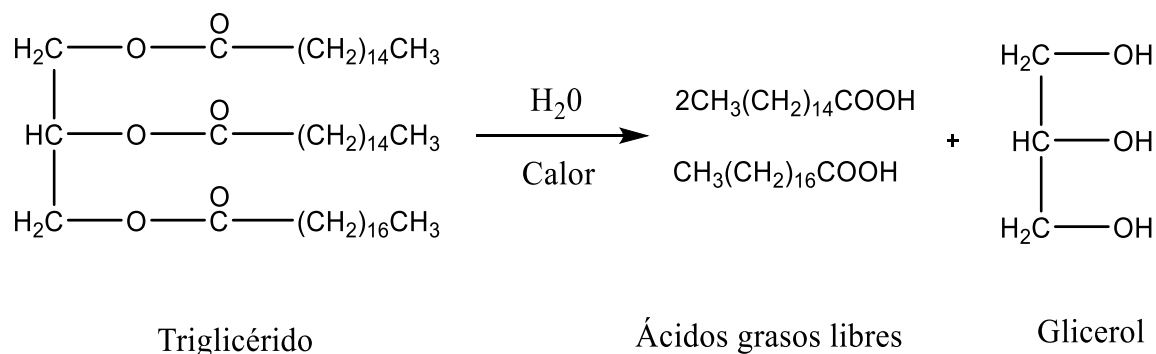


Figura 5. Hidrólisis de triglicéridos.

La presencia de una gran cantidad de ácidos grasos libres genera un problema al realizar el proceso de transesterificación, debido a que, al utilizar un catalizador básico, el metal alcalino (sodio o potasio, según sea el caso) reacciona y da como resultado la formación de jabón (Figura 6).

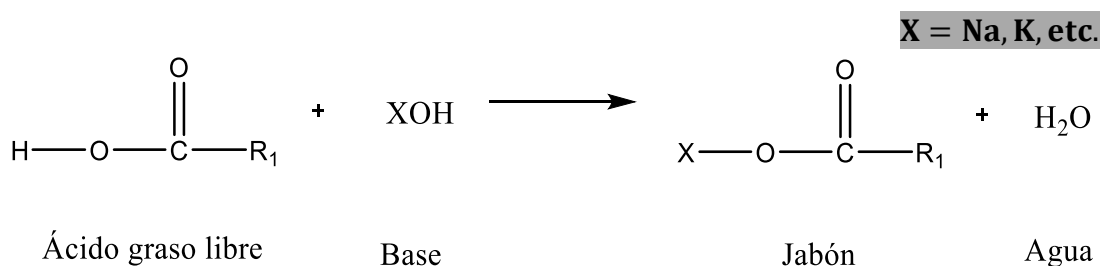


Figura 6. Reacción para la formación de jabón.

El parámetro que indica la cantidad de ácidos grasos libres en el combustible se conoce como índice de acidez. El índice de acidez es una medida que se describe como la cantidad de miligramos necesarios de una base (usualmente KOH) para poder neutralizar los ácidos

grasos libres que se encuentran en un gramo de la muestra (grasa animal, aceite vegetal, etc.).

Las normas ASTM D6751 [22] y EN 14214 [23] indican que el índice de acidez del biodiésel comercial es $0.5 \text{ mg(KOH)} \cdot \text{g}^{-1}$. Basado en la información recolectada por Nayak et al. [33], en la tabla 8 se presentan los índices de acidez de diferentes aceites de cocina residuales, se observan valores altos y variables en comparación con el que establecen las normas.

Tabla 8. Valores de índice de acidez de diferentes aceites de cocina residuales.

Tipo de aceite	Índice de acidez $\text{mg(KOH)} \cdot \text{g}^{-1}$
Soya	1.15
Girasol	1.21
Mostaza	1.5
Palma	1.75
Olivo	6.6

Un índice de acidez menor a $0.5 \text{ mg(KOH)} \cdot \text{g}^{-1}$ garantiza que el uso de biodiésel no afectará el rendimiento del motor y no provocará la corrosión del motor y tanques de almacenamiento. En cambio, un índice de acidez superior a $0.5 \text{ mg(KOH)} \cdot \text{g}^{-1}$ se asocia con el aumento en la viscosidad [34], lo que provoca una disminución en la eficiencia de la combustión y resulta en una menor potencia y un mayor consumo de combustible.

La metodología para obtener el índice de acidez es a través de una valoración.

Las valoraciones son de las técnicas más utilizadas para la determinación de diferentes especies químicas como ácidos, agentes reductores y/o oxidantes, metales, etc. La valoración se basa en medir cuanto se necesita de un reactivo (titulante) del que se conoce su concentración para que reaccione con un analito del cual se desconoce su concentración.

En las valoraciones volumétricas se utiliza una sustancia denominada como indicador para identificar cuando la cantidad de titulante añadido es equivalente a la cantidad del analito presente. Un indicador es una sustancia que cambia de color cuando se alcanza un punto específico. En este trabajo se utilizó fenolftaleína ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$) como indicador, la cual es incolora en soluciones con un pH menor a 8.5 y se torna rosa cuando el pH alcanza valores superiores a 8.5, es decir que el cambio sucede cuando la solución se torna alcalina. El cambio de color proporciona una señal que el proceso de titulación ha concluido y se puede determinar la concentración del analito.

En la figura 7 se muestra como la fenolftaleína a un pH menor a 8 es incolora y tiene la estructura H_2P donde ambos fenoles cuentan con sus protones y la molécula no tiene carga. Al aumentar el pH de 8 a 10, la molécula comienza a ionizarse y los protones de los fenoles son eliminados y el anillo se abre obteniendo la estructura P^{-2} y visualmente obteniendo el color rosa – rojo. Al llegar a un pH mayor a 10, el color rojo va desapareciendo hasta obtener la estructura POH^{3-} .

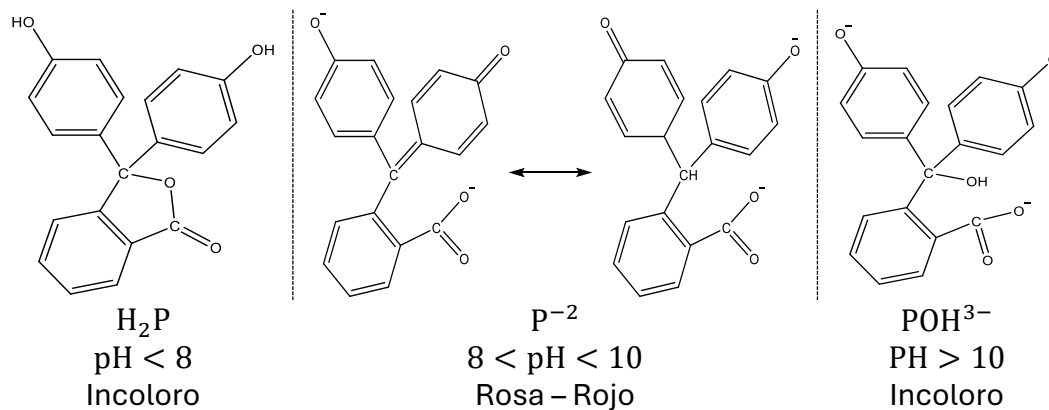


Figura 7. Molécula de fenolftaleína a diferentes pH.

El sistema para una valoración volumétrica se presenta en la figura 8, se basa en una bureta graduada que contiene al titulante y por medio de una llave se controla el goteo hacia un matraz que se encuentra en agitación continua y que contiene al analito.

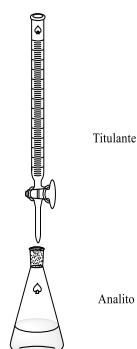


Figura 8. Sistema para valoración volumétrica.

En este trabajo durante la valoración, el biodiésel es el analito cuya concentración se desconoce, mientras que el hidróxido de potasio (KOH) es el reactivo estándar o titulante de concentración conocida.

La norma ASTM D6751 [22] establece que para la obtención del índice acidez se puede basar en la norma ASTM D664 [35] para valoraciones potenciométricas y la norma ASTM D974 [36] para valoraciones con un indicador.

3.6 Densidad

Entre las propiedades del biodiésel que se encuentran en las normas ASTM D6751 [22] y EN 14214 [23], destacan las propiedades de flujo. Las propiedades de flujo deben ser adecuadas para que no afecten el rendimiento y los componentes del motor. Dentro de estas propiedades se encuentra la densidad.

La norma ASTM D7042 [37] describe la densidad como la cantidad de masa (m) en un volumen (V) específico a una temperatura determinada (Ecuación 1). Las unidades de medición en el sistema internacional de unidades son $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

En un motor de combustión interna, el combustible líquido se pulveriza a través de aire comprimido y se atomiza en pequeñas gotas, por lo que el valor de la densidad se utiliza para calcular el volumen necesario. En el caso del biodiésel, con el valor de la densidad se puede realizar el diseño de los reactores, tanques de almacenamiento, tuberías y unidades de destilación [38].

El biodiésel se compone de una mezcla de ácidos grasos de metil éster (FAME), obtenidos a partir de diferentes grasas y aceites, debido a esto la densidad del biodiésel dependerá de los ésteres alquílicos y de la materia prima utilizada.

La norma ASTM D6751 [22] que establece los parámetros para las mezclas de biodiésel indica que, para la medición de la densidad de combustibles, se utilice la norma ASTM D1298 [39] acerca del método de prueba estándar para densidad. En la norma ASTM D1298 se indica el uso de un hidrómetro para obtener la densidad del combustible, pero en este trabajo se utilizó un picnómetro, el cual es un material de laboratorio al que los alumnos de la universidad tienen acceso. Basado en los experimentos de Lima et al. [40] utilizando un picnómetro solo se observan discrepancias a temperaturas mayores de 35°C y en el cuarto decimal, por lo que el resultado debe ser el mismo que si se utilizara un hidrómetro.

El uso de un picnómetro para la determinación de la densidad es un método aceptado, ya que un picnómetro es un matraz de vidrio que cuenta con un tapón esmerilado que es atravesado por un capilar, es de un volumen conocido y comúnmente pequeño. Existen diferentes tipos de picnómetros que se utilizan según sea necesario, por ejemplo, el picnómetro tipo Hubbard y de boca ancha se ocupa para líquidos muy viscosos, el tipo Warden se utiliza para líquidos volátiles y finalmente el más común es el tipo Gay – Lussac que se utiliza para líquidos no volátiles y de baja viscosidad (Figura 9).

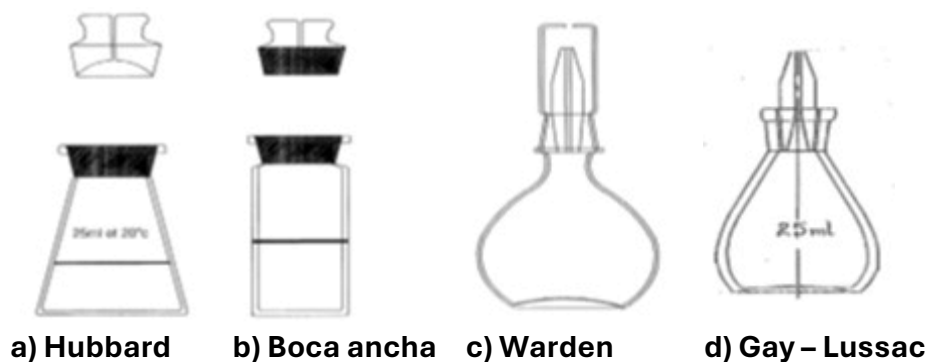


Figura 9. Tipos de picnómetros.

La calibración de un picnómetro se realiza obteniendo el volumen real del picnómetro a una temperatura específica, utilizando un compuesto de referencia con densidad conocida. Basado en la norma ASTM D1475, se presenta a continuación como se calibra un picnómetro de vidrio [41].

1. Se obtiene una masa constante del picnómetro limpio y seco, utilizando disolventes que no generen residuos sólidos. Para obtener una mayor precisión se recomienda repetir el proceso de enjuague, secado y obtención de masa hasta obtener resultados semejantes. Una vez obtenida la masa, anotarla en gramos.
2. En la norma se recomienda el uso de una disolución limpiadora de ácido crómico como disolvente, pero se alerta acerca de los peligros en su uso, ya que es corrosivo para la piel, ojos y mucosa.
3. Se llena el picnómetro con agua destilada, la norma recomienda que cumpla con las especificaciones de agua de calidad de reactivo Tipo II según la norma ASTM D1193 [42] (Tabla 9).

Tabla 9. Especificaciones del agua de calidad reactivo tipo II.

<i>Proceso de producción</i>	Conductividad eléctrica $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	Resistividad eléctrica $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$	Carbono Orgánico Total $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Sodio $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Cloro $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Sílica total $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
Destilación	<1.0	>1.0	<50	<5	<5	<3

4. Se inserta el tapón con un movimiento rotatorio. Asegurando un asentamiento firme del tapón y evitando se quede aire en el interior del picnómetro. Se retira el exceso de agua que desborde el capilar con un material adsorbente.
5. Utilizando un baño de agua, se lleva el picnómetro a una temperatura específica, esto puede provocar un pequeño flujo en el agua debido al aumento de la temperatura. Se retira el exceso de agua con un material adsorbente de manera muy cuidadosa evitando retirar agua del capilar.

6. Se seca el exterior del picnómetro con material adsorbente e inmediatamente se obtiene la masa del recipiente en gramos.
7. Se calcula el volumen del picnómetro, mediante la ecuación 2.

$$v = (N - m)/\rho \quad (2)$$

Donde:

v = Volumen del picnómetro, en ml. N = Masa del picnómetro y agua, en g.

m = Masa del picnómetro seco, en g. ρ = Densidad del agua a una temperatura específica (Tabla 10).

Tabla 10. Densidad del agua a diferentes temperaturas.

Temperatura °C	Densidad g · cm ⁻³	Temperatura °C	Densidad g · cm ⁻³
15	0.999127	23	0.997566
16	0.998971	24	0.997324
17	0.998772	25	0.997072
18	0.998623	26	0.996811
19	0.998433	27	0.996540
20	0.998231	28	0.996260
21	0.998020	29	0.995972
22	0.997798	30	0.995684

3.7 Viscosidad

Se ha mencionado que las propiedades de flujo son de gran importancia en los combustibles, por ejemplo, la densidad, que sirve para establecer la cantidad de combustible necesario para la combustión. Una propiedad que va de la mano con la densidad es la viscosidad.

La viscosidad es la propiedad física de las sustancias que se define como la resistencia a la deformación gradual de un medio. Esta propiedad es característica de cada material y puede variar dependiendo de factores como la temperatura y presión. La viscosidad se relaciona de manera directa con la velocidad de deformación por cizallamiento en un medio líquido [43] de manera general se describe según la ecuación 3.

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Donde:

τ = Fuerza de cizallamiento. u = Velocidad.
 μ = Viscosidad dinámica. y = Distancia.

La viscosidad puede clasificarse en dos tipos, la viscosidad cinemática y dinámica. La viscosidad dinámica (μ) se refiere a la resistencia de un fluido a la deformación en respuesta a una fuerza externa. Las unidades de la viscosidad dinámica en el sistema internacional de unidades (SI) es el pascal por segundo y en el sistema CGS es el poise (P) y centipoise (cP).

$$\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} = 10 \text{ poises}$$

Por otro lado, la viscosidad cinemática (ν) es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido (Ecuación 4). Esta es la resistencia de un líquido ante la influencia de la gravedad.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

Las unidades de la viscosidad cinemática en el SI son $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y en el sistema CGS se utiliza el Stoke (St.) o centistoke (cSt.).

$$1 \text{ Stoke} = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Por lo tanto, se entiende que la viscosidad dinámica corresponde la fuerza que se requiere para desplazar un líquido mientras que la viscosidad cinemática se asocia con la velocidad a la cual un líquido puede fluir bajo esa fuerza [44].

En un motor diésel, el combustible se pulveriza y atomiza en varias gotas de tamaño diminuto. En esta etapa la viscosidad es un factor importante, ya que de ella depende la calidad de la atomización y el tamaño de las gotas. Una alta viscosidad tiende a generar una mala atomización durante la pulverización provocando un aumento en los depósitos del motor, ocasionando que se necesite bombear más combustible y provoca que los componentes del motor, como la bomba e inyectores se vayan desgastando con el tiempo.

En el biodiésel obtenido a partir de aceites vegetales y grasas, se busca que la viscosidad sea baja para no tener los problemas antes mencionados, ya que la viscosidad del biodiésel llega a ser un poco alta en comparación con la viscosidad del diésel. Por ejemplo, en un estudio realizado, la viscosidad del biodiésel obtenido a partir de aceite de girasol fue 1.55 veces más alta en comparación con la viscosidad del diésel [45].

Un problema con el biodiésel y su viscosidad es que cuando la temperatura disminuye, la viscosidad aumenta, debido a este problema, se utiliza el biodiésel en mezclas con diésel para disminuir la viscosidad y lograr que su uso sea adecuado para los motores de combustión.

La alta viscosidad del biodiésel puede deberse a varios factores que abarcan desde la materia prima utilizada hasta el almacenamiento final. A continuación, se describen factores que propician una alta viscosidad en el biodiésel.

- *Materia prima.*

La materia prima a partir de la cual se obtuvo el biodiésel juega un papel importante en la viscosidad final, esta materia define el tipo de aceite vegetal y su composición de ésteres de alquilo.

Otro factor importante es el tratamiento de la materia prima, el biodiésel obtenido de aceites vegetales tiende a tener una menor viscosidad en comparación con el biodiésel obtenido a partir de aceite residual de cocina para fritura, ya que, durante su uso, normalmente se encuentra en contacto con un alto contenido de agua y sales además de una exposición a altas temperaturas, propiciando la oxidación del aceite de cocina.

- *Producción de biodiésel.*

Como se mencionó previamente la producción de biodiésel depende de varios factores, los cuales deben ser optimizados para obtener un rendimiento aceptable. Cuando los factores no están optimizados tienden a generar un biodiésel de mala calidad y un bajo rendimiento.

Algunas condiciones durante la producción de biodiésel pueden afectar su viscosidad. Por ejemplo, el tiempo y la temperatura de reacción. Un tiempo de reacción corto no permite que la reacción de transesterificación sea completa y por lo tanto la viscosidad no disminuirá. Mientras que una temperatura alta y un tiempo de reacción extenso solo generará que los triacilglicéridos se descompongan en ácidos grasos libres que a su vez con el calor forman radicales libres y finalmente polímeros que aumentan la viscosidad y oscurecen el líquido.

- Almacenamiento

Cuando el biodiésel es almacenado por un tiempo prolongado, existe la posibilidad que haya un cambio en la composición de éste. Lo anterior se debe a factores como la composición del contenedor para el almacenaje, la temperatura y si el combustible fue expuesto a la luz del sol y aire. Jakeria et al. [46] reporta que un biodiésel que ha estado almacenado por más de 6 meses ya no es apto para su uso como combustible.

- Oxidación

El biodiésel puede ser muy susceptible a la oxidación, debido a sus moléculas de ácidos grasos insaturados. Cuando el biodiésel es expuesto a oxígeno, este último ataca el sitio adyacente al doble enlace, provocando una reacción en cadena que termina dando como producto la formación de peróxidos. Este proceso conocido como autooxidación se describe en tres pasos, iniciación, propagación y terminación (Figura 10).

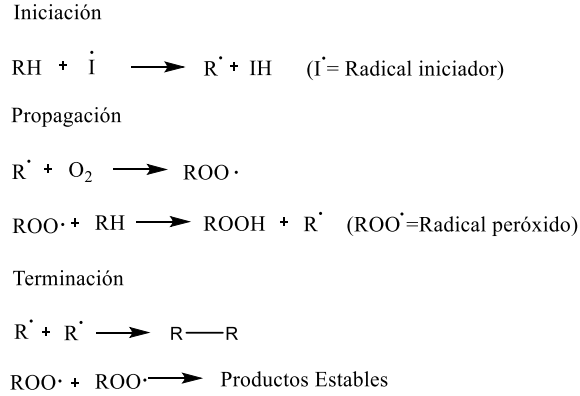


Figura 10. Proceso de autooxidación.

El proceso de autooxidación implica la eliminación de un átomo de hidrógeno de un átomo de carbono. Este hidrógeno es extraído de un carbono en una posición susceptible a la oxidación, comúnmente un carbono alílico, para formar un radical libre de carbono. El radical libre $R\dot{H}$ reacciona con oxígeno diatómico para continuar con la propagación de la oxidación. El radical peróxido ($ROO\dot{H}$) puede extraer otro hidrógeno para formar un nuevo radical libre de carbono y un hidroperóxido. Finalmente, la reacción en cadena termina cuando dos radicales libres reaccionan entre sí [46].

Cuando se forman las moléculas de hidroperóxidos, éstas pueden descomponerse para formar aldehídos. Conforme la descomposición de hidroperóxidos avanza, se puede dar la unión oxidativa de los ácidos grasos libres, dando lugar a especies con un alto peso molecular y generando una polimerización oxidativa. En la figura 11 se muestran las etapas de la degradación del biodiésel, que incluyen la descomposición de triglicéridos en ácidos grasos libres, seguida de la oxidación la cual genera cambios en las propiedades del biodiésel, como el aumento en la viscosidad y el oscurecimiento [47].

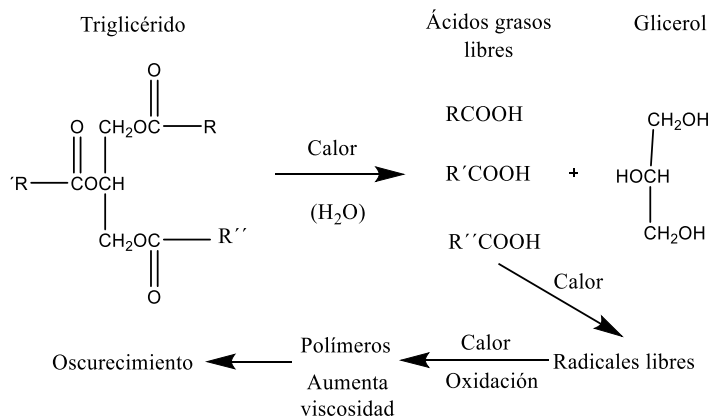


Figura 11. Etapas de la reacción que genera el aumento de la viscosidad del biodiésel.

Si bien el biodiésel es susceptible a la oxidación, también se deben tener en cuenta que otros parámetros afectan a este proceso como la intensidad de la luz, temperatura, moléculas oxigenadas y moléculas insaturadas.

La norma ASTM D6751 [22] menciona que se utilice la norma ASTM D445 [48] como el método de prueba de la viscosidad cinemática. Este método de prueba de la viscosidad se basa en medir el tiempo que toma un líquido para fluir por gravedad en un capilar calibrado de un viscosímetro, rodeado de un líquido a temperatura constante y conocida. La norma ASTM D445 establece el método de prueba estándar para medir la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos. Para ello, se deben utilizar viscosímetros calibrados del tipo capilar de vidrio adecuados para esta medición.

Un viscosímetro de capilar de vidrio es un instrumento de vidrio que contiene bulbos y un capilar con dos marcas, donde se deja fluir el líquido para obtener su viscosidad en el tiempo que tarda en recorrer una parte del capilar y una constante establecida para el viscosímetro.

Existen diferentes tipos de viscosímetros de capilar de vidrio debido a que ningún viscosímetro capilar es ideal para todas las determinaciones de viscosidad cinemática, además, hay que considerar factores como la viscosidad del fluido y si es claro u opaco, ya que en algunas mediciones el menisco no puede observarse.

Algunos ejemplos son el viscosímetro tipo Cannon – Fenske que sirve para la medición de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes, particularmente de lubricantes y derivados de petróleo (Figura 12a). El viscosímetro utilizado en este proyecto es el tipo Ostwald (Figura 12b).

La diferencia entre ellos es que, para viscosidades altas, el viscosímetro Cannon – Fenske cuenta con un capilar de un mayor grosor, lo que permite un análisis corto en comparación si se utiliza el viscosímetro tipo Ostwald.

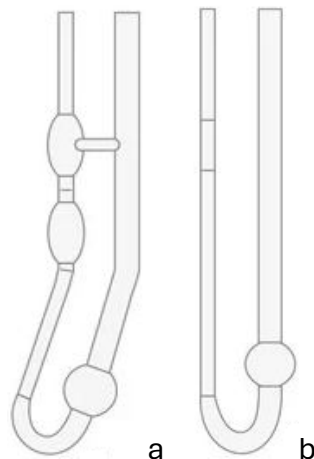


Figura 12. Viscosímetros de capilar de vidrio.

La norma ASTM D445 [48] menciona puntos importantes para la medición de la viscosidad con un viscosímetro de capilar de vidrio y son:

- Utilizar soporte para el viscosímetro de manera que se encuentre en posición vertical.
- La medición se debe realizar en un baño de temperatura constante con un líquido transparente.
- Se recomienda utilizar una disolución de ácido crómico para limpiar el interior del viscosímetro, procurando tener las medidas de seguridad adecuadas ya que el ácido crómico es corrosivo y carcinógeno.
- Para el secado del viscosímetro se recomienda el uso de un disolvente como acetona.
- El termómetro se debe colocar en posición vertical inmerso en el baño.
- La carga del líquido al viscosímetro se realiza de acuerdo con el diseño del instrumento.
- El viscosímetro sumergido en el líquido en el baño debe mantenerse por un periodo largo para alcanzar la temperatura deseada.
- Succionar o presionar para ajustar el nivel del líquido por arriba de la primera marca de sincronización.

Una vez realizado el análisis de la viscosidad, la norma ASTM D445 establece que se calcule la viscosidad cinemática por medio de la ecuación 5.

$$\nu = C \cdot t \quad (5)$$

Donde:

ν = Valor de la viscosidad cinemática, en $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

C = Constante del viscosímetro, en $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

t = Tiempo de flujo medido, en s.

3.8 Poder calorífico

El poder calorífico o valor calorífico se define como la cantidad de energía liberada por la combustión de una unidad de masa de combustible a un volumen constante. El poder calorífico es un valor de gran importancia para los combustibles a los que se les determina su valor energético, ya que en gran medida se depende de este valor para el diseño y control de los equipos en los que se utilizará [49].

Las normas ASTM D6751 [22] y EN 14214 [23] no incluyen el poder calorífico como una propiedad que deba analizarse o tomarse en cuenta. Sin embargo, la norma EN 14213 [50], que trata sobre los métodos de ensayo para combustibles de calefacción compuestos de ésteres metílicos de ácidos grasos, establece un valor de $35 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ para el poder calorífico del biodiésel. Lo anterior se debe a que en países como Estados Unidos los productores de combustible para calefacción ofrecen mezclas de petróleo y biocombustibles en un porcentaje que no rebasa el 5 % en volumen.

Para realizar el análisis del poder calorífico, la norma EN 14213 [50] establece el uso en la norma DIN 51900 del Instituto alemán de normalización (DIN, por sus siglas en alemán). La norma trata acerca de la determinación del valor calorífico de combustibles sólidos y líquidos por calorimetría de combustión usando una bomba de combustión isoperibólica [51].

La calorimetría de combustión se basa en medir los cambios de energía durante una reacción de combustión que se encuentra en una atmósfera de oxígeno. Esto se lleva a cabo mediante la medición directa de los cambios en la temperatura a través del tiempo en el sistema calorimétrico. Un calorímetro de combustión de manera general se compone de 3 partes:

- Bomba calorimétrica: Parte del calorímetro donde la reacción de combustión se lleva a cabo.
- Fluido térmico: Es la parte donde se transfiere la energía de la combustión en forma de calor
- Chaqueta: Son los alrededores del calorímetro.

Para este proyecto, se utilizó un calorímetro isoperibólico de bomba estática. En un calorímetro isoperibólico, la chaqueta que rodea al sistema está llena de agua, cuya temperatura se mantiene constante durante la prueba mediante un termostato. Al mantener los alrededores a una temperatura fija, el sistema se aísla de manera que cualquier cambio de temperatura en el interior se deba exclusivamente a la reacción de combustión.

El calorímetro de combustión de bomba estática se compone de una caja de madera que se encuentra recubierta en su interior por poliuretano para minimizar la transferencia de energía a los alrededores. En el interior del calorímetro se encuentra la chaqueta metálica en la que se coloca la cubeta calorimétrica que se encuentra recubierta de cromo y tiene un volumen de 2 litros.

En la cubeta se coloca la bomba calorimétrica y se cubre con agua para monitorear el experimento. El sistema se cierra colocando una tapa en la que se encuentra un termistor

para monitorear la temperatura, un agitador para mantener la uniformidad en la temperatura del agua que rodea la bomba y las conexiones para la caja de ignición.

En la figura 13 se muestra las partes de un calorímetro de combustión de bomba estática.

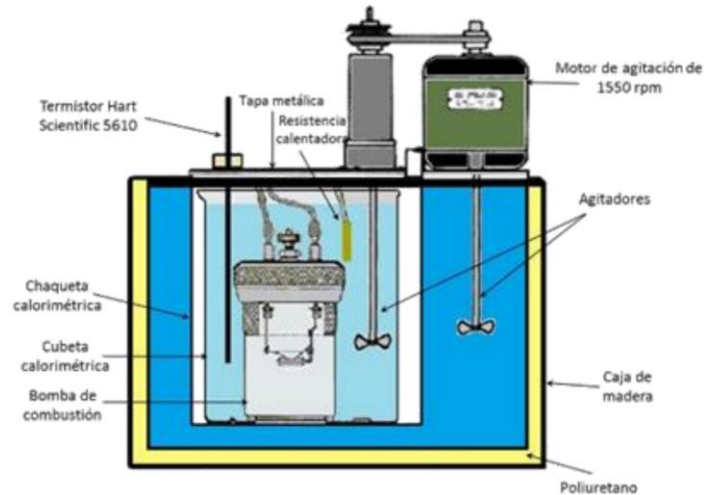


Figura 13. Partes de un calorímetro de combustión.

Durante el experimento de combustión, se libera una cantidad de energía en forma de calor que se monitorea con el incremento de la temperatura del agua que rodea la bomba. Se realiza el registro de los datos de la temperatura a lo largo del tiempo que tarda el experimento y al final se obtiene un gráfico como el que se muestra en la figura 14.

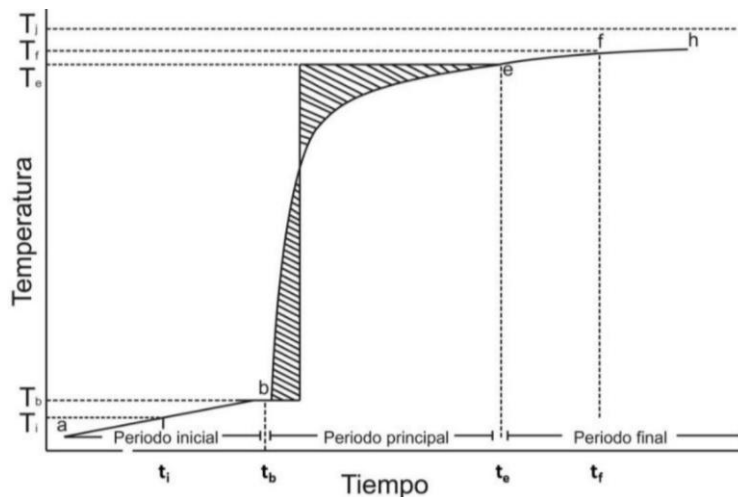


Figura 14. Termograma de un experimento de combustión.

Donde:

- T_i : Temperatura del inicio del experimento.
- t_i : Tiempo del inicio del experimento.

- T_f : Temperatura final del experimento.
- T_b : Temperatura inicial de la reacción de combustión.
- T_e : Temperatura final de la reacción de combustión.
- T_j : Valor de la temperatura de la chaqueta calorimétrica.
- t_f : Tiempo final del experimento.
- t_b : Tiempo inicial de la reacción de combustión.
- t_e : Tiempo final de la reacción de combustión.

En la figura 14, se muestra como el termograma se divide en 3 periodos. Cada periodo corresponde a una parte del experimento.

a → b Periodo inicial: La primera parte del experimento se caracteriza por tener un incremento en la temperatura debido a distintos factores como la agitación, el autocalentamiento del resistor y la transferencia de energía entre el calorímetro y los alrededores.

b → e Periodo principal: En esta parte del experimento se observa un aumento en la temperatura, debido a la reacción de combustión que ocurre en la bomba, además de los factores mencionados.

e → h Periodo final: El aumento de la temperatura en esta etapa se debe a las mismas razones que las del periodo inicial.

Durante el periodo principal es donde ocurre el aumento de temperatura debido principalmente a la reacción de combustión, sin embargo, se deben considerar los factores mencionados durante el periodo inicial. Debido a lo anterior, es importante realizar una corrección para obtener el valor del incremento en la temperatura debido solamente a la reacción de combustión y eliminar las contribuciones mencionadas anteriormente.

El método utilizado para obtener el incremento de la temperatura debido a la reacción de combustión es el método de Regnault-Pfaundler [52].

La ecuación 6 se utiliza para calcular el incremento en la temperatura corregido en una reacción de combustión.

$$\Delta T_c = T_e - T_b + \Delta T_{\text{corr}} \quad (6)$$

Donde

ΔT_c = Incremento de temperatura corregido.

T_b = Temperatura inicial del periodo principal.

T_e = Temperatura final del periodo principal.

ΔT_{corr} = Factor de corrección.

3.9 Temperatura de ignición

La temperatura de ignición es la temperatura mínima en la que un líquido produce el vapor necesario para iniciar una ignición espontánea en presencia de una fuente externa de calor, como una flama o chispa [53].

La temperatura de ignición en los combustibles es una propiedad de gran relevancia, ya que a partir de ésta se determinan los cuidados de temperatura en cuestión de transporte y almacenamiento. Además, cualquier cambio en la temperatura de ignición indica que el combustible está contaminado.

La metodología general para la obtención de la temperatura de ignición se basa en calentar un volumen de la muestra, medir su temperatura y colocar una fuente de calor cerca de su superficie hasta obtener la combustión de los vapores generados. Existen dos métodos experimentales para la obtención de la temperatura de ignición: de copa cerrada y abierta. En el método de copa cerrada, la muestra se encuentra en un recipiente cerrado y no se abre durante todo el experimento. En los instrumentos automáticos de copa cerrada, la muestra se calienta a través de una placa mientras unos electrodos aplican una chispa a los vapores, cuando ocurre la combustión se detecta por un aumento en la presión [54]. Existen diversos tipos de equipos de medición de la temperatura de ignición de copa cerrada que pueden ser automáticos o manuales y varían en la forma en la que se detecta la temperatura de ignición. En la figura 15 se muestra el diagrama de un medidor de la temperatura de ignición tipo copa cerrada, Pensky – Martens.

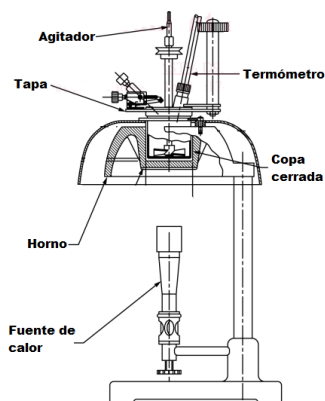


Figura 15. Medidor de la temperatura de ignición de copa cerrada Pensky – Martens.

Mediante este método se obtienen temperaturas de ignición bajas en comparación con el método de copa abierta, por lo que los resultados obtenidos mediante este método se consideran precisos y se toman en cuenta en el ámbito de la seguridad en combustibles.

En el método de copa abierta la muestra no se encuentra en un recipiente cerrado, por lo que está en contacto con el aire del ambiente.

Al igual que en los equipos de copa cerrada, existen diversos tipos de equipo de copa abierta. En la figura 16 se muestra el esquema de un medidor de la temperatura de ignición tipo Cleveland.

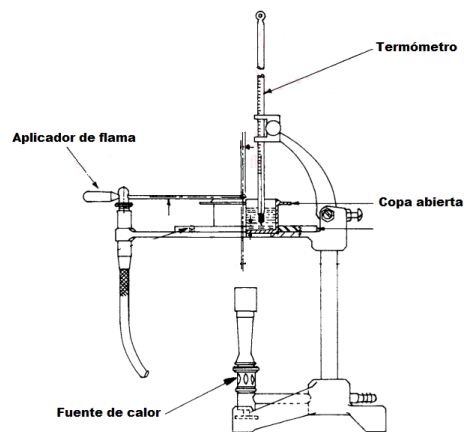


Figura 16. Medidor de la temperatura de ignición de Cleveland.

El equipo de copa abierta tipo Cleveland consiste en un recipiente de prueba, fuente de calor, aplicador de flama de prueba, termómetro y soportes.

La temperatura de ignición en el biodiésel es muy variable debido a la diversidad de materias primas y las propiedades de los ácidos grasos que las componen. En la norma ASTM D6751 se establece el mínimo en 130 °C, mientras en la norma EN 14214 se establece el mínimo en 101 °C. Esta variación se logra apreciar más en diferentes artículos acerca del biodiésel, en la tabla 11 se presentan algunas temperaturas de ignición recolectadas de la literatura.

Tabla 11. Temperatura de ignición de biodiésel de diferentes materias primas.

Materia prima de origen	Temperatura de ignición °C
Aceite de palma y canola	71 [55]
Aceite de fritura	156 [56]
Aceite de cocina residual	171 [57]
Aceite de fritura	192 [58]

Cuando el metanol utilizado durante la producción de biodiésel no es eliminado en su totalidad, puede afectar la temperatura de ignición, ya que cantidades pequeñas de metanol residual disminuyen la temperatura de ignición en el biodiésel [60], esto se debe a que el metanol es altamente inflamable y volátil, haciendo que los vapores inflamables se formen a temperaturas más bajas.

Para conocer la cantidad de metanol en el biodiésel se utilizan técnicas como cromatografía y espectrofotometría, pero Boog et al. [60] propone utilizar la temperatura de ignición como un método alternativo.

La norma ASTM D6751 [22] establece que para la obtención de la temperatura de ignición se realice tomando como base la norma ASTM D93 acerca de los métodos de prueba estándar para la temperatura de ignición. Esta norma establece que para el análisis se utilice un medidor automático Pensky – Martens. Sin embargo, en este proyecto se utilizó un sistema basado en la norma ASTM D92 que indica el método de prueba estándar para las temperaturas de ignición y combustión mediante la copa abierta de Cleveland.

La norma ASTM D92 [61] establece algunos puntos importantes al realizar la medición de la temperatura de ignición:

- Utilizar un disolvente capaz de eliminar y secar la muestra de la copa.
- Utilizar 70 ml de muestra.
- El equipo debe colocarse en un lugar estable.
- Aplicar la flama de prueba cuando la temperatura se encuentre a 28 °C antes de la temperatura esperado.
- Tener cuidado de no alterar los vapores generados con movimientos bruscos o corrientes de aire cerca de la copa.

4 Desarrollo Experimental

4.1 Obtención del biodiésel

Para la producción de biodiésel, se utilizó como materia prima aceite residual de cocina recolectado y almacenado en un galón. Aunque dicho aceite contiene una mezcla de diferentes marcas en su mayoría se conforma de aceite vegetal puro de canola marca Maravilla.

La producción de biodiésel se realizó mediante una reacción de transesterificación catalizada por una base. El método se escogió debido a las diversas ventajas que ofrece, por ejemplo:

- Los reactivos y equipo necesario son accesibles para un laboratorio de docencia.
- El procedimiento es sencillo en comparación con otros métodos.
- La obtención es con un alto rendimiento.

La producción de biodiésel a partir de aceite residual se llevó a cabo en el laboratorio de bromatología de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP, en una práctica que se realiza cada semestre por los estudiantes de la carrera en Químico Farmacobiólogo.

Las cantidades de reactivo y las condiciones experimentales se establecieron en el manual existente y se muestran en la tabla 12 y 13.

Tabla 12. Relación óptima para la obtención de biodiésel.

Reactivo	Masa g	Volumen ml
Aceite de cocina residual	1000	---
Hidróxido de sodio	3.5	---
Metanol	---	200

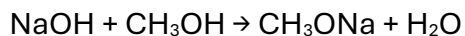
Tabla 13. Condiciones óptimas para la reacción de transesterificación.

Parámetro	Valor óptimo
Tiempo de reacción / min	60
Temperatura de reacción / °C	55

Previo a la producción de biodiésel, el aceite residual de cocina se filtró por duplicado utilizando gasas esterilizadas para eliminar los residuos sólidos como impurezas y restos de comida, obteniendo la masa de aceite residual de 86.067 g.

La producción de biodiésel comenzó con la preparación del metóxido de sodio (Ecuación 7). Se agregaron 17.2 ml de metanol grado técnico y 0.301 g de hidróxido de sodio en lenteja

grado A.C.S (American Chemical Society) Marca Meyer en un vaso de precipitado, agitando hasta disolver por completo. Para la obtención de las masas se utilizó una balanza Ohaus PA313 con precisión $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ g.



Ecuación 7. Reacción de hidróxido de sodio y metanol para la obtención de metóxido de sodio.

El aceite residual de cocina se calentó hasta 55 °C manteniendo la agitación continua. Una vez alcanzada la temperatura, se agregó el metóxido de sodio comenzando la reacción de transesterificación, manteniendo la temperatura y agitación por 60 minutos.

Una vez transcurrido el tiempo de reacción, la mezcla se colocó en un embudo de separación y se dejó reposar por 24 horas, permitiendo la separación de las fases (biodiésel y glicerina) y una vez separadas, se desechó la glicerina de un tono café oscuro (Figura 17).



Figura 17. Embudo de separación con biodiésel y glicerol.

El lavado del biodiésel se realizó con una disolución de ácido acético al 0.001 M. La disolución se agregó al embudo de separación y se agitó, dejando reposar para permitir la separación de fases y poder desechar la glicerina restante. El procedimiento se realizó por triplicado hasta obtener un agua de lavado transparente y un pH de 7, lo que indica la eliminación del jabón.

Finalmente, el biodiésel se calentó a 45 °C durante 15 minutos con agitación constante para eliminar los restos de agua.

El rendimiento de biodiésel se obtuvo a partir de la ecuación (8).

$$\text{Rendimiento de biodiesel (\%)} = \frac{\text{Masa de biodiésel (g)}}{\text{Masa del aceite (g)} + \text{Masa del metanol (g)}} \times 100 \quad (8)$$

La ecuación del rendimiento del biodiésel evalúa la eficiencia de la reacción de transesterificación. Se basa en la relación entre el biodiésel obtenido y la masa total de la materia prima y el reactivo utilizado, multiplicado por 100 da el porcentaje de la reacción. Un rendimiento alto implica que las condiciones de la reacción son óptimas, pero un rendimiento bajo sugiere la necesidad de optimizar los parámetros de la reacción.

Tras la obtención del biodiésel, se llevó a cabo su caracterización tomando en cuenta los estándares de calidad establecidos en las normas internacionales ASTM D6751 [22] y EN 14214 [23] descritas anteriormente.

4.2 Índice de acidez

El procedimiento es una titulación volumétrica que utiliza como titulante hidróxido de potasio a una concentración de 0.1M y fenolftaleína como indicador y se describe a continuación:

- 1.- Se obtuvo la masa de un matraz erlenmeyer de 50 ml vacío (m_{mev}).
- 2.- En el matraz erlenmeyer se colocó 2 ml de biodiésel y se obtuvo su masa (m_{meb}).
- 3.- Se agregaron 2 gotas de fenolftaleína, con agitación continua hasta obtener una muestra homogénea.
- 4.- Se agregó hidróxido de potasio 0.1 M a la muestra y se registró el volumen gastado (V) cuando la muestra viró a rosa. El procedimiento se realizó por triplicado.

El índice de acidez se calculó mediante la ecuación (9)

$$\text{Índice de acidez} = \frac{V \times [\text{KOH}] \times 56.1 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{(m_{meb} - m_{mev})} \quad (9)$$

Donde:

V = Volumen gastado de KOH 0.1M en la titulación de la disolución, ml.

[KOH] = Concentración de la disolución de KOH, mol · L⁻¹.

56.1 = Masa molecular del KOH, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

$(m_{\text{meb}} - m_{\text{mev}})$ = Masa de la muestra, g.

4.3 Densidad

Para obtener la densidad se usó un picnómetro de vidrio con un volumen de 5 cm^3 (Figura 18).



Figura 18. Picnómetro de 5 cm^3 utilizado en este trabajo.

Previamente a la obtención de la densidad del biodiésel, se realizaron pruebas de la metodología utilizando líquidos de densidad conocida. El procedimiento se describe a continuación.

- 1.- Utilizando jabón se lavó el interior y exterior, eliminando la grasa y restos de material. Se enjuagó con agua de la llave y posteriormente con agua destilada.
- 2.- Se colocó el picnómetro en la estufa a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ por 20 minutos para evaporar el agua en el interior. Transcurrido el tiempo, se añadió un poco de etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) para evaporar el resto de agua y se colocó en la estufa por 5 minutos.
- 3.- Se dejó reposar por 15 minutos para alcanzar la temperatura ambiente.

Con el picnómetro limpio y seco, se continua con la obtención de la densidad del etanol y agua destilada. En la tabla 14 y 15 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 14. Densidad de etanol a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

No.	Densidad $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
1	0.809
2	0.809
3	0.809

Promedio	0.809
-----------------	-------

Tabla 15. Densidad de agua destilada a 25 °C.

No	Densidad g · cm⁻³
1	0.997
2	0.997
3	0.998
Promedio	0.997

La densidad del etanol en la bibliografía es 0.789 g · cm⁻³ [62]. Mientras que el agua destilada marca Copain indica que cumple con la norma de la Farmacopea de los Estados Unidos (USP, por sus siglas en ingles), en dicha norma se establece que la densidad es de 0.997 g · cm⁻³ [63]. El porcentaje de error fue del etanol fue 2.5% por lo que se concluye que debido a que los resultados obtenidos son cercanos a los valores reportados y el error es mínimo, la metodología es adecuada.

El procedimiento para la determinación de la densidad del biodiésel se describe a continuación.

1.- En una balanza Sartorius ME 215S con precisión de $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ g, se obtuvo la masa del picnómetro vacío (m_{pv}).

2.- Se agregó el biodiésel en el picnómetro, evitando que se derrame. Una vez con la muestra en el picnómetro, se tomó la temperatura con un termómetro de vidrio y se colocó el capilar evitando la formación de burbujas de aire.

En caso de derrame se limpió con hexano y se dejó evaporar.

3.- Se obtuvo la masa del picnómetro con el biodiésel (m_{pb}).

Finalmente, la densidad se obtuvo utilizando la ecuación (10).

$$\rho = \frac{(m_{pb} - m_{pv})}{\text{volumen}} \quad (10)$$

4.4 Viscosidad

En este trabajo se utilizó un viscosímetro tipo Ostwald (Figura 19), el cual es un tubo de vidrio con un capilar unido a dos bulbos. En el capilar se encuentran dos marcas que indican cuando se debe iniciar y detener el conteo del tiempo.

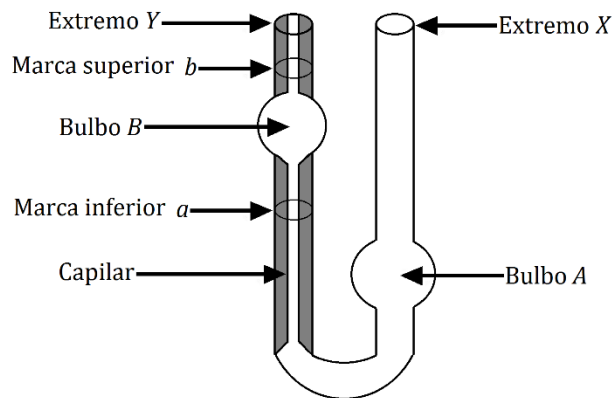


Figura 19. Viscosímetro tipo Ostwald.

El viscosímetro debe estar limpio y totalmente seco para evitar la contaminación de la muestra y garantizar resultados correctos. El procedimiento para la limpieza y secado se describe a continuación.

- 1.- Con agua y jabón se lavó el interior del viscosímetro por el extremo X.
- 2.- Con apoyo de un cepillo de laboratorio se limpió la parte interna del extremo X impulsando el jabón para limpiar el interior del capilar.
- 3.- El viscosímetro se enjuaga con agua utilizando una perilla para enjuagar el capilar, el bulbo B y el extremo Y.
- 4.- En caso de que aún se encuentre suciedad en el viscosímetro, repetir del paso 1 al 3.
- 5.- Con agua destilada se enjuagó el interior y exterior del viscosímetro y se dejó escurrir por unos minutos.
- 6.- Finalmente, se adicionó 3 ml de acetona (C_3H_6O) para evaporar el agua restante.

Se continúa con la estandarización del método tomando como valor de referencia agua destilada y etanol. En las tablas 16 y 17 se presentan los datos del tiempo obtenido y viscosidad dinámica del agua destilada y etanol respectivamente.

Tabla 16. Viscosidad dinámica del agua a 25 °C.

No	Tiempo s	Viscosidad dinámica Centipoises
1	71.13	
2	71.00	
3	71.23	
Promedio	71.12	0.89 mPa · s ⁻¹ [64]

Tabla 17. Viscosidad dinámica del etanol a 25 °C.

No	Tiempo	Viscosidad dinámica
----	--------	---------------------

	S	Centipoises
1	105.12	
2	104.67	
3	105.56	
Promedio	105.12	1.068 mPa · s ⁻¹

La viscosidad del etanol se calculó con la ecuación 11, utilizando el agua destilada como referencia. La viscosidad reportada del etanol es 1.074 Cp [62], mientras la viscosidad obtenida es 1.068 Cp. Con una diferencia de 0.006 Cp (error del 0.5 %) se establece que la metodología es adecuada.

Con el viscosímetro limpio y seco, se procede con la medición de la viscosidad del biodiésel.

1.- Se montó el sistema colocando un vaso de precipitado de 1 litro con agua destilada en una parrilla. Con un soporte universal y pinzas, se colocaron el viscosímetro y un termómetro cerca del capilar procurando que el agua cubriera la marca superior *b* (Figura 20).

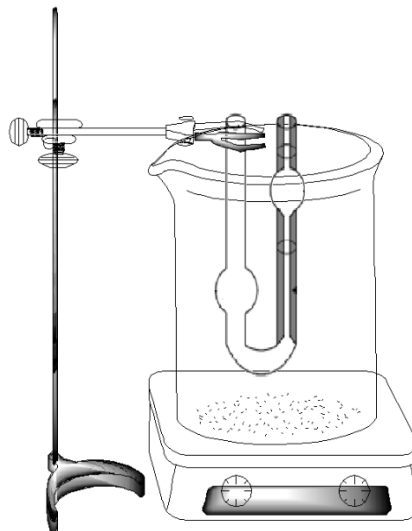


Figura 20. Sistema para medir la viscosidad.

2.- Se tomó 2.7 ml de la muestra y se vertió por el extremo *X*, permitiendo que fluyera hasta el fondo del viscosímetro.

3.- Se inició la agitación y calentamiento, hasta alcanzar 40 °C.

4.- Alcanzado los 40 °C y con la muestra en el fondo del viscosímetro, se esperaron 20 minutos para que la temperatura de la muestra alcanzara la temperatura deseada.

5.- Con una perilla por el extremo *Y* se atrajo la muestra por el capilar y el bulbo *B*, colocando el menisco por encima de la marca superior *b*.

6.- Se retiró la perilla permitiendo que la muestra fluyera, iniciando el conteo de tiempo cuando el menisco cruzó la marca superior b . El conteo se detuvo cuando el menisco cruzó la marca inferior a , obteniendo t_m .

La viscosidad dinámica se obtuvo mediante la ecuación (11):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{agua}}}{\delta_{\text{agua}} t_{\text{agua}}} \cdot \delta_m \cdot t_m \quad (11)$$

Donde:

σ_m = Viscosidad de la muestra.	σ_{agua} = Viscosidad del agua.
δ_m = Densidad de la muestra.	δ_{agua} = Densidad del agua.
t_m = Tiempo de la muestra.	t_{agua} = Tiempo del agua.

En las normas de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y las Normas Europeas (EN) la viscosidad se presenta en unidades de viscosidad cinemática ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). La viscosidad cinemática (μ) se define como el cociente entre la viscosidad dinámica (σ) y la densidad (ρ), expresado en la ecuación 12.

$$\mu = \frac{\sigma}{\rho} \quad (12)$$

4.5 Poder calorífico.

Los experimentos de combustión de biodiésel se realizaron en un calorímetro isoperibólico de combustión de bomba estática (Figura 21), que se encuentra ubicado en el laboratorio de Termoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP.



Figura 21. Calorímetro de combustión de bomba estática.

La calibración del calorímetro de combustión se realizó en trabajos previos por el Dr. Perdomo G. [65] utilizando ácido benzoico del NIST. Mediante la calibración realizada, se tiene el equivalente energético ε (calor) del calorímetro de $10\,155.3 \pm 0.4 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Previo al procedimiento experimental para la combustión, se realizaron cápsulas de polietileno para contener la muestra líquida. El procedimiento que se llevó a cabo para realizar las cápsulas de polietileno se describe a continuación.

- 1.- Se recortó una hoja de polietileno en cuadros de 3.5 cm por lado. Se lavó con agua y jabón para posteriormente enjuagar con agua destilada y etanol, dejando evaporar.
- 2.- Los cuadros de polietileno se colocaron en la estufa hasta quedar completamente secos.
- 3.- Utilizando el juego de dados que se muestra en la figura 22, se colocó en la base un cuadro de polietileno, después la pieza E1 se situó encima y se ejerció presión para mantener inmóvil el polietileno. La pieza P1 se colocó en el interior de E1 ajustando en el orificio donde hace contacto con el polietileno y se presionó lentamente para formar la cápsula.

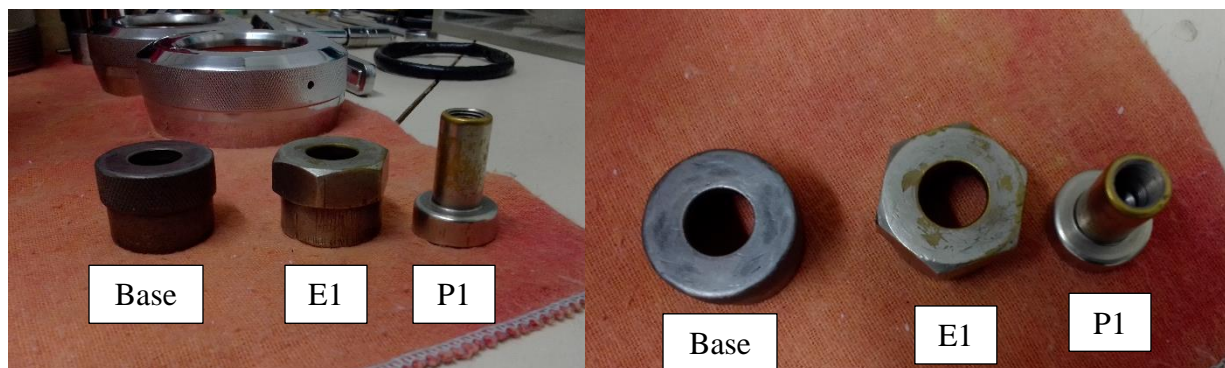


Figura 22. Equipo para realizar las cápsulas de polietileno.

- 4.- Se retiró E1 con P1 de la base y con pinzas se separó la cápsula de P1 con cuidado para guardarla.
- 5.- Para sellar, se situó la cápsula en la base, se colocó y alineó un cuadro de polietileno. Se recortó un rectángulo de papel aluminio de 30 cm \times 10 cm y se dobló hasta obtener un rectángulo de 5 cm \times 10 cm que se colocó encima de la cápsula de polietileno.
- 6.- Utilizando pinzas de trabajo se tomó la pieza E1 y se colocó a flama directa por un lapso de 20 segundos. Enseguida se ubicó encima del papel aluminio y se ejerció presión durante 5 a 7 segundos.
- 7.-Se retiró la cápsula de polietileno y se guardó.

Con las cápsulas listas, el procedimiento experimental que se llevó a cabo para la determinación de la energía de combustión es el siguiente.

1. Primero se recortó el material auxiliar, 5.5 cm de alambre de níquel y 6.0 cm de hilo de algodón que sirve como mecha para iniciar la combustión.

El hilo de algodón fue previamente caracterizado, obteniendo una energía de combustión específica estándar de $\Delta_c u^\circ = (-16,9452 \pm 0.0042) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ [66].

2. En una balanza Sartorius ME 215S con precisión ± 0.01 mg, se obtuvo la masa de la cápsula de polietileno vacía.
3. Utilizando una jeringa para líquidos viscosos de 3 ml, se extrajo aproximadamente 0.7 ml de biodiésel y se agregó en la cápsula hasta obtener una masa aproximada de 0.69 g.
4. Se obtuvieron las masas de los materiales en el siguiente orden, alambre de níquel, hilo de algodón, crisol y finalmente la cápsula con biodiésel dentro del crisol.
5. En los electrodos del cabezal, se colocaron el alambre de níquel con el hilo de algodón.

El hilo de algodón tiene contacto directo con la cápsula de polietileno dentro del crisol.

6. Se agregó 1 cm³ de agua desionizada en el interior de la bomba.
7. Se colocó la cápsula en el cabezal en la bomba evitando que el hilo de algodón se moviera y se cerró la bomba.
8. Con la bomba cerrada, se conectó a un tanque de oxígeno para purgar el interior de la bomba, aplicando 5 atm de oxígeno durante 5 minutos para eliminar el aire del ambiente que aún se encuentra dentro de la bomba. Después de ese tiempo, se cerró la válvula de presión para llenar la bomba hasta 30 atm.
9. Se colocó la bomba dentro de la cubeta calorimétrica, se agregaron 2 kg de agua destilada y se introdujo en la chaqueta calorimétrica, colocando la tapa del calorímetro.
10. En la tapa del calorímetro se colocó el termistor y se inició la agitación monitoreando la temperatura hasta alcanzar 21.8 °C. Alcanzada la temperatura deseada, se espera un lapso de 30 minutos para que el sistema se estabilice.
11. Después del tiempo de estabilización, se toman 60 lecturas de temperatura. El monitoreo de la temperatura se realizó con un termistor Hart Scientific, acoplado a un multímetro Agilent modelo 5610. Los datos de temperatura se registran automáticamente en un equipo de cómputo directo a una hoja de Excel cada 10 segundos.
12. Cuando se registró la lectura número 60 se inicia la reacción de combustión con una chispa generada a través de la caja de ignición.
13. Se registró un total de 180 lecturas y se detuvo el experimento.

14. Finalizado el experimento, se desmontó el equipo y se retiró la bomba de combustión para despresurizarla y limpiar el interior con agua destilada.
15. El exterior del crisol se limpió con agua destilada y se colocó en la estufa durante 15 minutos para evaporar el agua residual. Una vez seco, se obtuvo su masa en la balanza para cuantificar el hollín generado.
16. Se recupero la fase líquida del interior de la bomba en un matraz de aforación de 100 ml.
17. A la fase líquida obtenida del interior de la bomba, se le realizaron titulaciones volumétricas para determinar la concentración de la disolución ácida que se forma como producto de la reacción de combustión. Para ello se utilizó una disolución de hidróxido de sodio a una concentración de 0.0018 M, además de fenolftaleína como indicador de pH.
18. Finalmente, se generó un gráfico de temperatura en función del tiempo conocido como termograma.

Con los datos de masa y temperatura se obtiene la energía de combustión de cada experimento utilizando la ecuación 13.

$$\Delta_c u = \frac{\varepsilon_{\text{calor}} \times \Delta T_c - m\Delta_c u(\text{pe}) - m\Delta_c u(\text{alg}) - m\Delta_c u(\text{alam}) - m\Delta_c u(\text{hol}) - \Delta U_{\text{ign}} - \Delta U_{\text{HNO}_3}}{m_{\text{muestra}}} \quad (13)$$

Donde:

$\Delta_c u$ = Poder calorífico.

$\varepsilon_{\text{calor}}$ = Equivalente calorimétrico.

ΔU_{ign} = Energía asociada al proceso de ignición.

m_{muestra} = Masa de la muestra.

$m\Delta_c u$ (pe, alg, alam, hol) = Producto de la masa de cada material por su energía de combustión de este.

ΔU_{HNO_3} = Energía de formación de ácido nítrico.

4.6 Temperatura de ignición

La temperatura de ignición es la temperatura mínima donde los vapores generados por una sustancia son los suficientes para generar ignición en presencia de aire y una fuente de calor externa.

Para la obtención de la temperatura de ignición del biodiésel se realizó un sistema basado en el método de la copa abierta de Cleveland. La copa abierta de Cleveland (Figura 23) consta de un plato (1) donde se coloca la muestra y se encuentra un termómetro (2) para monitorear la temperatura. El plato está en contacto con una fuente de calor (3) que

calienta la muestra y cerca de la superficie de la muestra se encuentra otra fuente de calor (4) que administra una chispa o flama para generar la ignición.

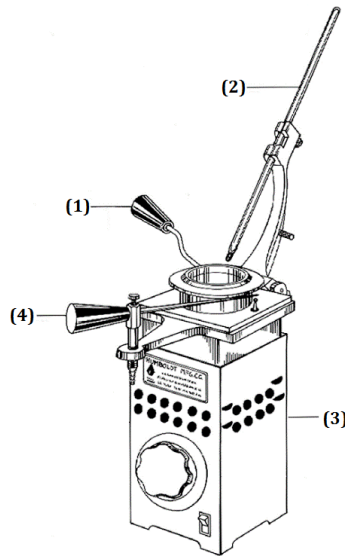


Figura 23. Aparato para la determinación de la temperatura de ignición basado en el método de copa abierta de Cleveland.

Experimentalmente, el sistema fue hecho con una lata de aluminio con una parte cóncava que cumple como el plato donde se coloca la muestra (1). Con apoyo de un soporte universal y una pinza de laboratorio se ajustó un termómetro (2) cerca del plato donde se coloca la muestra. En la parte inferior se coloca un mechero de etanol (3) cuya función es aportar calor al plato para aumentar la temperatura de la muestra. Finalmente, se coloca un encendedor para cocina (4) como fuente de ignición para iniciar la combustión de los vapores (Figura 24). Alrededor del sistema se colocan cuadros de poliestireno para aislar el sistema del exterior.

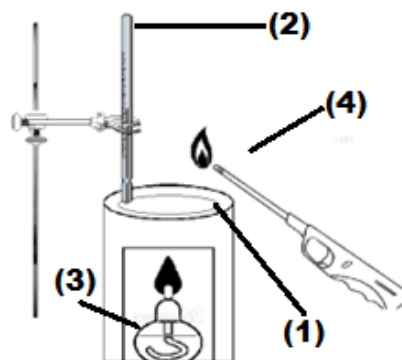


Figura 24. Sistema diseñado para la determinación de la temperatura de ignición.

El procedimiento para la determinación de la temperatura de ignición se describe a continuación.

1.- El plato se lavó con agua y jabón, se enjuagó con agua destilada y se dejó secar por unos minutos. Después se limpió con etanol para evaporar el agua restante.

2.- Se agregaron 2 ml de la muestra en el plato.

3.- El bulbo del termómetro se colocó cerca de la superficie de la muestra, pero sin tener contacto.

4.- Se encendió el mechero de etanol y cuando la temperatura llegó a 50 °C, se acercó el encendedor de cocina manteniendo la llama encendida.

5.- Al sobrepasar los 80 °C, fue visible que los vapores del biodiésel a una temperatura dada generaron una ignición. Al observar esta combustión, se registró la temperatura indicada por el termómetro, se apagó la llama del encendedor y del mechero finalizando el experimento.

5 Resultados y Discusión

5.1 Rendimiento de biodiésel

La tabla 18 muestra las masas de los reactivos, biodiésel y el rendimiento de la reacción de transesterificación.

Tabla 18. Valores para el rendimiento del biodiésel.

	Masa
	g
Aceite de cocina residual	86.067
Metanol	13.605
Biodiésel	34.038
Rendimiento / % = 34	

Como se observa en la tabla 18, el rendimiento obtenido (34 %) es considerablemente bajo en comparación con el rendimiento mínimo que se espera en la práctica de laboratorio realizada por los alumnos de licenciatura (≥ 70 %).

Como se mencionó previamente, algunas de las variables que afectan al rendimiento de la reacción, son la calidad de la materia prima, la calidad del catalizador y la metodología utilizada. La reacción de transesterificación mediante un catalizador básico fue elegida por sus ventajas, siendo una de estas el alto rendimiento que se obtiene, pero solo es posible cuando los reactivos se encuentran en buenas condiciones, como un metanol y catalizador de alto grado de pureza y sin humedad.

La calidad del aceite residual de cocina desempeña un papel importante en el rendimiento final, ya que diversas condiciones como el uso previo del aceite, el tiempo de almacenamiento del aceite residual y el contacto con el ambiente, pueden modificar su composición, aumentando la cantidad de ácidos grasos libres.

La metodología implementada, fue ideada con un aceite en específico, utilizando las cantidades de reactivo y condiciones de reacción óptimas para esa materia prima. Esto genera que, para otra materia prima con una composición diferente, no se obtenga el mismo rendimiento.

5.2 Índice de acidez

5.2.1 Determinación del índice de acidez del aceite residual de cocina.

Los resultados del índice de acidez del aceite residual de cocina se presentan en la tabla 19.

Tabla 19. Índice de acidez del aceite residual de cocina.

Masa g	Volumen KOH ml	[KOH] mol · L ⁻¹	Índice de acidez mg(KOH) · g ⁻¹
1.75692	0.2	0.1	0.64
1.75323	0.2	0.1	0.64
1.74270	0.2	0.1	0.64
índice de acidez / mg(KOH) · g ⁻¹ = 0.64			

Los valores obtenidos para el aceite residual de cocina se encuentran arriba de lo reportado por Ichu et al. [67] que reporta en la mayoría de los aceites comestibles tiene un índice de acidez de 0.6 mg(KOH) · g⁻¹. Esto indica que, al utilizar el aceite vegetal para cocinar alimentos, aumenta la formación de ácidos grasos libres.

El índice de acidez del aceite residual de cocina es una propiedad que debe ser considerada para la obtención del biodiésel cuando se realice por medio de una reacción de transesterificación básica. Vinoth et al. [68] menciona que la reacción de transesterificación no se lleva a cabo, si el contenido de ácidos grasos libres en el aceite es superior al 3 % en peso.

5.2.2 Determinación del índice de acidez del biodiésel.

Los resultados del índice de acidez del biodiésel obtenido se encuentran reportados en la tabla 20.

Tabla 20. Índice de acidez de biodiésel.

Masa g	Volumen KOH ml	[KOH] mol · L ⁻¹	Índice de acidez mg(KOH) · g ⁻¹
2.17019	0.05	0.1	0.13
2.17224	0.05	0.1	0.13
2.16542	0.05	0.1	0.13
índice de acidez / mg(KOH) · g ⁻¹ = 0.13			

Los valores del índice de acidez del biodiésel obtenido se encuentran justo en el rango que las normas ASTM D6752 [22] y EN 14214 [23] establecen, que es máximo 0.5 mg(KOH) · g⁻¹. El bajo índice de acidez indica que, por un considerable periodo de tiempo, el biodiésel obtenido será estable [67].

Además de ser estable, el bajo índice de acidez indica que el biodiésel es adecuado para su uso en motores de combustión, ya que no genera los problemas mencionados previamente como la corrosión en los componentes del motor.

El bajo índice de acidez del biodiésel en comparación con el del aceite residual de cocina indica que durante el tiempo que estuvo almacenado, parte de los triglicéridos se convirtieron en ácidos grasos libres, pudiendo generar problemas como un aumento en viscosidad y un rendimiento deficiente.

5.3 Densidad.

5.3.1 Determinación de la densidad del aceite residual de cocina.

En la tabla 21 se muestran los resultados de la densidad del aceite residual de cocina.

Tabla 21. Valores de densidad del aceite residual de cocina a 25 °C.

Masa g	Densidad g · cm⁻³
4.57986	0.916
4.57688	0.915
4.57764	0.915
Densidad / g · cm ⁻³ = 0.915	

Salihu et al. [69] reporta una densidad de 0.92 g · cm⁻³ para el aceite residual de cocina, un valor cercano al obtenido en este trabajo. Y lo reportado por Hodgman [70] para el aceite de cocina comestible (0.91 g · cm⁻³ – 0.93 g · cm⁻³), indican que no existe una gran diferencia entre la densidad del aceite de cocina comestible y el aceite de cocina residual.

La densidad del aceite residual de cocina cae dentro este rango según lo reportado por Salihu et al. [69], indicando que la reacción de transesterificación logra reducir un poco la densidad del aceite residual de cocina comparada con la del biodiésel.

5.3.2 Determinación de la densidad del biodiésel.

En la tabla 22 se reportan los valores de densidad obtenidos para el biodiésel.

Tabla 22. Valores para la densidad de biodiésel a 25 °C.

Masa del biodiésel g	Densidad g · cm⁻³
4.55564	0.911
4.55434	0.911

4.55502	0.911
Densidad / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} = 0.911$	

Las normas ASTM D6751 [22] y EN 14214 [23] establecen el estándar de la densidad del biodiésel en $0.880 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ y $(0.860 \text{ a } 0.900) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectivamente. La densidad obtenida en este trabajo no se encuentra dentro de dicho intervalo para ambas normas, el valor supera el límite por $(0.031 \text{ y } 0.0110) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

El valor obtenido de la densidad indica que el biodiésel no es apto para su uso al 100 % en motores de combustión debido a que una alta densidad puede afectar la inyección del combustible desgastando el motor.

La obtención de una alta densidad en el biodiésel puede deberse al tiempo de almacenamiento, ya que como se mencionó previamente, esto puede causar un aumento en los ácidos grasos libres, lo que provoca la polimerización oxidativa y el aumento de la densidad.

Aunque las normas están establecidas para su uso en motores de combustión y ese no es el objetivo de este trabajo, tener una alta densidad representa un problema, ya que afecta a las diferentes opciones, incluso cuando se realizan mezclas con un disolvente o diésel.

5.4 Viscosidad

El uso de un viscosímetro de Ostwald necesita de un valor que sirva como referente para la obtención de otras viscosidades. En la tabla 23 se presentan los valores que se obtuvieron de agua destilada.

Tabla 23. Valores de agua destilada como referente de viscosidad a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tiempo s	Densidad $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
68	0.997
Viscosidad Dinámica / cP = 0.89	

5.4.1 Determinación de la viscosidad cinemática del aceite residual de cocina.

La tabla 24 muestra los resultados obtenidos de la determinación de la viscosidad del aceite residual de cocina.

Tabla 24. Valores de viscosidad del aceite residual de cocina a $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tiempo S	Densidad $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Viscosidad Dinámica Centipoises	Viscosidad Cinemática Centistokes
-------------	---	------------------------------------	--------------------------------------

5400		62.06	67.81
5376	0.915	61.79	67.52
5375		61.78	67.50
Viscosidad Cinemática / cSt = 67.66			

Los resultados de la viscosidad cinemática obtenida del aceite residual de cocina se encuentra muy arriba, casi al doble, de lo que reportan autores como Salihu et al. [69] que reportó una viscosidad de 31.20 cSt y Diamante et al. [71] que reportó 39.8 cSt.

En la bibliografía se encuentra que comúnmente la viscosidad del aceite residual de cocina está en un rango de (30 – 40) cSt y al obtener el biodiésel, la viscosidad disminuye a un valor menor 6 cSt, por ejemplo, en lo reportado por Salihu [69], a través de diferentes cantidades de catalizador obtuvo viscosidades que no superaron un valor entre (1.88 – 2.8) cSt.

Se mencionó previamente que, en el caso de la densidad, existen diversos factores que afectan la composición y ocasionan un aumento en la viscosidad debido a la polimerización oxidativa.

5.4.2 Determinación de la viscosidad cinemática del biodiésel.

Los resultados de la determinación de la viscosidad del biodiésel se presentan en la tabla 25.

Tabla 25. Valores de viscosidad dinámica y cinemática del biodiésel a 40 °C.

Tiempo s	Densidad g · cm⁻³	Viscosidad Dinámica Centipoises	Viscosidad Cinemática Centistokes
3837		33.5	36.8
3799	0.911	33.2	36.4
3840		33.5	36.8
Viscosidad Cinemática / cSt = 36.7			

Como se observa en la tabla 25, la viscosidad cinemática obtenida del biodiésel se encuentra muy arriba del valor establecido por la norma ASTM D6751 [22] de 1.9 – 6.0 cSt y la norma EN 14214 [23] de 3.5 - 5.0 cSt. La viscosidad cinemática obtenida es 6 veces mayor al límite de lo establecido por las normas.

Ayetor et al. [72] reporta que la viscosidad se encuentra relacionada con el agua y los ácidos grasos libres presentes en el biodiésel, ya que en un experimento agregó ácido sulfúrico como catalizador, que actuó como agente desecante y disolvió los ácidos grasos libres, reduciendo en un 40 % la viscosidad del biodiésel.

La alta viscosidad del biodiésel puede deberse a el tiempo indefinido que la materia prima ha estado en almacenamiento sin ningún cuidado y en contacto con el ambiente, lo que genera una reacción de oxidación y una polimerización.

La viscosidad obtenida indica que el biodiésel no es indicado para su uso en motores de combustión. Con una viscosidad alta se tiene una atomización deficiente que solo desgasta las piezas del motor. Para otros usos tampoco es adecuado, porque siendo una propiedad de flujo no permitirá que el combustible pueda fluir con facilidad.

5.5 Calorimetría de combustión

La tabla 26 muestra la energía de combustión de materiales auxiliares como algodón, polietileno y alambre de níquel, además del hollín.

Tabla 26. Propiedades de los materiales involucrados durante la combustión.

Material	$\frac{\Delta_c u^\circ}{\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}}$
Algodón	16.9452 [66]
Polietileno	46.3726 [66]
Alambre de níquel – cromo	5.8576 [73]
Hollín	32.8 [74]

5.5.1 Determinación del poder calorífico del biodiésel.

La tabla 27 muestra los resultados de seis experimentos de combustión del biodiésel obtenido que fueron realizados en el calorímetro de combustión de bomba estática. De manera general, en la tabla se muestran las masas de biodiésel, hollín y materiales auxiliares utilizados en la combustión, el incremento de temperatura, la energía de combustión del hollín, materiales auxiliares y biodiésel. La incertidumbre del poder calorífico del biodiésel se obtuvo con la desviación estándar de la media calculada a partir de los valores experimentales.

Tabla 27. Valores experimentales de la combustión de biodiésel.

	1	2	3	4	5	6
m_{comp}/g	0.58572	0.59853	0.58612	0.58316	0.58242	0.58488
m_{alg}/g	0.00213	0.00212	0.00246	0.00242	0.00214	0.00231
m_{alam}/g	0.00880	0.00855	0.00906	0.00870	0.00871	0.00891
m_{poli}/g	0.07210	0.06651	0.06642	0.06152	0.06536	0.07245
m_{res}/g	0.00004	0.00006	0.00001	0.00005	0.00005	0.00006
$(-m\Delta_c u^\circ_{\text{alg}})/\text{kJ}$	0.03609	0.03592	0.04169	0.04101	0.03626	0.03914
$(-m\Delta_c u^\circ_{\text{alam}})/\text{kJ}$	0.05155	0.05008	0.05307	0.05096	0.05102	0.05219

$(-m\Delta_c u^\circ_{\text{poli}})/\text{kJ}$	3.34346	3.08424	3.08007	2.85284	3.03091	3.35969
$(-m\Delta_c u^\circ_{\text{hol}})/\text{kJ}$	0.00131	0.00197	0.00033	0.00164	0.00164	0.00197
$\Delta T_c/\text{K}$	2.60812	2.62997	2.58390	2.55295	2.56019	2.60483
$\Delta U_{\text{ign}}/\text{kJ}$	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042	0.0042
$\Delta U(\text{HNO}_3)/\text{kJ}$	0.00075	0.00086	0.00075	0.00096	0.00107	0.0096
$(-\Delta_c u)_{\text{comp}}/\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	39.4278	39.3978	39.3940	39.4162	39.3660	39.4077
$\langle (-\Delta_c u) / \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} \rangle = 39.4016 \pm 0.0195$						

m_{comp} , masa del compuesto; m_{poli} , masa del polietileno; m_{alg} , masa del hilo de algodón; m_{hol} , masa del hollín; m_{alam} , masa del alambre de Níquel; ΔT_c , incremento de temperatura corregido, $m_c u_{\text{poli}}$, producto de la masa por la energía de combustión del polietileno; $m_c u_{\text{alg}}$, producto de la masa por la energía de combustión del algodón; $m_c u_{\text{alam}}$, producto de la masa por la energía de combustión del alambre de níquel; $m_c u_{\text{hol}}$, producto de la masa por el valor de corrección del hollín; U_{ign} , energía de ignición; $m_c u_{\text{comp}}$, energía de combustión del compuesto.

Se observa que el valor promedio de la energía de combustión obtenido en este trabajo es de $39.4016 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, este valor es comparable con el reportado por Sakthivel [25] de $(35.401 - 43.210) \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$.

Como se mencionó anteriormente, las normas ASTM D6751 [22] y EN 14214 [23] no establecen un parámetro para esta propiedad, pero sí lo hace la norma EN 14213 que establece los análisis para combustibles de calefacción de ácidos grasos de metil ésteres, establece que el poder calorífico mínimo es de $35.000 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. El valor obtenido en este trabajo cae dentro del valor establecido por la norma EN 14213, lo que indica que sería adecuado para su uso como combustible dado la energía que libera durante una reacción de combustión.

Si bien el poder calorífico del biodiésel es aceptable para los valores establecidos en la bibliografía, es menor en comparación con el poder calorífico del diésel (mínimo $43 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$) [75] que tiene un aporte de energía mucho mayor. Para aumentar el valor del poder calorífico del biodiésel se puede mezclar con diésel, tal como lo reporta Xiao et al. [76]

El poder calorífico se relaciona con la estructura de la molécula y en el caso del biodiésel, a una mayor cadena carbonada, mayor será el poder calorífico [46]. Por lo que, al tener una composición diferente de la materia prima, aceite, o grasa, se tendrá un compuesto mayoritario diferente en el biodiésel y tendrá un poder calorífico diferente.

5.6 Temperatura de ignición

En la tabla 29 se muestran los resultados obtenidos para la determinación de la temperatura de ignición del biodiésel.

Tabla 28. Valores de la temperatura de ignición de biodiésel.

Experimento	Temperatura °C
1	102
2	101
3	110
Promedio de la temperatura de ignición = 104 °C	

En esta parte del trabajo no se pudo realizar la obtención de la temperatura de ignición del aceite residual de cocina, ya que su temperatura de ignición se encuentra en un rango de (248 – 250) °C [77] y experimentalmente no es viable.

La temperatura de ignición es una propiedad en la que se basan para la seguridad del combustible al momento de su transporte y almacenamiento. El valor obtenido para el biodiésel es inferior al valor establecido por la norma ASTM D6751 de mínimo 130 °C, mientras que para la norma EN 14214 el valor si cae en el mínimo establecido de 101 °C.

Una temperatura de ignición baja puede indicar que el metanol utilizado durante la reacción no fue eliminado en su totalidad. Como reporta Abd et al. [78], cuando el metanol se encuentra en una cantidad considerable, la temperatura de ignición puede tener una disminución drástica. Sin embargo, al analizar el valor obtenido en este trabajo, se puede considerar que no tiene una cantidad considerable de metanol.

Cabe mencionar que el método de la copa abierta presenta algunos inconvenientes como la exposición al ambiente, lo que pudo haber ocasionado la diferencia entre los valores obtenidos en este trabajo y los reportados en la norma ASTM D975 de 125.6 °F (52 °C).

6 Conclusiones

- El método de reacción de transesterificación elegido utiliza un catalizador básico que tiene algunas ventajas en comparación con los demás métodos como un rendimiento alto, sin embargo, se requiere de una alta calidad en los materiales y la materia prima.
- Se determinó que la mayoría de las propiedades obtenidas del biodiésel como índice de acidez, poder calorífico y temperatura de ignición, cumplen con las normas internacionales, a excepción de las propiedades de flujo como densidad y viscosidad que sobrepasan los límites establecidos. Se infiere que se debe al tiempo de almacenamiento en el que estuvo la materia prima.
- El poder calorífico del biodiésel cumple con la norma EN 14213, por lo que es muy probable que sea eficiente en aplicaciones asociadas con la energía liberada durante la combustión.
- La optimización del método y la práctica del laboratorio representa un impulso significativo para incrementar la producción de biodiésel, al mismo tiempo que fomenta la exploración de nuevos usos y aplicaciones, contribuyendo al desarrollo sostenible.

7 Bibliografía

- [1] P. Groumpos, «A Critical Historical and Scientific Overview of all Industrial Revolutions,» *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, nº 13, pp. 464 - 471, 2021.
- [2] Nunes, L. J. R. (2023). *The rising threat of atmospheric CO2: A review on the causes, impacts, and mitigation strategies*. *Environments*, 10(4), 66.
<https://doi.org/10.3390/environments10040066>.
- [3] Rasmussen, C. E. (2024). *Atmospheric carbon dioxide growth rate*. Cambridge Machine Learning Group. Recuperado el 12 de septiembre de 2024, de <https://mlg.eng.cam.ac.uk/carl/words/carbon.html>.
- [4] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.*, Cambridge University Press,
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf.
- [5] Lan, X., Tans, P., K.W. (2024) *Thoning: Trends in globally-averaged CO2 determined de NOAA Global Monitoring Laboratory measurements*. Recuperado el 05 de Septiembre del 2024 de <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>.
- [6] Lan, X., K.W. Thoning, y E.J. Dlugokencky. (2024) *Trends in globally-averaged CH4, N2O, and SF6, NOAA Global Monitoring Laboratory measurements*. Recuperado el 5 de septiembre del 2024 de <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.
- [7] U.S. Energy Information Administration. (2024). *Monthly Energy Review August 2024*.
<https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/mer.pdf>.
- [8] Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2020). *Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector*. *Ourworldindata.org*. Recuperado el 12 de septiembre de 2024, de <https://shorturl.at/DrTuR>.
- [9] Buha, A. (2011). *The Greenhouse Effect*. *Healthandenvironment.org*. Recuperado el 9 de octubre de 2024, de <https://www.healthandenvironment.org/docs/ToxipediaGreenhouseEffectArchive.pdf>.
- [10] Romero, J., & Lee, H. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, summary for Policymakers*. En *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report*

(pp. 1–34). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
<https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6>.

- [11] Alrikabi, M. A. (2014). *Renewable Energy Types*. *Journal of clean energy technologies*, 61–64. <https://doi.org/10.7763/jocet.2014.v2.92>.
- [12] Tawfeeq, W. M. (2021). *Biomass Energy*.
https://www.researchgate.net/publication/355204245_Biomass_Energy.
- [13] United States Department of Agriculture [USDA]. (2023). *México: Oilseeds and Products Annual*. United States Department of Agriculture [USDA].
<https://shorturl.at/FxrSP>.
- [14] Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., Natarajan, M. (2012). *Review of biodiesel composition, properties, and specifications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 143–169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>.
- [15] Mainali, K. (2012). *Base catalytic transesterification of vegetable oil*. *Science Progress*, 95(1), 50–72. <https://doi.org/10.3184/003685011x13205103999987>.
- [16] Refaat, A. A. (2012). *Biofuels from waste materials*. *En Comprehensive Renewable Energy* (pp. 217–261). Elsevier.
- [17] Bambase, M. E., Nakamura, N., Tanaka, J., Matsumura, M. (2007). *Kinetics of hydroxide-catalyzed methanolysis of crude sunflower oil for the production of fuel-grade methyl esters*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, pp. (Oxford, Oxfordshire: 1986), 82(3), 273–280. <https://doi.org/10.1002/jctb.1666>.
- [18] Robbins, C., Hoekman, S. K., Cenicerros, E., Natarajan, M. (2011). *Effects of biodiesel fuels upon criteria emissions*. *SAE Technical Paper Series*.
- [19] Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Jayed, M. H., & Liaquat, A. M. (2011). *Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil*. *Energy (Oxford, England)*, 36(1), 397–402, p.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.026>.
- [20] Nye, M. J., Williamson, T. W., Deshpande, W., Schrader, J. H., Snively, W. H., Yurkewich, T. P., & French, C. L. (1983). *Conversion of used frying oil to diesel fuel by transesterification: Preliminary tests*. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, pp. 60(8), 1598–1601. <https://doi.org/10.1007/bf02666593>.

- [21] *About us.* (s/f). Astm.org. Recuperado el 9 de septiembre de 2024, de <https://www.astm.org/about/overview.html>.
- [22] *ASTM 6751: Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels.* (s/f). American Society for Testing and Materials.org. Recuperado el 20 de septiembre de 2024, de <https://www.astm.org/d6751-20a.html>.
- [23] *European standards.* (s/f). CEN-CENELEC. Recuperado el 20 de septiembre de 2024, de <https://www.cencenelec.eu/european-standardization/european-standards/>.
- [24] *DIN EN 14214:2009.* (s/f). Ansi.org. Recuperado el 20 de septiembre de 2024, de <https://rb.gy/n00jnd>.
- [25] Sakthivel, R., Ramesh, K., Purnachandran, R., Mohamed Shameer, P. (2018). A review on the properties, performance and emission aspects of the third generation biodiesels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2970–2992..
- [26] Ozsezen, A. N., Canakci, M. (2010). The emission analysis of an IDI diesel engine fueled with methyl ester of waste frying palm oil and its blends. *Biomass & Bioenergy*, 34(12), 1870–1878. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.024>.
- [27] Sudhir, C. V., Sharma, N. Y., Mohanan, P. (2007). Potential of waste cooking oils as biodiesel feedstock. *Emirates Journal for Engineering Research*, 12, 69–75..
- [28] Lin, Y. -S., Lin, H.-P. (2010). Study on the spray characteristics of methyl esters from waste cooking oil at elevated temperature. *Renewable Energy*, 35(9), 1900–1907. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.014>.
- [29] Muralidharan, K., & Vasudevan, D. (2011). Performance, emission and combustion characteristics of a variable compression ratio engine using methyl esters of waste cooking oil and diesel blends. *Applied Energy*, 88(11), 3959–3968, p. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.014>.
- [30] Lin, Y.-C., Hsu, K.-H. y Chen, C.-B. (2011). Experimental investigation of the performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel/ultra-low sulfur diesel blends. *Energy (Oxford, England)*, 36(1), 241–248.
- [31] Işık, M. Z., Bayındır, H., İscan, B., Aydın, H. (2017). The effect of n-butanol additive on low load combustion, performance and emissions of biodiesel-diesel blend in a heavy

- duty diesel power generator.*, pp. Journal of the Energy Institute, 90(2), 174–184.
<https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.006>.
- [32] Duah, M., Zhang, K., Liang, Y., Ayarick, V. A., Xu, K., Pan, B. (2023). *Immune regulation of poly unsaturated fatty acids and free fatty acid receptor 4. The Journal of Nutritional Biochemistry*, pp. 112(109222), 109222.
<https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2022.109222>.
- [33] Nayak, P. K., Dash, U., Rayaguru, K., Krishnan, K. R. (2016). *Physio-chemical changes during repeated frying of cooked oil: A review: Deep frying of oil.*, pp. Journal of Food Biochemistry, 40(3), 371–390. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12215>.
- [34] MANTECH, *Application Note #67 – Total Acid Number (TAN)*. (2016, diciembre). *Mantech-inc.com*. <https://mantech-inc.com/wp-content/uploads/2016/07/67-Total-Acid-Number-TAN.pdf>.
- [35] *Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration. (s/f)*. *Astm.org*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://www.astm.org/d0664-18e02.html>.
- [36] *Standard test method for acid and base number by color-indicator titration. (s/f)*. *Astm.org*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://www.astm.org/d0974-22.html>.
- [37] *Standard test method for dynamic viscosity and density of liquids by stabinger viscometer (and the calculation of kinematic viscosity). (s/f)*. *Astm.org*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://www.astm.org/d7042-21a.html>.
- [38] Ramirez Verduzco, L.F. (2013). *Density and viscosity of biodiesel as a function of temperature: Empirical models. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 652–665. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.022>.
- [39] *Standard test method for density, relative density, or API gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method. (s/f)*. *Astm.org*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://www.astm.org/d1298-12br17e01.html>.
- [40] Lima, L. S., Barbosa, T. P., Castro, C. S. C., Siqueira, J. R., Barbosa, A. P., Marteleto, P. R., & Pereira, R. G. (s/f). *Biodiesel Density Characterization Using a Pycnometer. Cenam.mx*, pp. Recuperado el 30 de octubre de 2024 de <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pmiercoles/sm2010-mp06a.pdf>.

- [41] American Society for Testing and Materials. (s/f). *Standard test method for Density of liquid coatings, inks, and related products*. Recuperado el 2 de octubre de 2024, de <https://www.astm.org/d1475-13r20.html>.
- [42] American Society for Testing and Materials. (s/f) *Standard specification for reagent water*. *Astm.org*. Recuperado el 2 de octubre de 2024, de <https://www.astm.org/d1193-06r18.html>.
- [43] Hack, R. (2018). *Viscosity*. En *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (pp. 926–929). Springer International Publishing.
- [44] ¿Qué es la viscosidad? (2024). *Instru.es*. <https://www.instru.es/ficheros/1.CA-BR-%20que%20es%20la%20viscosidad-rev2.pdf>.
- [45] Parente, R. C., Nogueira, C. A., Jr, Carmo, F. R., Lima, L. P., Fernandes, F. A. N., Santiago-Aguiar, R. S., & de Sant’Ana, H. B. (2011), pp. Excess volumes and deviations of viscosities of binary blends of sunflower biodiesel + diesel and fish oil biodiesel + diesel at various temperatures. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 56(7), 3061–3067. <https://doi.org/10.1021/je200120t>.
- [46] Jakeria, M. R., Fazal, M. A. y Haseeb, A. S. M. A. (2014). *Influence of different factors on the stability of biodiesel: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.024>.
- [47] Andrew Waynick, J. (2005). *Characterization of biodiesel oxidation and oxidation products*. <https://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39096.pdf>.
- [48] *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*. (s/f). *Astm.org*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://www.astm.org/standards/d445>.
- [49] Erol, M., Haykiri-Acma, H., & Küçükbayrak, S. (2010). *Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data*. *Renewable Energy*, 35(1), 170–173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>.
- [50] *UNE-EN 14213:2003*. (s/f). *Une.org*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=norma-une-en-14213-2003-n0030428>.

- [51] DIN 51900:2022-06. (s/f). Aenor.com. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://tienda.aenor.com/norma-din-51900-2022-06-353573378>.
- [52] Santos, L. M. N. B. F., Silva, M. T., Schröder, B., Gomes, L. (2007). Labtermo: Methodologies for the calculation of the corrected temperature rise in isoperibol calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 89(1), 175–180..
- [53] Riazi, M. R. (2005). *Characterization and properties of petroleum fractions*. American Society for Testing & Materials..
- [54] Wagner, C., & Schwarzmann, A. (s/f). ASTM D7094 - Modified Continuously Closed Cup Flash Point Standard Accepted as a Safe Alternative Method in Various Fuel Specs, pp. Recuperado el 10 de octubre de 2024, de <https://eralytics.com/wp-content/uploads/Eraflash-PIN-02-14.pdf>.
- [55] Ozsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan, A., Sayin, C. (2009). Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. *Fuel (London, England)*, 88(4), 629–636.
- [56] Utlu, Z., Koçak, M. S. (2008). The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Renewable Energy*, 33(8), 1936–1941. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.006>.
- [57] Meng, X., Chen, G., Wang, Y. (2008). Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. *Fuel Processing Technology*, 89(9), 851–857. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.02.006>.
- [58] Encinar, J. M., González, J. F. y Rodríguez-Reinares, A. (2007). Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. *Fuel Processing Technology*, 88(5), 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.002>.
- [59] Lertsathapornsuk, V., Pairintra, R., Aryasuk, K. Krisnangkura, K. (2008). Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1330–1336.
- [60] Boog, J. H. F., Silveira, E. L. C., de Caland, L. B., Tubino, M. (2011). Determining the residual alcohol in biodiesel through its flash point. *Fuel (London, England)*, 90(2), 905–907. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.020>.

- [61] *Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester.* (s/f). *Astm.org*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de <https://www.astm.org/d0092-18.html>.
- [62] *PubChem.* (s/f). *Ethanol.* *Nih.gov*. Recuperado el 5 de septiembre de 2024, de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ethanol>.
- [63] *Water USP, ph. Eur., purified.* (s/f). *VWR.* Recuperado el 5 de septiembre de 2024, de <https://us.vwr.com/store/product/13487098/null>.
- [64] *PubChem.* (s/f). *Water.* *Nih.gov*. Recuperado el 6 de septiembre de 2024, de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Water>.
- [65] *Perdomo León, G. (2018b). Estudio termoquímico de derivados del imidazol y bencimidazol [Benemerita Universidad Autonoma de Puebla].* <https://hdl.handle.net/20.500.12371/8431>.
- [66] *J. M. Mentado, J., Flores, H., & Amador, P. (2008). Combustion energies and formation enthalpies of 2-SH-benzazoles. The Journal of Chemical Thermodynamics, 40(7), 1106–1109.* <https://doi.org/10.1016/j.jct.2008.02.018>.
- [67] *Ichu C.B., Nwakanma H.O. (2019). Comparative study of the physicochemical characterization and quality of edible vegetable oils. International Journal of Research in Informative Science Application & Techniques (IJRISAT), 3(2), 1–9..*
- [68] *Vinoth, E. (2015). Biodiesel production from waste cooking oil. International Journal of Students Research in Technology & Management, 3(8), 448–450.* <https://doi.org/10.18510/ijstrtm.2015.383>.
- [69] *Salihu, A., Mahmood, A. A., Gimba, S., Nzerem, P., & Okafor, I. (2021). Production of biodiesel from waste cooking oil by transesterification process using heterogeneous catalyst. Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology, 5(2), 501–510..*
- [70] *Hodgman, C.D., Lange N.A. Handbook of Chemistry and Physics. Cleveland: Chemical Rubber Co., 1924: 312–313..*
- [71] *Lemuel, D., Tianying, L. (2014). Absolute Viscosities of Vegetable Oils at Different Temperatures and Shear Rate Range of 64.5 to 4835 s⁻¹. Journal of food Processing, 03.* <https://doi.org/10.1155/2014/234583>.

- [72] Ayetor, G. K., Sunnu, A., Parbey, J. (2015). *Effect of biodiesel production parameters on viscosity and yield of methyl esters: Jatropha curcas, Elaeis guineensis and Cocos nucifera*. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 1285–1290.
- [73] Accesorios. (2011, mayo 4). *Parr Instrument (Español)*. <https://www.parrinst.com/es/products/sample-preparation/oxygen-combustion-bombs/options-accessories/>.
- [74] Rossini, F. (1956). *Experimental Thermochemistry: Measurements of heats of reaction*. Interscience Publishers..
- [75] Wan Ghazali, W. N. M., Mamat, R., Masjuki, H. H., Najafi, G. (2015). *Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 585–602..
- [76] Xiao, H., Wang, W., Bao, H., Li, F., Zhou, L. (2023). *Biodiesel-diesel blend optimized via leave-one cross-validation based on kinematic viscosity, calorific value, and flash point*. *Industrial Crops and Products*, 191(115914), 115914..
- [77] Yusof, S. N. A., Basharie, S. M., Sidik, N. A. C., Asako, Y., & Mohamed, S. B. (2021). *Characterization of crude palm oil (CPO), corn oil and waste cooking oil for biodiesel production*. *Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vols. %1 de %286(2), 136–146. <https://doi.org/10.37934/arfmts.86.2.136146>.
- [78] Abd Rabu, R., Janajreh, I., Honnery, D. (2013). *Transesterification of waste cooking oil: Process optimization and conversion rate evaluation*. *Energy Conversion and Management*, 65, 764–769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.031>.