

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

Evaluación técnica y económica de la producción de bioqueroseno  
obtenido de diferentes tipos de aceites

Trabajo de graduación presentado por Reynaldo Gaspar Raymundo Santiago  
en modalidad de tesis para optar al grado académico de Licenciado en  
Ingeniería Química Industrial.

Guatemala,

2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

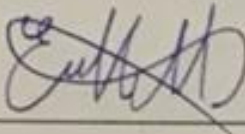
Evaluación técnica y económica de la producción de bioqueroseno  
obtenido de diferentes tipos de aceites

Trabajo de graduación presentado por Reynaldo Gaspar Raymundo Santiago  
en modalidad de tesis para optar al grado académico de Licenciado en  
Ingeniería Química Industrial.

Guatemala,

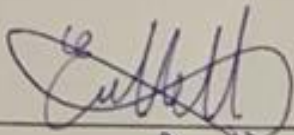
2025

Vo. Bo.

(f)  \_\_\_\_\_

Ing. Eddy Meléndez

Terna examinadora

(f)  \_\_\_\_\_

Ing. Eddy Meléndez

(f) \_\_\_\_\_

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M.Sc.

(f)  \_\_\_\_\_

Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda, M.A.

## PREFACIO

Este trabajo se centra en la innovadora propuesta de desarrollar un método para la producción de biocombustible para aviones. A pesar de las limitaciones inherentes, se ha evaluado su viabilidad mediante la aplicación de técnicas físicas y químicas en su proceso de producción. Como futuro ingeniero químico industrial, he llevado a cabo una investigación rigurosa, y he enfrentado diversos desafíos en la producción del bioqueroseno.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que me brindaron su apoyo técnico, económico y moral durante el transcurso de mi carrera y de este proyecto. En particular, agradezco a Verónica Jiménez, Alvhi Balcárcel, Anabella Molina y Evelyn Orantes por creer en mí desde el principio, a Fundación AMIVALLE por apoyarme en 2019 y 2020 durante mi carrera universitaria. A Fundación Educación por brindarme no solo un apoyo económico sino integral, a Cristina Novales, Michelle Castro y Kurt Schneider por estar al tanto en mi crecimiento integral. A Maya Educational Foundation por apoyarme económicamente desde 2019. Al Departamento de Ingeniería Química y al Departamento de Química por facilitarme los materiales necesarios. Mi reconocimiento especial a Vany Argueta por proporcionarme materia prima crucial y al MEng. Ing. Eddy Meléndez por asesorarme en este trabajo de investigación.

# CONTENIDO

<b>I. Introducción</b> .....	1
<b>II. Justificación</b> .....	2
<b>III. Objetivos</b> .....	3
<b>A. General</b> .....	3
<b>B. Específicos</b> .....	3
<b>IV. Marco Teórico</b> .....	4
<b>A. Combustibles en el sector de aviación</b> .....	4
<b>B. Bioqueroseno a partir de coco y palmiste</b> .....	5
<b>C. Normativas y Estándares para bioqueroseno</b> .....	6
<b>D. Procesos de producción de bioqueroseno</b> .....	9
<b>E. Caracterización Físicoquímica del Bioqueroseno</b> .....	17
<b>F. Aceites vegetales</b> .....	20
<b>G. Destilación al vacío</b> .....	24
<b>H. Cadena de suministros</b> .....	34
<b>I. Cadena de suministros bioqueroseno</b> .....	36
<b>J. Análisis Tecno-económico</b> .....	38
<b>K. Valor de mercado de la producción de biocombustibles a nivel mundial de 2021 a 2023, con previsión hasta 2030</b> .....	39
<b>V. Metodología</b> .....	41
<b>A. Transesterificación de aceites usando un reactor de 2 L.</b> .....	41
<b>B. Producción de Bioqueroseno a partir de la transesterificación de aceite usado de cocina.</b> .....	43
<b>C. Caracterización de bioqueroseno producido.</b> .....	45
<b>VI. Resultados.</b> .....	50
<b>VII. Análisis de Resultados</b> .....	54
<b>VIII. Conclusiones</b> .....	61
<b>IX. Recomendaciones</b> .....	62
<b>X. Referencias</b> .....	63
<b>XI. Anexos</b> .....	66
<b>XII. Glosario</b> .....	81

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Composición en porcentaje peso de los ácidos grasos en los tipos de aceite vegetal más comunes.....	21
Cuadro 2.	Materiales y cristalería necesarios para la transesterificación.....	41
Cuadro 3.	Reactivos necesarios para la transesterificación.....	41
Cuadro 4.	Materiales necesarios para la producción de bioqueroseno.....	43
Cuadro 5.	Materiales necesarios para determinar la densidad del bioqueroseno.....	45
Cuadro 6.	Materiales necesarios para determinar el poder calorífico del bioqueroseno.....	46
Cuadro 7.	Propiedades fisicoquímicas del bioqueroseno de aceite usado de cocina y aceite de coco.....	50
Cuadro 8.	Comparación del poder calorífico de las distintas mezclas de queroseno comercial con los destilados ligeros de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco.	50
Cuadro 9.	Densidad y pH de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco.....	51
Cuadro 10.	Punto de congelación de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco.....	51
Cuadro 11.	Simulación de libro de Estado de Resultados del bioqueroseno seleccionado (bioqueroseno aceite usado de cocina).....	53
Cuadro 12.	Propiedades fisicoquímicas del bioqueroseno de aceite usado de cocina y aceite de coco.....	66
Cuadro 13.	Comparación del poder calorífico de las distintas mezclas de queroseno comercial con los destilados ligeros de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco.	66
Cuadro 14.	Densidad y pH de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco.....	67
Cuadro 15.	Punto de congelación de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco.....	67
Cuadro 16.	Simulación de libro de Estado de Resultados del bioqueroseno seleccionado (bioqueroseno aceite usado de cocina).....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Tabla de combustibles alternativos para aviación según su origen.....	4
Figura 2.	Resultados de la caracterización de las mezclas de bioqueroseno con queroseno comercial.	6
Figura 3.	Propiedades de la mezcla de bioqueroseno de coco y queroseno fósil. ....	6
Figura 4.	Tabla de especificaciones para el Jet A-1. ....	7
Figura 5.	Combinaciones de materia prima y tecnología en el ámbito actual. ....	9
Figura 6.	Esquema de la producción del proceso de HEFA para biocombustible para reactores.	11
Figura 7.	Hydrogenación, los dobles enlaces de las cadenas de ácidos grasos se saturan añadiendo hidrogeno molecular, por ejemplo, el ácido oleico se satura a ácido esteárico. .	12
Figura 8.	Mecanismo de descomposición de los triacilgliceroles, mediante hidrogenación.	12
Figura 9.	Descarboxilación.....	13
Figura 10.	Conversión de hidrocarburos de cadena recta en hidrocarburos ramificados.	14
Figura 11.	Vías de reacción del catalizador bifuncional para la conversión en un solo paso de materia prima en biocombustible para reactores. ....	14
Figura 12.	Descarboxilación enzimática de ácidos grasos.....	16
Figura 13.	Producción enzimática de hidrocarburos en una olla .....	16
Figura 14.	Esquema del proceso DSHC (Direct Sugar to Hydrocarbon). ....	17
Figura 15.	Variación del punto de congelación con respecto a la concentración % (v/v) de impurezas en el Jet Fuel en Avgas. ....	18
Figura 16.	Gráfico de variación del punto de congelación con respecto a la concentración % (v/v) de impurezas en el Jet Fuel en Avgas.....	18
Figura 17.	Gamas de composición de ácidos grasos de aceite vegetal: coco en porcentaje del contenido total de ácidos grasos. ....	22
Figura 18.	Consumo de aceites vegetales en España. ....	23
Figura 19.	Índice de refracción del aceite de fritura. ....	24
Figura 20.	Sistema de destilación al vacío a escala laboratorio. ....	26
Figura 21.	Diferencias entre un tubo de pared y un tubo de vacío. ....	28
Figura 22.	Trampa de vacío para un sistema de destilación al vacío usando un aspirador como fuente.	29
Figura 23.	Trampa de vacío para un sistema de destilación al vacío usando una bomba de vacío como fuente.....	29
Figura 24.	Sistema de destilación al vacío con componentes completos.....	33
Figura 25.	Cadena de suministros. ....	34
Figura 26.	Participación del sector de aviación en las emisiones de CO2 de transporte.	36

Figura 27.	Beneficios y preocupaciones de los biocombustibles.....	37
Figura 28.	Crecimiento del mercado de los biocombustibles hasta 2030.....	39
Figura 29.	Sistema de destilación al vacío.....	44
Figura 30.	Partes del recipiente de disgregación.....	47
Figura 31.	Dimensiones de ajuste del termómetro y el collar.....	48
Figura 32.	Cadena de suministros para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceites.....	69
Figura 33.	Diagrama de partes del sistema de destilación al vacío para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite.....	71
Figura 34.	Diagrama de bloques de la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite.....	72
Figura 35.	Sistema de destilación al vacío para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite.....	73
Figura 36.	Balón de alimentación y tubo ebullición importante en la regulación de la succión en un sistema de destilación al vacío para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite.....	74
Figura 37.	Bioqueroseno obtenido de aceite de coco.....	75
Figura 38.	Bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina.....	76
Figura 39.	Espectro IR de la fracción ligera de biodiésel obtenido de aceite usado de cocina. Grupos Funcionales: Cetona: 1750 nm, Alcano: 3000 a 3500 nm, Anhidrido: 1500 a 500 nm.	77
Figura 40.	Espectro IR de la fracción pesada de biodiésel obtenido de aceite usado de cocina. Grupos Funcionales: Cetona: 1750 nm, Alcano: 3000 a 3500 nm, Anhidrido: 1500 a 500 nm	77
Figura 41.	Espectro IR de la fracción ligera de biodiésel obtenido de aceite de coco. Grupos Funcionales: Cetona: 1750 nm, Alcano: 3000 a 3500 nm, Presencia de alquenos: 3000 nm, Anhidrido: 1500 a 500 nm.....	78
Figura 42.	Fuente FTIR-Perkin Elmer UVG, 2024.....	79
Figura 43.	Espectro IR de queroseno comercial obtenido de la destilación de petróleo Grupos Funcionales: Alcano: 3000 a 3500 nm, Presencia de alquenos: 3000 nm.....	79

## Resumen

Se realizó una evaluación técnica y económica de la producción de bioqueroseno, obtenido a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco. Para lograr esto se transesterificó  $1000 \pm 0.5$  mL de aceite usado de cocina y  $1000 \pm 0.5$  mL de aceite de coco. Se montó un sistema de destilación al vacío a 125 torr para destilar los ésteres metílicos resultantes de la transesterificación de ambos aceites. Posteriormente, se caracterizaron los bioquerosenos obtenidos y se prepararon mezclas al 5 %, 10 % y 20 % (v/v) de estos bioquerosenos con queroseno de petróleo. Finalmente se llevó a cabo un análisis de cadena de suministro enfocándose en la logística y los costos mediante una simulación de un año. Se utilizaron los siguientes materiales: un reactor de acero inoxidable de 2 L con resistencias eléctricas de 700 W, un agitador eléctrico y un contenedor de agua para recirculación en el reactor. Para la destilación al vacío, se utilizó un kit de destilación equipado con un adaptador de vacío, un vacuómetro, un sistema de vacío y un contenedor de agua para la condensación. Las condiciones de operación en la destilación al vacío fueron 125 torr y  $252\text{ }^{\circ}\text{C}$  para el punto de ebullición. El poder calorífico del bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina fue de  $36,088.67 \pm 5.72$  kJ/kg mientras que el bioqueroseno obtenido de aceite de coco fue de  $35,990.00 \pm 48.91$  kJ/kg con densidades de  $888.60 \pm 0.001$  y  $866.05 \pm 0.001$  kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Los bioquerosenos presentaron colores amarillo y blanco transparente, respectivamente. En las mezclas realizadas la que presentó un poder calorífico arriba del mínimo requerido fue la mezcla del 5 % (v/v) del bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina. Las demás mezclas no cumplieron con el requisito mínimo que era de 42,800.00 kJ/kg según la norma ASTM D4529. Para el análisis de cadena de suministro no se encontró diferencias significativas en la obtención de la materia prima dado que ambos tienen ciertas complicaciones en su obtención y para el análisis de costos realizado se obtuvo que al producir bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina, este es rentable con un margen neto del 24.13% el cual es viable económicamente al ser comparado con un margen de mercado rentable que oscila entre el 20 % y el 25 %. Finalmente, se ha determinado que el bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina fisicoquímicamente y por la simulación realizada en el análisis de la cadena de suministros es la materia prima recomendable para producir bioqueroseno usando el método de destilación al vacío.

## **Abstract**

A technical and economic evaluation of the production of biokerosene obtained from used cooking oil and coconut oil was carried out. To achieve this,  $1000 \pm 0.5$  mL of used cooking oil and  $1000 \pm 0.5$  mL of coconut oil were transesterified. A vacuum distillation system was set up at 125 torr to distill the methyl esters resulting from the transesterification of both oils. Subsequently, the biokerosenes obtained were characterized and 5 %, 10 % and 20 % (v/v) blends of these biokerosenes were prepared with petroleum kerosene. Finally, a supply chain analysis focusing on logistics and costs was carried out through a one-year simulation. The following materials were used: a 2 L stainless steel reactor with 700 W electrical heating elements, an electric agitator and a water container for recirculation in the reactor. For vacuum distillation, a distillation kit equipped with a vacuum adapter, a vacuum gauge, a vacuum system and a water container for condensation was used. The operating conditions in vacuum distillation were 125 torr and 252 °C for boiling point. The calorific value of biokerosene obtained from used cooking oil was  $36,088.67 \pm 5.72$  kJ/kg while biokerosene obtained from coconut oil was  $35,990.00 \pm 48.91$  kJ/kg with densities of  $890 \pm 0.001$  and  $870 \pm 0.001$  kg/m<sup>3</sup>, respectively. The biokerosenes presented yellow and transparent white colors, respectively. Among the mixtures, the one that presented a calorific value above the minimum required was the 5 % (v/v) mixture of biokerosene obtained from used cooking oil. The other blends did not meet the minimum requirement of 42,800.00 kJ/kg according to ASTM D4529. For the analysis of the supply chain, no significant differences were found in obtaining the raw material, given that both have certain complications in obtaining it, and for the cost analysis carried out, it was obtained that when producing biokerosene obtained from used cooking oil, it is profitable with a net margin of 24.13 %, which is economically viable when compared to a profitable market margin that ranges between 20 % and 25 %. Finally, it has been determined that the biokerosene obtained from used cooking oil physicochemically and by the simulation carried out in the analysis of the supply chain is the recommended raw material to produce biokerosene using the vacuum distillation method.

# I. Introducción

Desde 2010, se han implementado regulaciones específicas para la reducción de gases de efecto invernadero en la aviación, ya que los aviones representan el 10 % de las emisiones globales de dióxido de carbono. En respuesta a estas normativas, diversos países han comenzado a explorar soluciones innovadoras para mitigar la contaminación. Una de las alternativas más prometedoras es el bioqueroseno, un sustituto potencial del queroseno o turbosina, el combustible convencional utilizado en los aviones.

Los aviones son esenciales para el transporte aéreo y operan con un sistema delicado que no permite el uso de electricidad debido a las características de su ciclo termodinámico, conocido como ciclo de Brayton. Este ciclo impide que la energía eléctrica sea utilizada para elevar los aviones a las altitudes necesarias, limitando así las opciones para reducir las emisiones de gases.

Dado que la electricidad no es una solución viable para reducir las emisiones en la aviación, las empresas han investigado la producción de bioqueroseno como alternativa al queroseno basado en petróleo. Según las normas ASTM, el bioqueroseno no puede ser utilizado al 100 % en aviones debido a su capacidad energética insuficiente. Sin embargo, es posible mezclar hasta un 50 % de bioqueroseno con queroseno de petróleo, lo que representa un avance significativo en la reducción de gases de efecto invernadero.

Existen varios métodos para producir bioqueroseno. Uno de los más destacados es el hidrotratamiento de ésteres metílicos, que involucra reacciones químicas de hidrogenación e hidromerización catalítica. Este proceso genera bioqueroseno que puede ser mezclado con queroseno de petróleo, siempre y cuando cumpla con las especificaciones requeridas. Es importante señalar que estas mezclas deben realizarse con queroseno Jet-A1, el tipo de queroseno utilizado en los aviones comerciales.

Este trabajo propone una alternativa innovadora al proceso de hidrotratamiento catalítico mediante el uso de la destilación al vacío de ésteres metílicos obtenidos a partir de transesterificación. El objetivo es evaluar el poder calorífico del bioqueroseno resultante para determinar su idoneidad en mezclas con queroseno de petróleo y determinar que mezclas puedan cumplir con los estándares y evaluaciones técnicas establecidas.

## II. Justificación

Las emisiones de gases de efecto invernadero ocasionan grandes problemas medioambientales como el calentamiento global, la pérdida de hábitats naturales, el derretimiento de los polos, etc. Gran cantidad de esos gases son generados antropogénicamente, de esto la industria de la aviación es responsable del 10 %. De ese 10 %, el 2 % son emisiones totales de  $CO_2$ , y las predicciones estiman que el tráfico aéreo se duplicará en los próximos 20 años, resultando en un incremento de las necesidades de combustible, y por ende un aumento en las emisiones de  $CO_2$ . La Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA) ha identificado el desarrollo de combustible renovable para aviación, conocido como bioqueroseno o biojet, como una estrategia prometedora para reducir emisiones de  $CO_2$  en el sector de la aviación (Gutiérrez-Antonio, Gómez-Castro, Lira-Flores, & Hernández, 2017).

Además, desde enero del 2003 a julio de 2008, el precio del combustible para aviones aumentó un 462 %, alcanzando los 3.89 US\$/galón. Luego debido a la crisis económica el precio disminuyó a 1.26 \$/galón, y desde entonces sólo ha incrementado. Esta tendencia al alza en el precio del combustible de avión ha llevado a muchos países a intentar diversificar el mercado de combustibles y no depender del crudo de petróleo. Por otro lado, la Comisión Europea aprobó una propuesta de ley para incluir al sector de la aviación dentro de los obligados a usar biocombustibles (Llamas, García-Martínez, Al-Lal, Canoira, & Lapuerta, 2012).

Por lo tanto, este trabajo está dirigido a la evaluación de la producción de bioqueroseno usando aceite usado de cocina y aceite de coco por medio de una destilación al vacío, y de una transesterificación de ácidos grasos. La razón para realizar este trabajo de investigación está relacionada con el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos directos de las materias primas. La importancia de conocer los resultados de esta evaluación recae en promover otros métodos de producción, uso de nuevas materias primas, evaluar los costos implicados y el análisis de la cadena de suministros.

### **III. Objetivos**

#### **A. General**

Evaluar técnica y económicamente la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite usando una destilación al vacío de los productos de una transesterificación.

#### **B. Específicos**

- Producir bioqueroseno empleando aceite usado en cocina mediante una transesterificación y destilación al vacío para determinar sus propiedades fisicoquímicas.
- Producir bioqueroseno usando aceite de coco mediante una transesterificación y destilación al vacío para determinar sus propiedades fisicoquímicas.
- Realizar mezclas entre los distintos tipos de bioqueroseno producidos con queroseno comercial siguiendo las referencias consultadas y determinar las propiedades fisicoquímicas para encontrar la que presenta un mayor rendimiento.
- Realizar un estudio económico de la producción de bioqueroseno por el análisis de la cadena de suministros para determinar la materia prima más barata y fácil de obtener.

## IV. Marco Teórico

### A. Combustibles en el sector de aviación

Los combustibles de aviación son líquidos que contienen energía, la cual puede transformarse en energía mecánica dentro del motor y utilizarse para generar la fuerza necesaria en el funcionamiento del avión.

Los combustibles para turbinas o queroseno de aviación se denomina JP. En la actualidad se fabrica el JP-4 para vuelos comerciales. El JP-1 fue el primero, cuya especificación limitaba la cantidad a extraer del petróleo por ser un corte muy estrecho. El JP-5 con mayor densidad que el JP-4, se usa en aviones supersónicos que son más calientes y disminuyen las posibilidades de cristalizar el combustible lo cual aumenta la potencia y autonomía, parámetros muy críticos en aeronaves de combate. Se ha llegado hasta el JP-8, con una densidad máxima de 0.84 kg/L y un punto final de destilación ASTM de 330 °C. Las especificaciones por las que se rige los contratos de suministro de combustibles para turbina de aviación pueden tener dos fuentes:

- Militares de EE. UU, se denomina “JP”
  - MIL-T-5624L incluye JP-4 y JP-5
  - MIL-T-38219 incluye JP-7
  - MIL-T-83133 incluye JP-8
  
- Civiles del ASTM, se denominan Jet A, Jet A, Jet-B

-Norma D1655-98<sup>a</sup>.

Para entender esto, el Jet-A, es esencialmente una mezcla de fracciones de queroseno producto de la destilación del petróleo. Este tiene un punto de inflamación de 43 a 66 °C y un punto de congelación de -40 °C. La equivalencia militar del Jet-A es el JP-5 y se usa como combustible de alternativa en lugar del Jet-B. Al igual que el Jet-A, el Jet-A1. Es una mezcla de fracciones con punto de congelación de -50 °C y un punto de inflamación de 43 °C. La equivalencia militar es el JP-1, mientras que el Jet-B es una mezcla de fracciones de gasolina de aviación y queroseno. Los límites de inflamación son aproximadamente los mismos que en la gasolina de aviación. El tipo B, tiene un mínimo de calor neto de combustión de 18,400 BTU/lb, punto de congelación de -51 °C, su equivalencia militar es el JP-4 y como alternativa se usa el Jet-A1. Otras alternativas se muestran a continuación.

Figura 1. Cuadro de combustibles alternativos para aviación según su origen

<b>Fuentes</b>	<b>Combustible</b>	<b>Proceso</b>
Carbón	CTL	<i>Fischer-Tropsch</i>
Gas Natural	GTL	<i>Fischer-Tropsch</i>
Biomasa	BTL	<i>Fischer-Tropsch</i>
Aceites vegetales	Bioqueroseno (HRJ)	<i>Hidrogenación</i>
Azúcares vegetales	Bioetanol	<i>Fermentación</i>
Agua	Hidrógeno	<i>Hidrolisis eléctrica</i>

Fuente: (Capaz, Guida, Seabra, Osseweijer, & Posada, 2020)

### **B. Bioqueroseno a partir de coco y palmiste**

Llamas, et al, (2012), transesterificaron aceite de coco y palmiste usando metanol con catálisis homogénea con buenos rendimientos. Los FAME's fueron sometidos a destilación al vacío, y las fracciones de bajo punto de ebullición se mezclaron con dos tipos de queroseno fósil, un corte de destilación atmosférica directa (hidrotratado) y un Jet A1. Las mezclas entre palmiste y Jet A1 cumplen con algunas especificaciones seleccionadas para el estudio de la norma ATSM D1655, siendo estos: punto de humo, densidad, punto de inflamación, viscosidad a -20 °C y punto de congelación, de tal forma que el poder calorífico encontrado no cumple bajo un margen muy estrecho. Por otro lado, las mezclas de bioqueroseno de palmiste y queroseno fósil de destilación atmosférica solo cumplían los parámetros de densidad y viscosidad a -20 °C. Mientras que las mezclas de bioqueroseno de coco y queroseno fósil de destilación atmosférica cumplen con las especificaciones de densidad, viscosidad a -20 °C y lubricidad.

Es interesante que todas las mezclas de 5 % (v/v) de bioqueroseno (ASTM, 2009) y querosenos fósiles no alcanzan el poder calorífico bajo por un margen estrecho, inferior a 1.0 MJ/kg. Con estos resultados preliminares, se puede inferir que sería factible mezclar bioquerosenos de coco y palmiste preparados de esta forma con Jet A1 comercial hasta un 10 % (v/v) del primero.

Con respecto a la destilación, la fracción de bioqueroseno de los FAME se obtuvo por destilación fraccionada de los combustibles biodiésel de coco y de palmiste, usando una columna Vigreux de 41 cm de longitud y 3.5 c, de diámetro exterior, el bioqueroseno de coco se destiló entre 47 y 114 °C a 2 torr (2.67 hPa) con un rendimiento del 81.8 % en peso basado en los FAME de coco, y dejando un rendimiento del 12.6 % en peso dejando un rendimiento del 12.6% en peso de una fracción de fondo que también se caracterizó. Con respecto al bioqueroseno de palmiste se destiló entre 36 y 113 °C a 2 torr con un rendimiento del 40.8 % basado en los FAME de palmiste, dejando un rendimiento del 58.6 % de una fracción de fondo.

Figura 2. Resultados de la caracterización de las mezclas de bioqueroseno con queroseno comercial

**Table 1**  
FAME profiles of the biodiesels, biokerosenes and bottoms of coconut and palm kernel oils.<sup>a</sup>

FAME's (wt.%)	Boiling point (°C)	Coconut FAME	Palm kernel FAME	Coconut biokerosene	Palm kernel biokerosene	Coconut bottom	Palm kernel bottom
Methyl caprylate, C8:0	193 <sup>760b</sup>	8.3	Traces	17.3	3.6		
Methyl caprate, C10:0	224 <sup>760b</sup>	3.0	Traces	7.0	3.5	Traces	Traces
Methyl laurate, C12:0	262 <sup>766b</sup>	55.5	56.6	66.7	90.8	16.3	19.0
Methyl myristate, C14:0	295 <sup>751b</sup>	14.9	15.0	8.9	2.1	46.1	19.7
Methyl palmitate, C16:0	415-8 <sup>747b</sup>	6.4	8.5	0.1		26.0	9.9
Methyl stearate, C18:0	442-3 <sup>747b</sup>	2.5	1.7			2.2	12.8
Methyl oleate, C18:1	218,5 <sup>20b</sup>	7.5	17.1	Traces		8.7	32.7
Methyl linoleate, C18:2	215 <sup>20b</sup>	1.9	1.1			0.7	5.9

<sup>a</sup> All compositions were normalized to 100 wt.%

<sup>b</sup> Superscripts are the distillation pressures in mm Hg.

Fuente: Llamas, et al., (2012).

Figura 3. Propiedades de la mezcla de bioqueroseno de coco y queroseno fósil

**Table 3**  
Properties of the blends of coconut biokerosene (CBK) and fossil kerosene without additives (K1).

	CBK_0/ K1_100	CBK_5/ K1_95	CBK_10/ K1_90	CBK_20/ K1_80	CBK_100/ K1_0	Coconut bottom	Method	Equipment	Experimental error
Colour and aspect	Clear <sup>a</sup>	Clear <sup>a</sup>	Clear <sup>a</sup>	Clear <sup>a</sup>	Clear <sup>a</sup>	Yellow	ASTM D1500		±0.5 u.c.
Elemental composition									
C (%)	85.90	84.84	83.44	82.14	72.35	75.30	ASTM D5291	LECO CHNS-932	±0.71
H (%)	13.88	13.68	13.37	13.46	12.12	12.38			±0.18
O (%)	0.22	1.48	3.19	4.40	15.54	12.33			
Water content (mg/kg)	47.6	53.8	80.5	113.7	278.9	111.1	EN ISO 12937	Karl-Fischer 831KF	±6.7
Density at 23 °C (kg/m <sup>3</sup> )					870.0		EN ISO 3675	Pyknometer	±0.3
Density at 15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	802.0	805.0	807.0	812.0	867.0	879.0	EN ISO 3675	Pyknometer	±0.3
Oxidative stability (h)	16.0	17.2	18.6	18.6	22.6	1.8	EN 14112	Rancimat 743 Methrom	±0.09 Mean value+0.16
Lubricity (mm), HFRR test	0.64	0.35	0.28	0.24	0.30		EN ISO 12156	PCS Instrument	±1.0 µm
FAME profile					Table 1	Table 1	EN 14103	Agilent GC 6890/ MS7890	
High calorific value (MJ/kg)	47.40	45.32	44.47	43.94	37.66	39.38	ASTM D240	Parr 1351	±0.25
Low calorific value (MJ/kg)	44.44	42.39	41.62	41.06	35.06	36.73	ASTM D240 <sup>b</sup>	-	
CFPP <sup>c</sup> (°C)	-29.5	-33.0	-33.0	-31.0	-10.0	23.0	EN ISO 116	ISL FPP 5Gs	±1.0
Viscosity at -20 °C (mm <sup>2</sup> /s)	3.26	3.64	3.81	4.18	8.26		ASTM D445	CannonFenske Afora 5354/2B	±0.20%
					2.27 <sup>d</sup>				

<sup>a</sup> Clear and colourless.

<sup>b</sup> ASTM D240 modified for oxygenated fuels.

<sup>c</sup> CFPP: Cold filter plugging point.

<sup>d</sup> Viscosity at 40 °C.

Fuente: Llamas, et al., (2012).

## C. Normativas y Estándares para bioqueroseno

### 1. ASTM D1655 y Defence Standard 91-91/5

Las especificaciones comprenden una lista de valores permisibles mínimo y máximo para un número de propiedades del combustible, proporcionando así una comprobación relativamente rápida con pruebas en un laboratorio para verificar que cada lote de combustible está adecuado. Es decir, que coincida con todos los requisitos para su uso en una aeronave. Las propiedades cubren la seguridad de manipulación de tierra del combustible, la idoneidad del combustible para el almacenamiento, la estabilidad del combustible en forma de líquido en un rango de

temperaturas de funcionamiento y algunas características físicas. Las dos limitaciones significativas son:

- Que el producto se obtenga a partir del petróleo crudo mediante un proceso ya establecido.
- Que el producto sea totalmente hidrocarburo, con excepción de los aditivos permitidos y tazas muy bajas de no hidrocarburos.

Mejía Parra, (2012).

## 2. ASTM D7566

La especificación de este estándar hace referencia a los hidrocarburos sintetizados que contienen combustible para turbinas de aviación, y se combina con la ASTM D1655, en esta se especifica que la porción de síntesis no puede superar el 50 % del combustible; al menos el 50 % debe ser combustible convencional para aviones comerciales Jet-A y Jet-A1.

D7566 brinda criterios para la producción, distribución y uso de combustible para los motores de turbinas de aviones que se fabrican con carbón, gas natural o biomasa usando el proceso Fischer-Tropsch Mejía Parra, (2012).

## 3. RTCA 75.01.13:04 Productos de Petróleo. Kerosene de Aviación (Jet A-1). Especificaciones.

Es el reglamento técnico centroamericano para el queroseno comercial, colocado en el Acuerdo Ministerial Número 265-2008.

Esta tiene las siguientes especificaciones:

Figura 4. Cuadro de especificaciones para el Jet A-1

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	VALORES
COMPOSICIÓN			
Acidez Total	mg KOH/g	D-3242	0,10 máx.
Aromáticos	% volumen	D-1319	25 máx.
Azufre Mercaptano <sup>1)</sup>	% masa	D-3227	0,003 máx.
Azufre Total	% masa	D-1266, D-1552, D-2622, D-4294 ó D-5453	0,30 máx.
VOLATILIDAD			
<u>Destilación:</u>		D-86	
10% recuperado	°C		205 máx.
50% recuperado	°C		Reportar
90% recuperado	°C		Reportar
Punto Final de Ebullición	°C		300 máx.
Residuo	% volumen		1,5 máx.
Pérdidas	% volumen		1,5 máx.
Punto de Inflamación ("Flash Point")	°C	D-56 ó D-3828 <sup>2)</sup>	38 mín.
Densidad a 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	D-1298 ó D-4052	775 - 840

FLUIDEZ Punto de congelamiento Viscosidad a - 20 °C	°C mm <sup>2</sup> /s <sup>7)</sup>	D-2386, D-4305 <sup>5)</sup> , D-5901 ó D-5972 <sup>6)</sup> D-445	- 47 <sup>4)</sup> máx. 8,0 máx.
COMBUSTIÓN Calor neto de combustión Uno de los requerimientos siguientes se debe cumplir: (1) Número de luminómetro (2) Punto de humo, ó (3) Punto de humo, y Naftalenos	MJ/kg  ----- mm mm % volumen	D-4529, D-3338 ó D-4809  D-1740 D-1322 D-1322 D-1840	42,8 <sup>8)</sup> mín.  45 mín. 25 mín. 18 mín. 3,0 máx.
CORROSIÓN Tira de Cobre, 2 h a 100 °C	-----	D-130	No.1 máx.
ESTABILIDAD TÉRMICA JFTOT (2,5 h a temperatura de control mínima de 260°C) Caída de Presión en Filtro Depósito en tubo, menor que	kPa(mm Hg) -----	D-3241 D	3,3(25) máx. Código 3 <sup>9)</sup>
CONTAMINANTES Gomas existentes Reacción al agua: Clasificación Interfacial	mg/100 ml  -----	D-381  D-1094	7 máx.  1 b máx.
ADITIVOS Conductividad Eléctrica	pS/m	D-2624	<sup>10)</sup>

Fuente: MEM, (2008)

El reglamento técnico centroamericano considera los siguientes aspectos:

- La determinación de azufre mercaptano se puede evitar si se considera "combustible dulce" a través de la prueba doctor descrita en el método D-4952.
- Los resultados obtenidos por los métodos D-3828 pueden estar 2 °C más abajo que los obtenidos por el método de Prueba D-56, el cual es el método preferido. En caso de disputa se debe aplicar el método D-56.
- Otros Puntos de Congelamiento se pueden convenir entre el vendedor y el comprador.
- Cuando se utiliza el método de prueba D-4305, usar sólo el procedimiento A, no use el procedimiento B, el método de Prueba D-4305 no se debe utilizar sobre muestras con viscosidad mayor que 5,0 mm<sup>2</sup> /s a -20 °C. Si la viscosidad no se conoce y no se puede obtener por medio de lote(s) ("batch") certificado(s), entonces se deberá medir. La viscosidad debe reportarse cuando se reportan los resultados del Método de Prueba D-4305. En caso de disputa, el Método de Prueba D2386 debe ser el método árbitro.
- El método de prueba D-5972 puede producir un resultado mayor (más caliente) que el del método de prueba D-2386 sobre combustibles de corte amplio tales como Jet B o JP-4. En caso de disputa, el método de Prueba D-2386 debe ser el método árbitro.
- 1 mm<sup>2</sup> /s = 1 cSt.
- Para todos los grados utilice la Ecuación 1 o la Tabla 8 del método de Prueba D-4529 o la ecuación 2 del método de Prueba D-3338. El método de Prueba D-4809 se puede

utilizar como alternativo. En caso de disputa, se debe utilizar el método de prueba D-4809.

- Las clasificaciones del depósito de tubo se deben reportar siempre por el método visual; una clasificación por el método de densidad óptica para la clasificación del depósito de tubo (TDR) es deseable, pero no mandatorio.
- Si se usa aditivo de conductividad eléctrica, la conductividad no debe exceder 450 pS/m en el punto en el cual se usa el combustible. Cuando el comprador especifique la conductividad eléctrica aditiva, ésta deberá estar entre 50 y 450 pS/m bajo las condiciones del punto de entrega.  $1 \text{ pS/m} = 1 \times 10^{-12} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$

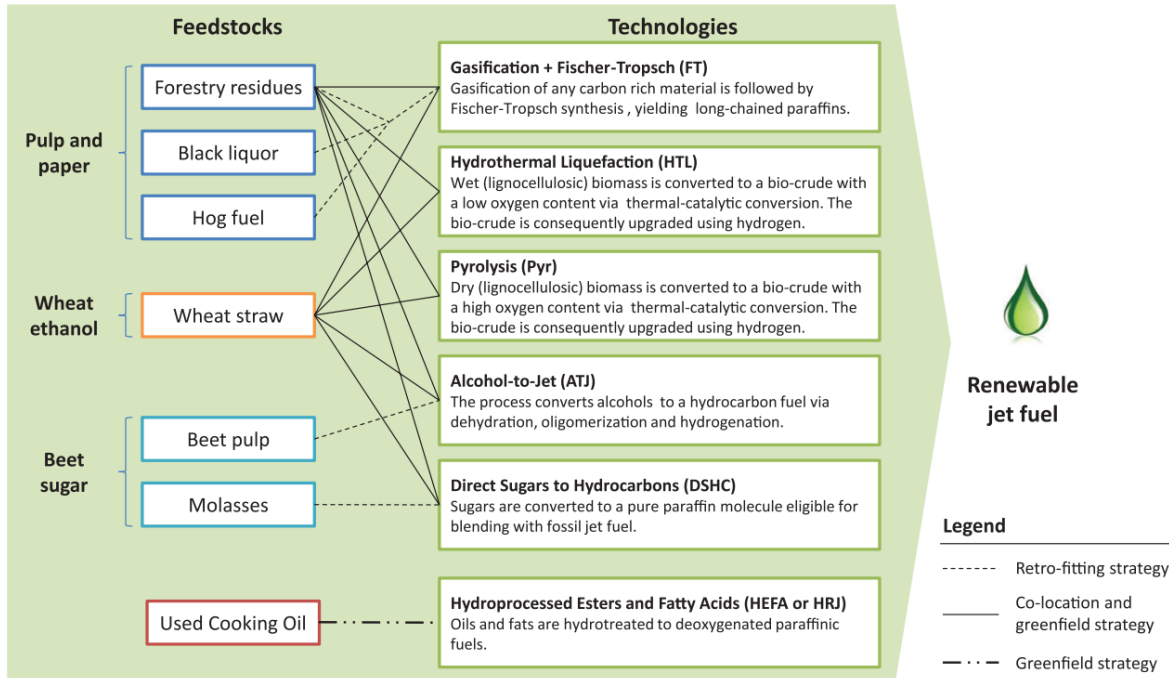
(MEM, 2008).

## **D. Procesos de producción de bioqueroseno**

El queroseno parafínico sintético (SPK) se puede producir a partir de carbón, gas natural o biomasa, sin embargo, la única renovable es la biomasa, por tanto, al existir tecnologías que usen como materia prima el carbón o el gas natural no se considerarían renovables. La biomasa que se usa para producir combustible para aviones por lo general pasa por un proceso donde se incluyen triglicéridos, biomasa lignocelulósica, azúcar y materia prima amilácea, dependiendo de la materia prima se tienen los siguientes procesos. Hidroprocesamiento de triglicéridos, procesamiento termoquímico de biomasa y alcohol, conversión termoquímica de biomasa por gasificación y Fischer-Tropsch son los únicos certificados por la ASTM para la producción y uso comercial Gutiérrez-Antonio, Gómez-Castro, Lira-Flores, y Hernández, (2017).

Cada vía de producción presenta ventajas y desventajas, por ejemplo, las que usan materia prima que contiene triglicéridos son costosas sin embargo requieren de un procesamiento de bajo costo. Por otro lado, los materiales que contienen biomasa lignocelulósica son más costosas ya que requieren muchas etapas de procesamiento, lo que aumenta el costo considerablemente. Otro factor que considerar son los costos de transporte y disponibilidad de la materia prima pues la cadena de suministros se ve involucrada directamente. Note cada descripción de las vías de producción de bioqueroseno Gutiérrez-Antonio, Gómez-Castro, Lira-Flores, y Hernández, (2017).

Figura 5. Combinaciones de materia prima y tecnología en el ámbito actual



Fuente: De Jong, et al., (2015).

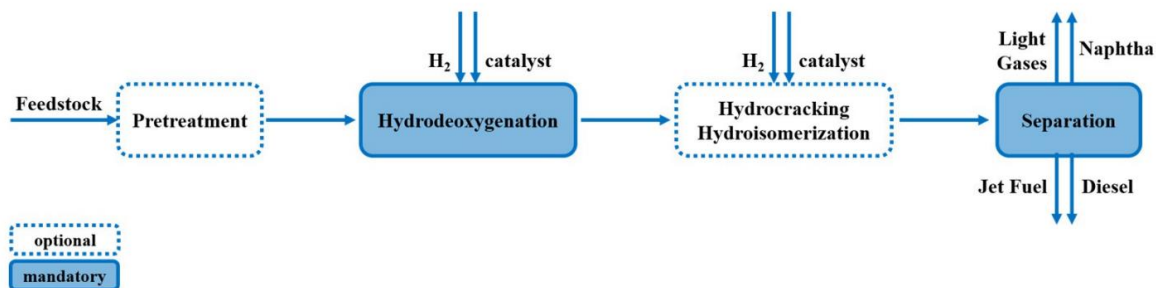
## 1. Hidroprocesamiento catalítico de ésteres y ácidos grasos

Es un método que consiste en la conversión química de materia prima que contiene triglicéridos mediante hidredesoxigenación, hidroisomerización e hidrocrqueo para producir combustible para aviones. La reacción se da de la siguiente manera: la materia prima se convierte en hidrocarburos lineales de cadena larga esto lo hace con ayuda de hidrogeno y un catalizador sólido a alta presión y temperatura, en este caso suceden reacciones de desoxigenación y descarbonilación, en el cual además de producir los hidrocarburos antes mencionados como subproductos se da agua, monóxido de carbono y dióxido de carbono como subproductos. Los hidrocarburos generados en el primer reactor entran a un segundo, donde se produce el craqueo y la isomerización, de tal forma que la cadena de los hidrocarburos se reduce a rangos de C8 y C16 correspondientes al *biojet fuel*.

Durante la reacción se producen gases ligeros, nafta y biodiésel, debido a estas mezclas el último paso que se agrega en el proceso es una destilación para separar el combustible producido. Las materias primas que contienen triglicéridos incluyen aceites vegetales, grasas animales, aceite de pirolisis y bioaceite. Los aceites no comestibles, como el aceite de jatropa, el aceite de algas, las grasas animales y los aceites usados de cocina, son algunas materias primas que también contienen triglicéridos en su estructura. También se puede utilizar aceite proveniente de cultivos comestibles, sin embargo, esto no es recomendable dado que crea un conflicto en la seguridad alimentaria y nutricional. Con respecto a la obtención de los aceites, estos se pueden obtener a partir de extracción mecánica, asistidos por solventes o enzimáticos, donde el más común es la extracción asistida por solventes. Las grasas animales se generan en la industria procesadora de animales, mientras que los aceites usados de cocina se generan en las industrias de servicio alimentario y en sector doméstico.

El proceso HEFA representa la vía más conocida entre los procesos aprobados y certificados por la American Society for Testing and Materials (ASTM) para producir combustibles alternativos para la aviación. Este proceso ofrece producción a gran escala a corto plazo, comparándolo con otros procesos, presenta una menor complejidad tecnológica, por consiguiente, un precio mínimo de venta de biocombustible para reactores, con una mayor eficiencia energética.

Figura 6. Esquema de la producción del proceso de HEFA para biocombustible para reactores



Fuente: Monteiro, (2022).

El proceso HEFA convierte acilglicérols (ésteres) y los ácidos grasos en hidrocarburos para producir biocombustibles de aviación, en presencia de  $H_2$ , para eliminar el átomo de oxígeno de la materia prima. Desde el punto de vista químico, los biocombustibles para reactores hidroprocesados suelen ser líquidos parafínicos, sin aromáticos ni azufre, con una longitud de cadena de carbono de  $C_8 - C_{16}$  esta composición química es imprescindible para su comportamiento. El alto contenido parafínico de los biocombustibles hidroprocesados para reactores puede dar lugar a una buena estabilidad térmica, que puede ser incluso mejor que la de los combustibles fósiles para reactores, ya que las parafinas muestran una débil tendencia a formar depósitos en los combustibles fósiles para reactores.

El principal beneficio de usar este proceso de producción es reducir las emisiones de CO e hidrocarburos no quemados, aunque la desventaja que presenta es que no contiene isoparafinas y compuestos aromáticos, ya que estos ayudan a obtener puntos de congelación más bajos, estabilidad oxidativas más altas y números de cetano más altos; además la presencia de aromáticos es necesaria para los biocombustibles de aviación con densidades más altas a  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  y para el hinchamiento volumétrico de los materiales de sellado en el sistema de la aeronave. Otro obstáculo probable se presenta en la longitud de la cadena de carbono, puesto que la fluidez a baja temperatura (viscosidad cinemática a  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ) y la volatilidad de biocombustible de aviación se ve afectada, mientras que la ausencia de azufre, oxígeno y nitrógeno puede dar lugar a una lubricidad deficiente Yang, Xin, He, Corscadden, y Niu, (2019).

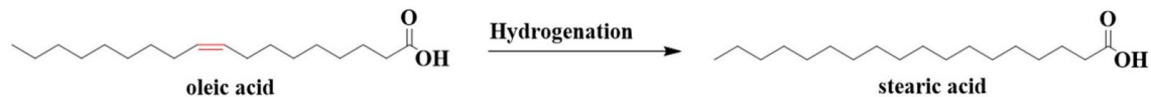
#### a. Hidrodesoxigenación catalítica

Los aceites y las grasas se componen principalmente de acilgliroles y ácidos grasos, lo que significa que la materia prima contenga un alto contenido de oxígeno procedente del glicerol y de la parte acil de las moléculas, aunque puede ser inferior al de los bioaceites derivados de materias primas lignocelulósicas. Un alto contenido de oxígeno en las materias primas utilizadas para la producción de biocombustibles puede provocar la inmiscibilidad con los combustibles fósiles y una mayor viscosidad, restringiendo su uso para mezclas y empeorando las propiedades del flujo en frío, respectivamente, además con este gran porcentaje de oxígeno lo más probable es que el combustible que se produzca sea inestable y reactivo, aumentando la tendencia a la polimerización, la eventual formación de gomas y lodos, y disminuyendo su estabilidad térmica y de almacenamiento.

Se ha propuesto mezclar biodiésel con combustible de aviación, sin embargo, el biodiesel se produce por reacciones de transesterificación que usan alcoholes de cadena corta, lo que aumenta el contenido de oxígeno en el biocombustible.

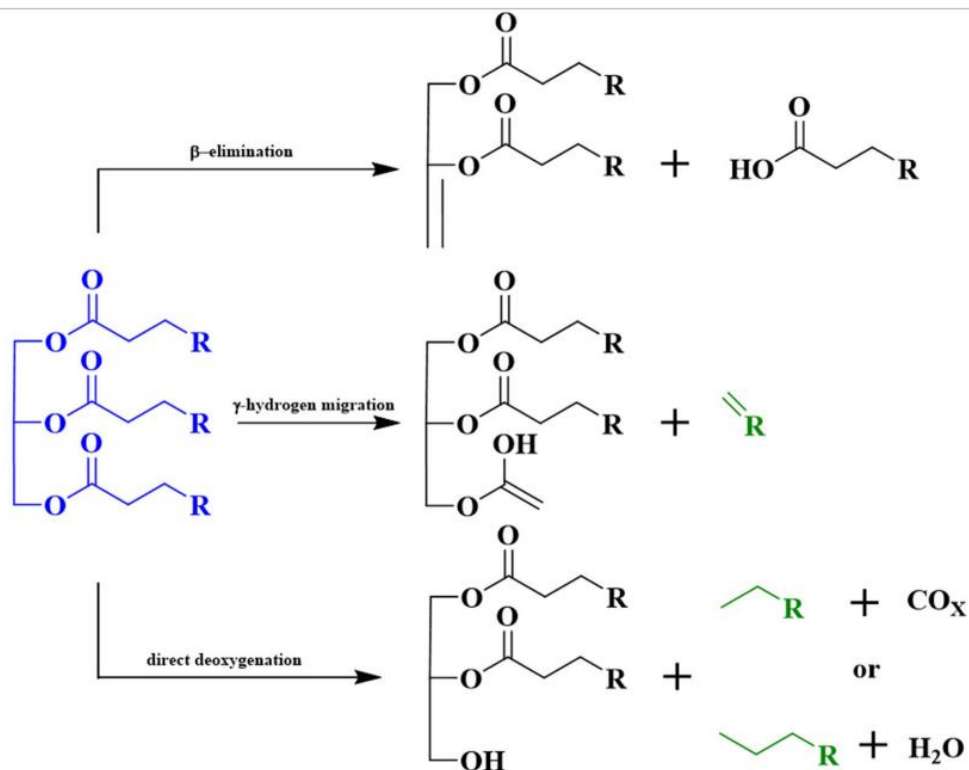
Por lo tanto, el uso de biodiésel no es recomendable para combustible de aviación o incluso mezclado con combustibles fósiles o biológicos, y debería limitarse a menos de 5 ppm, según la norma ASTM D7566 para aviones de reacción, como resultado, la mezcla (5 vol. %) del corte de biodiesel ligero ( $C_{12}$ ) (Silva, Cardoso, & Pasa, 2016). El proceso de hidrodesoxigenación es un proceso de hidrogenólisis catalítica para eliminar los heteroátomos de oxígeno de aceites y grasas, que se realiza a altas presiones y temperaturas de  $H_2$ . El objetivo principal es disminuir la relación O/C y aumentar concomitantemente la relación H/C y saturar los dobles enlaces de los aceites y grasas, produciendo hidrocarburos, durante este proceso, se da lugar a tres reacciones principales, hidrogenación, descarboxilación y descarbonilación.

Figura 7. Hidrogenación, los dobles enlaces de las cadenas de ácidos grasos se saturan añadiendo hidrogeno molecular, por ejemplo, el ácido oleico se satura a ácido esteárico



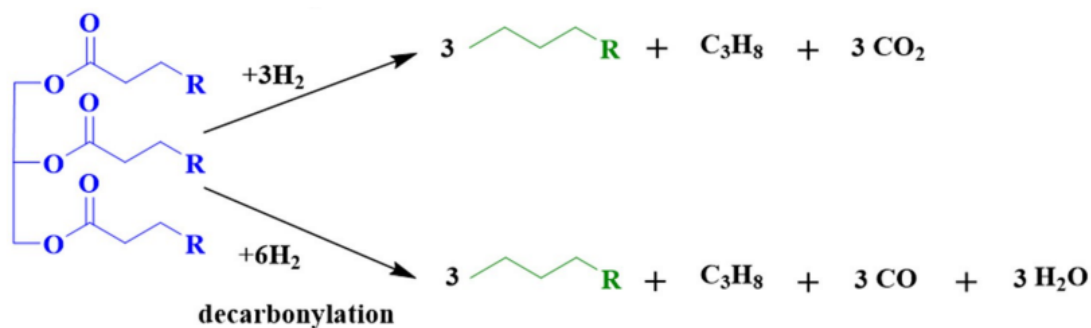
Fuente: Yang, Xin, He, Corscadden, y Niu, (2019).

Figura 8. Mecanismo de descomposición de los triacilgliceroles, mediante hidrogenación



Fuente: Yang, Xin, He, Corscadden, y Niu, (2019).

Figura 9. Descarboxilación



Fuente: Yang, Xin, He, Corscadden, y Niu, (2019).

El grupo carboxilo se elimina de la cadena de triacilglicerol mediante una escisión directa del enlace C-C en presencia de H<sub>2</sub>, dando lugar a la producción de alcanos lineales que contienen un átomo de carbono adicional en la longitud de la cadena en comparación con la cadena de triacilglicerol, por tanto, se elimina oxígeno liberando dióxido de carbono. Descarboxilación, el grupo carboxilo se elimina de la cadena de triacilglicerol a través de una escisión directa del enlace C-C en presencia de H<sub>2</sub>, produciendo alcanos lineales con un átomo de carbono adicional en la longitud de la cadena, sin embargo, la diferencia radica en que al eliminar el oxígeno se libera monóxido de carbono y agua.

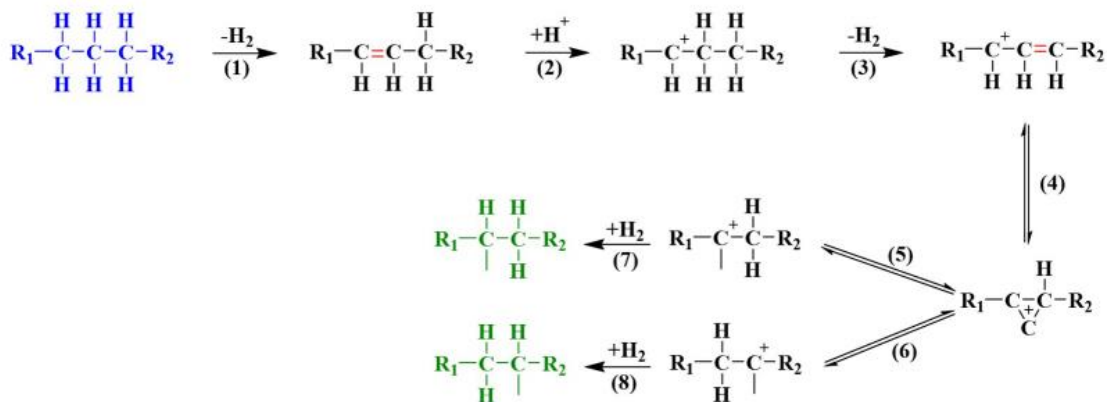
b. *Hidrocraqueo catalítico*

El hidrocraqueo se usa para descomponer la compleja cadena larga de triacilgliceroles en estructuras más cortas para la producción de biocombustibles para reactores. Lo importante de saber de este proceso es diseñar adecuadamente el catalizador y condiciones de reacción para mejorar la selectividad hacia la producción de biocombustibles para reactores, evitando la producción de gases ligeros, nafta y biodiésel. Con respecto a la presión esta debe igualar la presión de H<sub>2</sub> y a altas temperaturas para evitar la formación de coque por reacciones de polimerización en cadena por condensación.

c. *Hidroisomerización catalítica*

El siguiente paso de la conversión de la materia prima en biocombustible de aviación puede ser su hidroisomerización, que, a su vez, puede realizarse simultáneamente con el hidrocraqueo. Inicialmente se tiene la hidroisomerización de las parafinas, seguida de su hidrocraqueo, esto se debe a que las parafinas monobranqueadas son menos susceptibles a formar coque que las parafinas multibranqueadas. La hidroisomerización tiene como fin formar los hidrocarburos en cadenas ramificadas con el fin de cumplir con la norma ASTM. Al ramificar los alcanos de cadena recta se disminuir los puntos de congelación además la formación de aromáticos resulta imperativa por las propiedades de ignición.

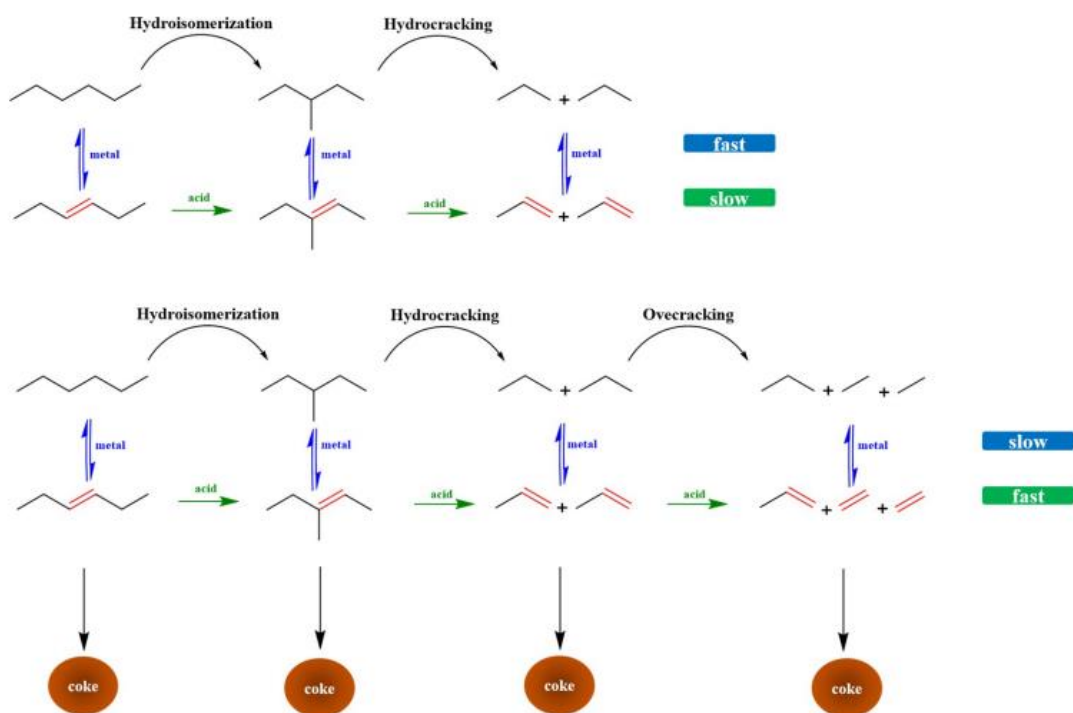
Figura 10. Conversión de hidrocarburos de cadena recta en hidrocarburos ramificados



Fuente: Lee, Lee, Kim, Shin, y Choi, (2019).

Las parafinas normales se deshidrogenan en los sitios metálicos del catalizador, y las olefinas obtenidas reaccionan en los sitios ácidos del catalizador para formar iones carbenio; después las especies protonadas se someten a una deshidrogenación posterior a una reorganización esquelética en iones isocarbenio, que se reorganizan en iones carbenio ramificados en los sitios ácidos del catalizador, finalmente estos se desprotonan en los sitios metálicos del catalizador para formar isoparafinas correspondientes.

Figura 11. Vías de reacción del catalizador bifuncional para la conversión en un solo paso de materia prima en biocombustible para reactores



Fuente: Lee, Lee, Kim, Shin, y Choi, (2019).

## 2. Avances científicos

El primer proceso de producción de combustibles para aviones fue propuesto por UOP Honeywell Company, en el cual desarrollaron un proceso para producir diésel verde. A este se le añadió un proceso de craqueo selectivo para producir combustible de aviación ecológico, al aplicar este proceso la conversión máxima obtenida fue del 36 %, siendo la conversión total de hidrocarburos del 70 %, este producto se mezcló al 50 % con queroseno comercial y se usó en varios vuelos de aerolíneas comerciales en todo Estados Unidos en 2007. Determinaron que aún era necesario la optimización exacta de componentes.

Este proceso está asociado con un alto consumo de hidrógeno, lo que puede representar una desventaja en términos de costos y seguridad del proceso, es importante mencionar que la UOP realizó una análisis de ciclo de vida del producto y observaron que se obtiene una reducción del 65-85 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación de los combustibles derivados del petróleo, las materias primas incluyen aceites vegetales, aceites usados y grasas animales y se han reportado varios trabajos de investigación.

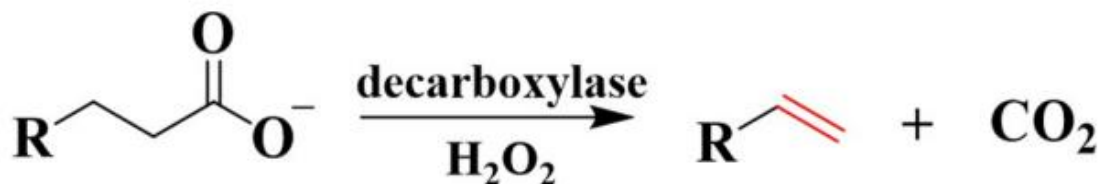
## 3. Producción enzimática de hidrocarburos

La biocatálisis enzimática se reconoce cada vez más como una alternativa a la catálisis química, dado que las enzimas pueden realizar su función en condiciones mucho más suaves. Además, las enzimas pueden presentar una alta especificidad de sustrato o selectividad de producto. La biocatálisis enzimática no solo puede permitir una reducción drástica de los

requisitos de pureza del sustrato, sino también de la generación de subproductos, simplificando así los procesos de separación posteriores. El problema con esta tecnología es que la aplicación industrial suele estar condicionada por la baja estabilidad operativa y de almacenamiento a largo plazo, la dificultad de recuperación tras su uso y, por consiguiente, la reutilización problemática del catalizador enzimático.

Aun cuando existen estas limitantes, ciertas aplicaciones pueden hacerse para que la enzima pueda ser utilizada en procesos biocatalíticos. Por ejemplo, emplear la mutagénesis, modificar mediante ingeniería enzimática los sitios activos, etc. Así, las lipasas, pueden utilizarse *in vitro* para catalizar la esterificación de ácidos grasos libres o la transesterificación de acilglicérols con alcoholes de cadena corta y, de este modo, las lipasas se emplearon ampliamente para la producción enzimática de biodiésel, que podría hidrogenarse posteriormente para la producción de biocombustibles para reactores *drop-in*. Sin embargo, el problema que presenta las lipasas es la especificidad de la enzima, que por lo general representa una característica clave para seleccionar una ruta biocatalítica. Otro problema está relacionado con la producción de subproductos. El glicerol puede actuar como sustrato de la enzima, produciendo una disminución del rendimiento global de ésteres de ácidos grasos Dening, et al., (2015).

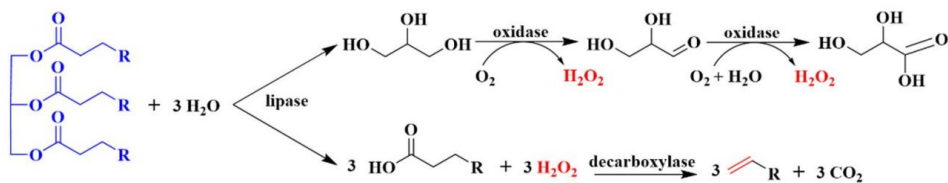
Figura 12. Descarboxilación enzimática de ácidos grasos



Fuente: Dening, et al., (2015).

En muchos casos se han empleado reacciones en cascada, en las que participan varias enzimas, ya que permiten transformaciones complejas al asociar varias modificaciones del sustrato. Por ejemplo, se empleó una lipasa para la hidrólisis de triacilglicérols y una descarboxilasa para la posterior descarboxilación de ácidos grasos libres con el fin de obtener olefinas, de tal forma que tanto la lipasa como la descarboxilasa están expuestas a  $\text{H}_2\text{O}_2$ , presentando un problema de estabilidad para las enzimas Jiang, et al., (2020).

Figura 13. Producción enzimática de hidrocarburos en una olla



Fuente: Jiang., et al, (2020).

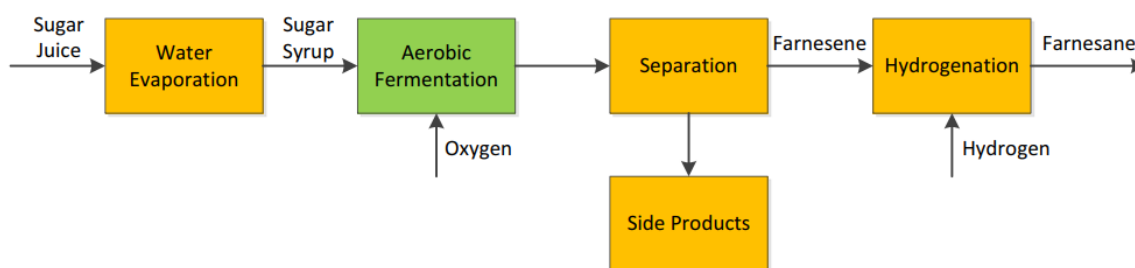
#### 4. Combustibles Fischer-Tropsch

Es una reacción química catalizada por la cual se transforma en un gas de síntesis, que consiste en una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, en hidrocarburos líquidos. Una aplicación de este proceso es el primer combustible sintético aprobado para aviación que se ha desarrollado a partir de carbón por Sasol en Sudafrica. Este proceso se puede aplicar a carbón (andó luego CtL-Coal to liquid), gas (GtL-Gas to liquid) o biomasa (BtL-biomass to liquid), el último proceso está todavía en desarrollo. Estos tres tipos de combustibles, a menudo se denomina genéricamente como “XtL”. Su uso en aviación ha sido recientemente aprobado para mezclas de hasta 50% con Jet A-1, según el estándar ASTM-7566 y por la norma DEF-STAN 91-9 Mejía Parra, (2012).

#### 5. Fermentación de azúcares

El alcohol que se produce fermentando azúcares o desechos vegetales lignocelulósicos. En el caso de los cultivos ricos en azúcares se consideran competidores con los alimentos, pero los desechos vegetales solo se consideran algunos productos. Por sus características de densidad energética el bioetanol no es muy adecuado en general como combustible de aviación, actualmente se está estudiando la transformación de azúcares a hidrocarburos, obteniendo productos similares al queroseno.

Figura 14. Esquema del proceso DSHC (Direct Sugar to Hydrocarbon)



Fuente: Neuling y Kaltchmitt, (2014).

### E. Caracterización Físicoquímica del Bioqueroseno.

#### 1. Punto de Congelamiento

A temperaturas muy bajas, los combustibles de aviación desarrollan cristales de hidrocarburos sólidos. El punto de congelamiento se refiere a la temperatura a la que el combustible pierde fluidez. La prueba de punto de congelación es importante para combustibles de aviación, ya que impedir el flujo de combustible puede tener efectos

catastróficos para las aeronaves, como interferir con la atomización del combustible. En el pasado, los expertos que las especificaciones de los combustibles y los métodos de prueba diseñados para probar estas especificaciones determinaron que, en altitud, el combustible utilizado en los aviones de pistón rara vez experimentaba las bajas temperaturas que comúnmente se encuentran en altitudes más altas en los aviones con turbina diésel. Sin embargo, los puntos de congelación de Jet fuel, pueden verse afectados negativamente debido a ciertos componentes que se encuentran, ya sea por mezcla o por contaminación (PIN, 2017).

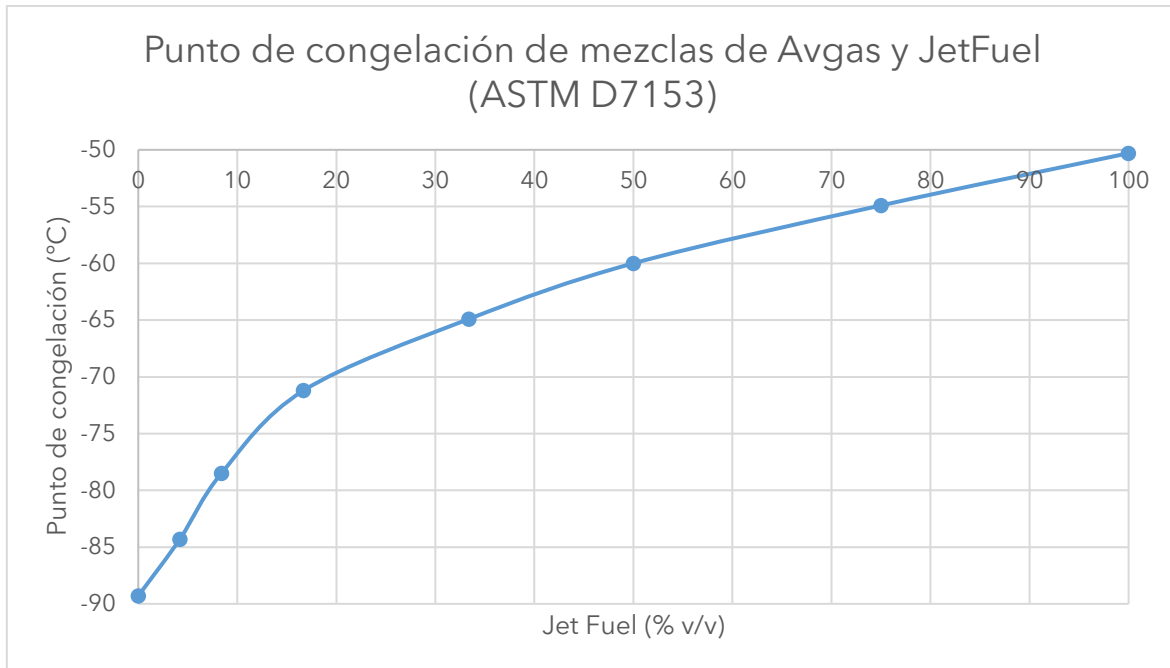
Las temperaturas del Avgas suelen rondar los -100 °C o inferior, mientras que las especificaciones del combustible para aviones requieren un punto de congelación máximo de -40 °C (Jet A) o - 47 °C (Jet A-1). De hecho, la especificación para probar el punto de congelación de Avgas, ASTM D910, requiere informar la temperatura de congelación como “informe < -58 °C si no se detecta cristales”. Se ha descubierto que el punto de congelación se ve afectado por la contaminación o por la adición de aromáticos, especialmente aromáticos simétricos (PIN, 2017).

Figura 15. Variación del punto de congelación con respecto a la concentración % (v/v) de impurezas en el Jet Fuel en Avgas

<b>“Base Avgas”</b>	<b>“Impurity”</b>	<b>OptiFZP – ASTM D7153</b>
Av Gas (%vol)	Jet Fuel (%vol)	Result (°C)
100	0	-89.3
95.8	4.2	-84.3
91.6	8.4	-78.5
83.3	16.7	-71.2
66.6	33.4	-64.9
50.0	50.0	-60.0
25.0	75.0	-54.9
0	100	-50.3

Fuente: (PIN, 2017).

Figura 16. Gráfico de variación del punto de congelación con respecto a la concentración % (v/v) de impurezas en el Jet Fuel en Avgas



Fuente: (PIN, 2017).

Se muestra que se puede detectar niveles bajos de combustible para aviones que contamina Avgas con el OptiFZP, ya que el sistema alcanza temperaturas muy bajas y detecta cristales grandes y pequeños.

Esto muestra que los aromáticos simétricos también afectan la cristalización en Avgas. Para una solución que contiene 10% de benceno en Avgas, los pequeños cristales iniciales fueron detectados a  $-98.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y cristales más grandes se acumularon y se detectaron a  $-104.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (PIN, 2017).

El sector de aviación es responsable del 2% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> del mundo. Las SAF son una opción viable para reducir las emisiones.

Hasta la fecha, sólo se ha probado 8 combustibles debido a su elevado costo y volumen. Los nuevos SAF deben pasar por el proceso de evaluación estándar de la industria (ASTM D4054 Y D7566)

La preselección de un nuevo SAF puede proporcionar información sobre la aprobación y reducir el riesgo de desarrollo tecnológico.

El punto de congelación es una de las propiedades clave en la preselección, pero el método actual no está validado en el intervalo de temperatura requerido por ASTM (275 – 350 K).

Coburn, Heyne, y Yang, (2020).

## **2. Punto de enturbiamiento**

Se refiere a la alta temperatura a la que el aceite comienza a aparecer turbio por la aparición de microcristales de hidrocarburos o neblina de agua en las condiciones de prueba. Después de que el aceite tenga un punto de enturbiamiento, este se continúa enfriando hasta que el aceite muestre cristales visibles a simple vista. La temperatura en este momento es el punto de cristalización del aceite, comúnmente como punto de congelación. El alto punto de enturbiamiento y el punto de congelación indican que el combustible tiene malas propiedades a bajas temperaturas, es decir que los cristales se precipitarán a temperaturas altas, obstruyendo el filtro, dificultando o incluso interrumpiendo el suministro de combustible. Debido a eso el combustible de aviación tiene regulaciones estrictas sobre el punto de enturbiamiento y congelación (Huazheng, 2021).

## **3. Punto de fluidez**

Se refiere a la baja temperatura a la que los productos derivados del petróleo pueden salir de un recipiente de tipo estándar durante el proceso de enfriamiento.

## **4. Poder calorífico**

El poder calorífico se refiere a la cantidad de energía que se puede obtener de una unidad de volumen o masa de bioqueroseno cuando se quema. Este valor es importante porque determina cuanta energía se puede generar para un determinado volumen de combustible.

## **5. Determinación estructural**

Se basa en la aplicación de los fundamentos teóricos de las diferentes técnicas espectroscópicas para la determinación de la estructura de un compuesto orgánico

Según Fernández, (2024) Determinar la fórmula molecular, que puede realizarse mediante la espectrometría de masas de alta resolución (HRMS). Aunque existen métodos clásicos que permiten determinar la fórmula molecular a partir de la composición centesimal y peso molecular del compuesto. En este momento, conocemos los átomos que componen nuestro compuesto y la proporción en la que participan. En el caso del butano,  $C_4H_{10}$ . Una vez conocida la fórmula molecular podemos escribir las posibles estructuras del compuesto. La fórmula  $C_4H_{10}$  es compatible con dos isómeros: butano lineal y metilpropano. Una vez consideradas las posibles estructuras de nuestra fórmula molecular, el análisis de los espectros permitirá distinguir unos isómeros de otros para establecer cuál de ellos corresponde a la sustancia problema.

## **F. Aceites vegetales**

Los aceites vegetales contienen triglicéridos, los cuales son extraídos de frutas, semillas o plantas, por ejemplo, olivo, coco, maní, planta de algodón, entre otros. Estos cultivos oleaginosos utilizan la luz solar y la fotosíntesis para su crecimiento y eliminan el dióxido de carbono de la atmósfera terrestre, por lo tanto, contribuyen en la reducción de gases de efecto invernadero. La demanda de la actualidad hace que la mayor parte de los combustibles provenientes de compuestos fósiles no puedan reponerse rápidamente para satisfacer el auge de la demanda energética, lo que provoca la investigación y desarrollo de nuevas energías

renovables derivadas de fuentes naturales como la eólica, solar, hidráulica, mareomotriz y biomasa a los cuales pueden usarse como sustitutos de los combustibles fósiles. Especialmente los aceites se convierten en una alternativa no tan descabellada, esta se justifica respecto al respeto que se tiene con el medio ambiente, la sostenibilidad de las fuentes y el bajo costo de producción.

Los hidrocarburos que se producen a partir de aceites vegetales, como el aceite de coco, el aceite de girasol, el aceite de soja, aceite de jatrofa, aceite de palma o aceite de colza, hacen que se tenga una alta variedad de materia prima para los estudios de producción de biocombustibles.

Las fuentes de energía dependen directamente de las condiciones climáticas regionales, por ejemplo, para la producción de aceite de coco, es bastante común observarla en Canadá y Filipinas; el aceite de palma corresponde a Malasia, siendo esta la mayor productora en el mundo de este tipo de aceite. Por lo general, los aceites compuestos por triglicéridos contienen cadenas de carbonos que se encuentran entre los C14 y C20, mientras que el aceite de coco oscila entre C6 y C20.

**Cuadro 1.** Composición en porcentaje peso de los ácidos grasos en los tipos de aceite vegetal más comunes

Tipo de aceite	Composición (% p/p)							
	Ácido caproico	Ácido caprílico	Ácido cáprico	Acido láurico	Acido mirístico	Acido palmítico	Acido esteárico	Ácido araquídico
Coco	0.04±0.2	7±2.0	8±2.0	48±40	16±3.0	9.2±1.5	2±1.0	0.25±0.2
Maíz		4±0.8	7±1.2		0.6±0.4	10±2	3.5±1.5	
Semillas de algodón					0.4±0.2	20±2.5	2±0.6	
Palmiste		±1	5±2	41±5	16±2	8±1.0	2±0.8	
Oliva					0.65±0.2	11.5±4	2±0.5	0.22±0.12
Soja					0.5±0.2	9±2	4±1.5	
Girasol					3.7±1.5	2±0.8	2.3±1.2	
Cacahuates					7.5±1.5	4.5±1.8	3±1.2	

En el **Cuadro 1** se incluye la composición de los aceites vegetales que más se producen el grupo de interés es el aceite de coco, maíz y girasol por tener más probabilidades de producción en Guatemala.

## 1. Aceite de coco

El aceite de coco se obtiene a partir de la copra (pulpa seca del coco). La copra tierna se seca, se prensa y se extrae, y después se refina. El cocotero es de mucha utilidad para los pueblos trópicos, especialmente en el sureste de Asia y Polinesia. En la alimentación este aceite, suple grasas, minerales y vitaminas esenciales, se consume como fruta seca, de la inflorescencia se obtiene una bebida refrescante o fermentada y el tronco del cocotero suplen materiales de construcción, abundante y durables. Su uso es básico en la economía de los pueblos de oriente, aun es mayor su valor como artículo de exportación, en forma de copra para aceite o de coir para fibra.

El coco era la oleaginosa más importante en el comercio mundial, actualmente ocupa el tercer lugar, después de la soya y la palma africana. Se estima que se exporta 300 millones de toneladas métricas al año de copra y tres quintas partes provienen de la región compuesta por Filipinas, Indonesia, Sri Lanka y Oceanía. América produce apenas una décima parte de la producción exportable mundial, la mitad corresponde a México y el resto en su mayor parte a países del Caribe.

El primer uso que se le dio al aceite de coco fue la jabonería, debido al alto contenido de ácido láurico que produce jabón liviano y espumoso. Este uso se ha mitigado en los últimos años, ya que existen otros productos que tienen la misma función. Actualmente se usa para producir margarina, cosméticos y lubricantes, y en menor grado estearina que se aplica en la fabricación de velas; cuando se tiene el aceite, la torta se emplea en la alimentación de ganado. La copra seca tiene un uso menor en confitería.

El coco, pertenece a un género monotípico, es decir de una sola especie, de la subfamilia de las Coccoideas, en la cual se incluyen géneros africanos y americanos, su distribución geográfica abarca las áreas húmedas de los tópicos. Por lo general crece en los literales, aunque a veces se desarrolla y fructifica muy lejos del mar, en las regiones del Ecuador alcanzan alturas de hasta 1000 m. Requiere luz abundante y alta humedad en el aire. Resiste bien los suelos salinos, las sequias prolongadas (Mejía Parra, 2012).

Figura 17. Gamas de composición de ácidos grasos de aceite vegetal: coco en porcentaje del contenido total de ácidos grasos

<b>Ácidos grasos</b>	<b>Aceite de Coco</b>
Ácido Caproico C6:0	-
Ácido Caprilico C8:0	4,6 -10,0
Ácido Cáprico C10:0	5,0 -8,0
Ácido Láurico C12:0	45,1 - 53,2
Ácido Mirístico C14:0	16,8 -21,0
Ácido Palmítico C16:0	7,5 -10,2
Ácido Estearico C18:0	2,0 -4,0
Ácido Oleico C18:1	5,0 -10,0
Ácido Linoleico C18:2	1,0 - 2,5
Ácido Alfa-Linolénico C18:3	-

Fuente: Gutiérrez-Antonio, Gómez-Castro, Lira-Flores, y Hernández, (2017)

## 2. Aceite Usado de cocina

Según Valencia, Valenzuela, Nuñez, y Barrera, (2002), el rápido crecimiento de diferentes sectores de consumo de aceites en los últimos años se debe a la modificación de los hábitos alimentarios. Actualmente, la mayor parte de los aceites y grasas comestibles se consumen después de haber sido sometidos a elevadas temperaturas, en procesos como fritura y horneado, de manera que estos sufren procesos de degradación.

Figura 18. Consumo de aceites vegetales en España.

Oils	Home ML	Restaurants ML	Institutions ML	Total	Home (%)	Restaurants (%)	Institutions (%)
Olive	360.59	34.67	6.82	402.08	89.68	8.62	1.70
Sunflower	247.01	67.72	28.25	342.98	72.02	19.74	8.24
Corn	4.36	0.36	0.00	4.73	92.28	7.72	0.00
Seeds	16.67	5.35	0.38	22.39	74.42	23.87	1.71
Soybean	2.65	1.11	0.00	3.76	70.45	29.55	0.00
Other	24.74	3.03	0.01	27.78	89.08	10.90	0.02
<b>Total</b>	<b>656.02</b>	<b>112.24</b>	<b>35.46</b>	<b>803.72</b>	<b>81.62</b>	<b>13.96</b>	<b>4.41</b>

Form the Statistical Yearbook of Spanish Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Official Statistics of Spain

Fuente: (Llamas L., 2015)

Los aceites residuales presentes un problema para el medio ambiente, dado que contaminan el agua produciendo una captación del oxígeno que impide la subsistencia de los organismos acuáticos, esto hace que los gases en el agua puedan intercambiarse, además impide la penetración de la luz solar. Con respecto a la salud humana, el recalentado de aceite da a lugar a una sustancia llamada acroleína, que causa irritación, gástrica, además se generan compuestos aromáticos derivados del antraceno, ambos agentes cancerígenos Sanaguano S., Bayas M., & Cabrera C, (2019)

El sector de transporte consume un 30% de toda la energía utilizada en el mundo. Esta cifra es de 32% en la Unión Europea y 39% en España. En la actualidad el mundo consume diariamente 83,7 millones de barriles de petróleo y las estimaciones indican que esta cifra alcanzará 112 millones, según un análisis realizado por (Pardal, 2012).

Para contrarrestar esto, el biodiésel es una de las mejores fuentes disponibles para cumplir esta demanda de energía en el mundo. Por ello los científicos han puesto sus miradas en los biocombustibles como el biodiésel y el bioqueroseno. Un parámetro importante que considerar es el índice de refracción que indica que las muestras de aceite no son puras.

Figura 19. Índice de refracción del aceite de fritura

Índice de refracción a 25°C				Promedio	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Muestra 1	1,460	1,462	1,460	1,461	1,454	1,456	NTE INEN 42
Muestra 2	1,459	1,458	1,458	1,458	1,454	1,456	NTE INEN 42
Muestra 3	1,457	1,458	1,457	1,457	1,454	1,456	NTE INEN 42

Fuente: (Sanaguano S., Bayas M., & Cabrera C., 2019)

## G. Destilación al vacío

En base al método presentado por Pavia, Lampman, Kriz, y Engel, (2011), la destilación al vacío es utilizada para compuestos que tienen altos puntos de ebullición (mayores a 200 °C). Por lo general estos compuestos sufren descomposición térmica a las temperaturas necesarias para su destilación a presión atmosférica. Se basa en reducir el punto de ebullición reduciendo

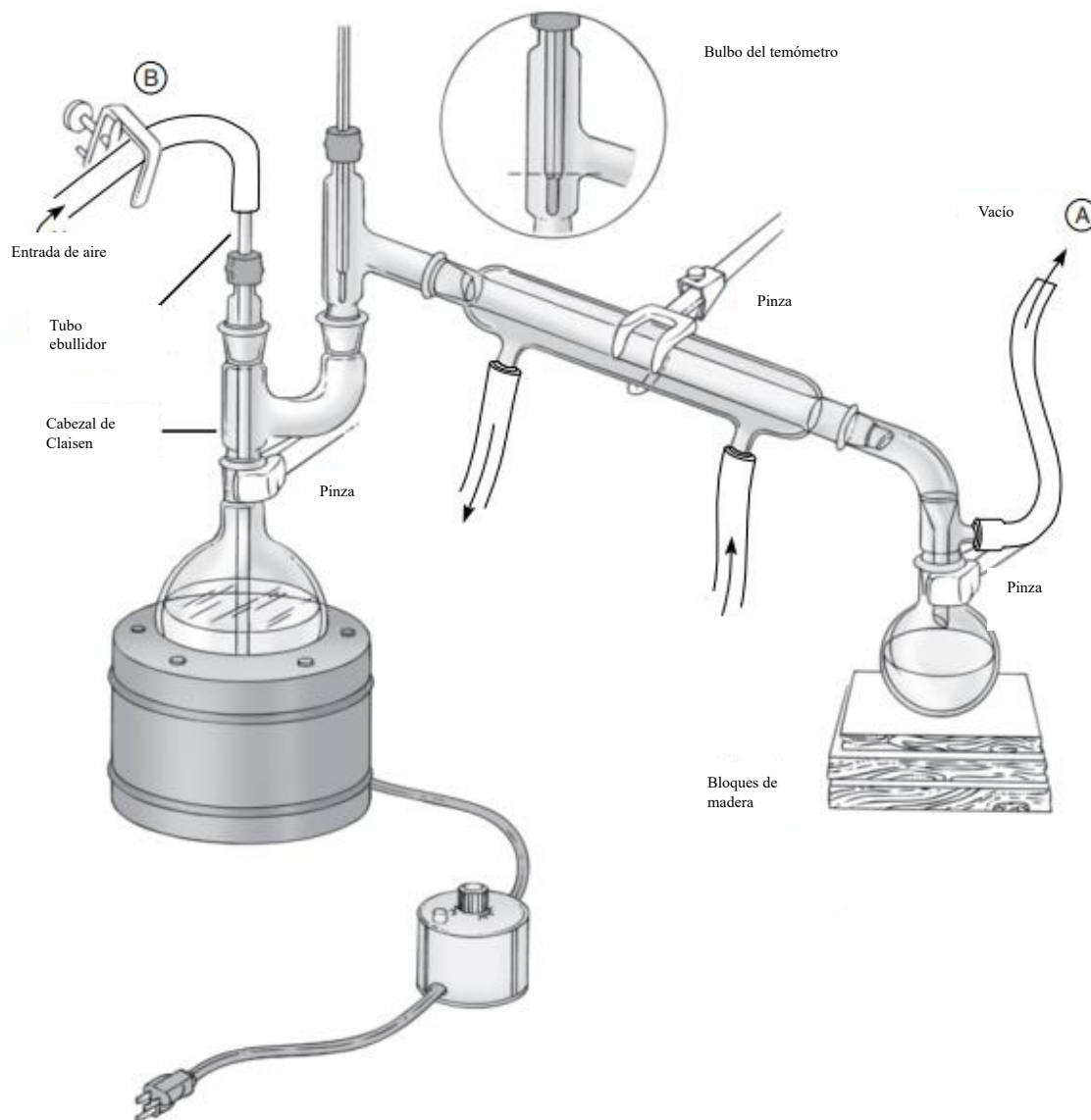
sustancialmente la presión de operación. También es un método que se usa para moléculas que al calentarse pueden reaccionar con el oxígeno presente en el aire o al tener limitaciones experimentales se tenga que trabajar a bajas temperaturas. Aunque la destilación al vacío presenta este tipo de ventajas, es necesario comprender que esto es contrarrestado por el hecho de que las separaciones de líquidos de diferentes puntos de ebullición pueden no ser tan eficaces con una destilación al vacío como una destilación simple.

### **1. Seguridad**

Cuando se hace una destilación al vacío es importante trabajar en una campana de extracción, especialmente cuando las temperaturas son muy altas o si la presión es extremadamente baja, por lo general cuando se arma un sistema de destilación al vacío, se tiene de referencia una destilación simple, las únicas diferencias son que se inserta una cabeza de Claisen entre el matraz de destilación y el cabezal de destilación y que la abertura a la atmosfera ha sido sustituida por una conexión a una fuente de vacío, además se añade un tubo de entrada de aire en la parte superior del cabezal de Claisen (ver Figura 5.1).

Con respecto a la fuente de vacío, puede existir los aspiradores siendo estos las fuentes más sencillas, más disponibles y menos peligrosas, no obstante, si se necesitara presiones inferiores a 10-20 mmHg será imprescindible el uso de bombas de vacío mecánicas.

Figura 20. Sistema de destilación al vacío a escala laboratorio



Fuente: Extraído de Pavia, et al., 2011

## 2. Ensamblado del sistema de destilación

En el momento del ensamblado del sistema es necesario realizar las siguientes revisiones:

- Cristalería:** antes del montaje, comprobar que no exista grietas ni residuos sólidos en las uniones cónica estándar, dado que estas pueden hacer no hermética la destilación y pueden existir fugas.
- Engrasado de las uniones:** es importante colocar un poco de vaselina o grasa en las uniones de las cristalerías con esmerilado, estas evitan las fugas, sin

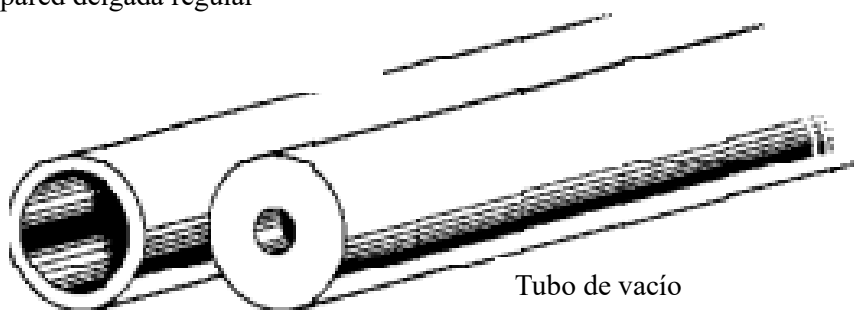
embargo, hay que tener cuidado de no usar mucho, puesto que pueden contaminar la muestra. Luego de haber colocado la grasa adecuada ensamblar cuidadosamente y enroscar, será notorio si usa mucha grasa.

- c. **Cabezal de Claisen:** se coloca entre el matraz de destilación y el cabezal de destilación para evitar que el material “choque” contra el condensador.
- d. **Tubo ebullidor:** es el tubo de entrada de aire en la parte superior del cabezal de Claisen. Usando una abrazadera de tornillo en el tubo de pared gruesa conectado, esto se hace para ajustar el ebullidor y admitir una corriente lenta y continua de burbujas de aire en el matraz de destilación mientras se hace la destilación esta es una alternativa a las perlas de ebullición puesto que estas no funcionan en la destilación al vacío. El tubo debe ajustarse de tal forma que quede justo por encima del fondo del matraz de destilación, si en caso no existiera un tubo ebullidor, se puede fabricar uno usando un tubo de vidrio, este se calienta y se le extrae 3 cm formando el tubo, posterior este se quiebra y se coloca en un adaptador de termómetro.
- e. **Bastoncillos aplicadores de madera:** esta es otra alternativa al tubo de ebullidor, por lo general es un bastón de madera de pino, esto se debe a que el aire puede quedar atrapado en los poros de la madera, bajo vacío el palillo emitirá una corriente lenta de burbujas para agitar la solución, cada que se arme el sistema se debe usar una nueva varilla.
- f. **Colocación del termómetro:** asegurar que el termómetro esté colocado de forma que todo el bulbo de mercurio quede por debajo del brazo lateral del cabezal de destilación, esto es muy importante dado que, al estar más alto, es posible que no esté rodeado por una corriente constante de vapor del material que se está destilando y por consiguiente no se alcance el equilibrio de temperatura como resultado la lectura de temperatura será incorrecta.
- g. **Clips de unión:** son abrazaderas de plástico que deben utilizarse para fijar la cristalería ya ensamblada, especialmente las que se conectan al condensador.
- h. **Tubo de presión:** la conexión a la fuente de vacío se realiza con un tubo de presión (tubería de vacío) a diferencia de la tubería de pared delgada que se usa para transportar gas o agua, tiene paredes pesada y no se colapsará hacia

adentro cuando se evacue hacia el interior cuando se evacua el sistema. Hay que asegurar que estos tubos estén bien apretados, mantener las longitudes relativamente cortas, este no debe tener grietas, preferiblemente nuevas.

Figura 21. Diferencias entre un tubo de pared y un tubo de vacío.

Tubo de pared delgada regular



- i. **Tapones de goma:** Usar siempre tapones de goma blanda en un aparato de vacío, los corchos no ofrecen un cierre hermético. Los tapones de goma se endurecen con el tiempo y uso, tener cuidado con su hermeticidad, si este es demasiado flojo o duro, no contribuirá en la destilación.
- j. **Matraz receptor:** Cuando se espera más de una fracción de una destilación al vacío, se considera una buena práctica disponer de varios matraces receptores previamente pesados, incluyendo el original. Al momento de cambiar los matraces receptores, será necesario detener el calentamiento y purgar el sistema por ambos extremos.
- k. **Trampa de vacío:** En toda destilación al vacío se acostumbra a colocar una “trampa” en la línea que se conecta a la fuente de vacío (ver figura 5.3), es esencial si se utiliza un aspirador o una aspiradora doméstica como fuente de vacío, una bomba de vacío mecánica requiere otro tipo de trampa (ver figura 5.4). Si la presión desciende lo suficiente, el vacío del sistema arrastrará el agua del aspirador a la línea de conexión, la trampa permite ver como ocurre esto y permite tomar medidas correctoras (impedir la entrada de agua en el sistema de destilación). La acción correcta para cualquier cosa que no sea una pequeña cantidad de agua es “ventilar” el sistema, esto se puede hacer abriendo la abrazadera de tornillo en la parte superior de la trampa para dejar entrar aire en el sistema, también es la forma de admisión en que el aire es admitido en el sistema al final de la destilación. Al final de cada destilación

purgar el sistema, esto se hace abriendo inmediatamente la abrazadera de tornillo situada en la parte superior del tubo ebullidor.

Figura 22. Trampa de vacío para un sistema de destilación al vacío usando un aspirador como fuente

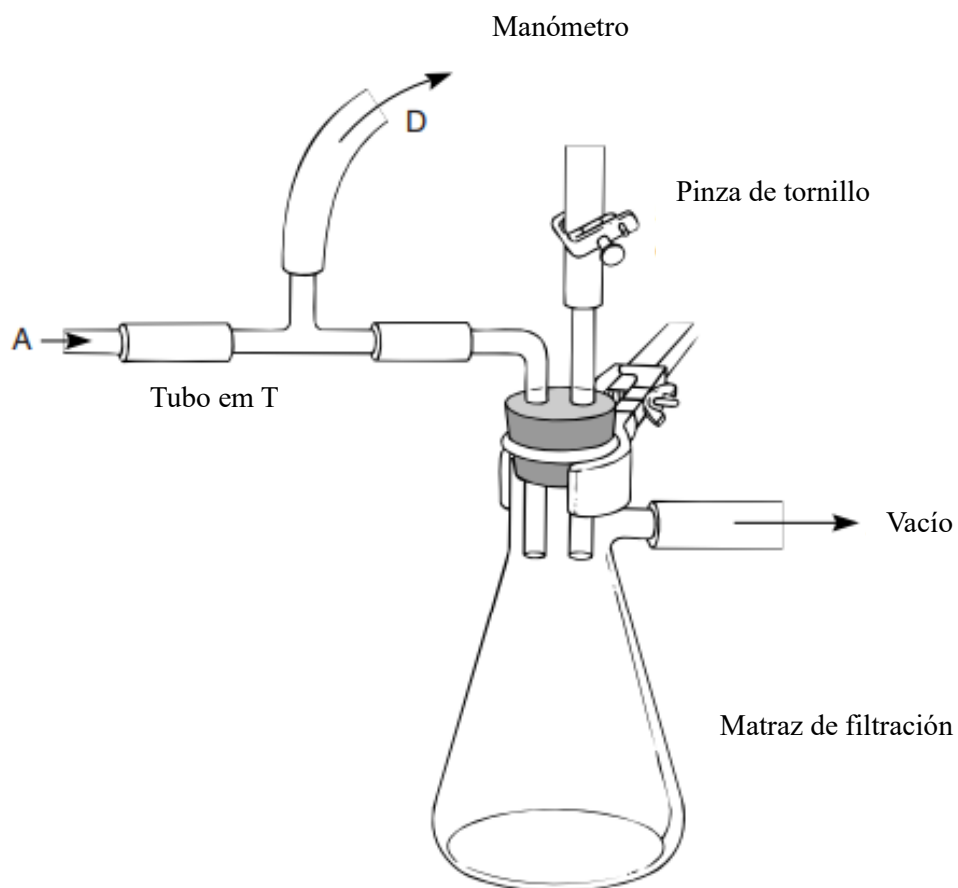
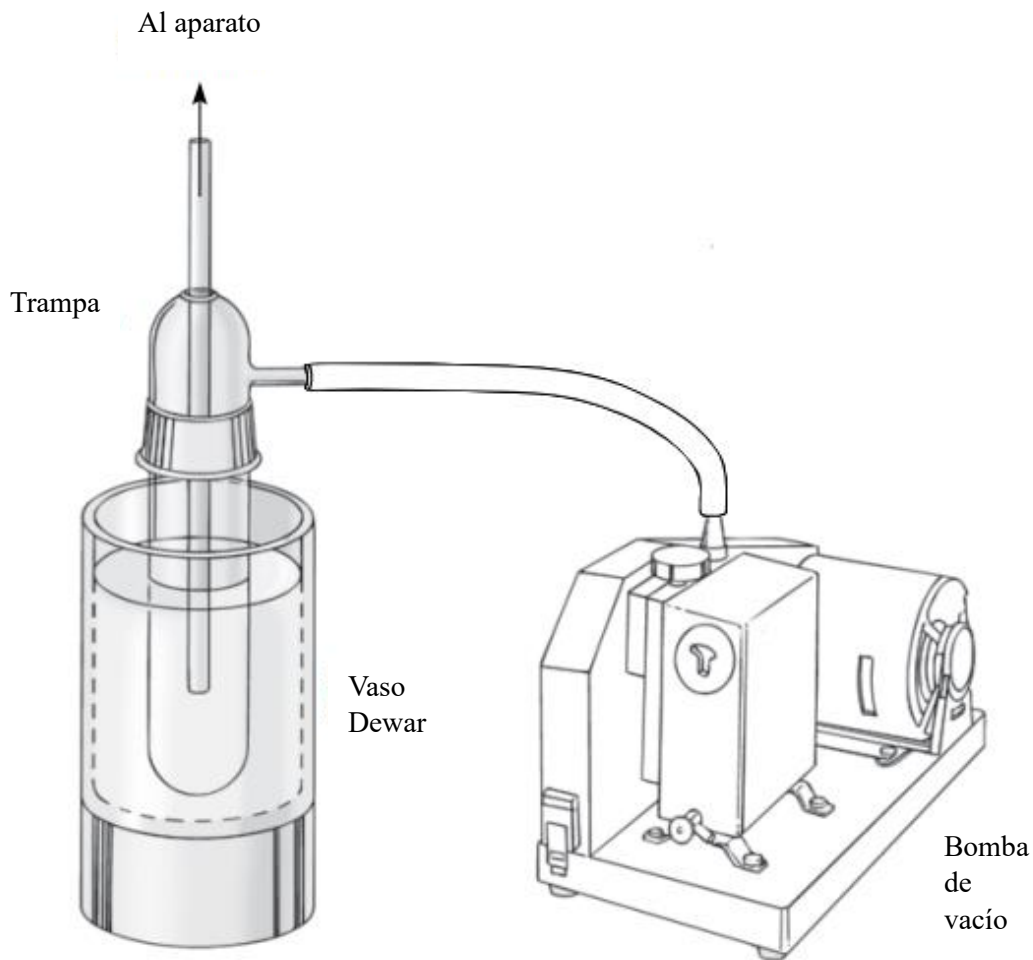


Figura 23. Trampa de vacío para un sistema de destilación al vacío usando una bomba de vacío como fuente



Trampa refrigerada, esta protege el aceite de la bomba de los vapores que puede haber en el sistema de destilación, si estos vapores se disuelven en el aceite la presión de vapor aumentará, reduciendo su eficacia. Se compone de un matraz Dewar el cual debe llenarse con agua helada, a menudo se usan dos trampas, la primera contiene agua helada y la segunda hielo seco, acetona o nitrógeno líquido, la primera trampa licua los vapores de bajo el punto de ebullición que podría congelarse o solidificarse en la segunda trampa bloquear los vapores.

**Conexión de manómetro:** Un manómetro permite medir la presión, un tubo en Y o en T, en la línea que va del aparato a la trampa. Esta conexión de derivación es opcional, pero es necesaria si se desea controlar la presión real del sistema, es importante usar un manómetro puesto que dará la lectura de la presión a la que se está destilando el producto.

1. **Aspiradores:** En muchos laboratorios, la fuente de vacío más conveniente para una destilación a presión reducida es el aspirador. En teoría el aspirador puede hacer un vacío igual a la presión de vapor del agua que fluye a través de él, la presión del vapor del agua depende de la temperatura (24 mmHg a 25 °C; 18 mmHg a 20 °C; 9 mmHg a 10 °C).

Pavia, Lampman, Kriz, y Engel, (2011).

### 3. Destilación al Vacío: Instrucciones paso a paso

#### *Evacuación del aparato*

- Ensamblar el sistema como se muestra en la figura 5.1 y como se discutió en la sección “5.2”, conectar una trampa de vacío, a continuación, conectar el sifón a un aspirador o a un sistema de vacío doméstico en el punto E. No cerrar ninguna abrazadera en este momento.
- Pesar cada uno de los balones receptores vacíos que se utilizarán para recoger las distintas fracciones durante la destilación.
- Concentrar el material a destilar en un matraz Erlenmeyer o vaso de precipitados, eliminando todo tipo de disolvente volátil mediante un baño de vapor o un baño de agua, usar piedras de ebullición y una corriente de aire para ayudar a eliminar el disolvente.
- Retirar el matraz de destilación del aparato de destilación al vacío, eliminar la grasa con una toalla y transferir el concentrado al matraz utilizando un embudo. Completar la transferencia enjuagando con una pequeña cantidad de disolvente, de nuevo concentrar el material hasta que no se pueda eliminar más disolvente volátil. El matraz no debe estar más lleno de la mitad después de la concentración, reengrasar las uniones y ensamblar al sistema de destilación
- En el conjunto de la trampa abrir la abrazadera en “C” y fijar un manómetro en el punto “D”.
- Encender al máximo el aspirador o bomba de vacío.
- Apretar la abrazadera de tornillo en “B” hasta que el tubo este casi cerrado
- Volviendo a la trampa, apretar lentamente la abrazadera de tornillo en el punto “C”. Observar el burbujeo del tuboebullidor para comprobar que no es demasiado vigorosa ni demasiado lenta, los disolventes que no se hayan podido eliminar durante la concentración se eliminarán ahora, una vez que el burbujeo se ralentice, cerrar la abrazadera roscada “C” al máximo.
- Ajustar el tubo ebullidor en B hasta que se forme un chorro fino y constante de burbujas.
- Esperar unos minutos y registrar la presión obtenida.
- Si la presión no es satisfactoria, comprobar que las conexiones estén bien apretadas. Girar las mangueras para apretarlas, presionar los tapones de goma. Comprobar el

ajuste de todos los tubos de vidrio, presionar las uniones hasta que parezcan uniformemente engrasadas y bien unidas. Si al apretar el tubo de goma entre el aparato y el sifón con la mano y la presión disminuye, significa que hay una fuga en el conjunto de la cristalería, si no se produce un cambio el problema puede estar en el aspirador o en la trampa, reajustar el tornillo de ebullición en “B” si es necesario.

- Una vez establecido el vacío, registrar la presión, posterior se puede quitar el manómetro, colocar un tornillo delante del manómetro en “D” y apretarlo.

Pavia, Lampman, Kriz, y Engel, (2011).

### ***Inicio de la destilación***

- Colocar la fuente de calor en posición con bloques de madera u otros medios y comenzar a calentar.
- Aumentar la temperatura, eventualmente un anillo de reflujo entrará en contacto con el bulbo del termómetro y comenzará la destilación.
- Registrar el intervalo de temperatura y el intervalo de presión. El destilado debe recogerse a una velocidad de aproximadamente 1 gota por segundo.
- Si el anillo de reflujo se encuentra en la cabeza de Claisen pero no sube a la cabeza de destilación, será necesario aislar las piezas envolviéndolas con algodón y papel aluminio (con el lado brillante hacia dentro) esto ayudará al destilado a pasar por el condensador.
- El punto de ebullición debería ser relativamente constante, mientras la presión sea constante. Un aumento rápido de la presión debe ser a un mayor uso de los aspiradores de laboratorio, también puede deber a la descomposición del material, una descomposición presenta una densa niebla blanca en el matraz de destilación, si esto ocurre, reducir la temperatura de la fuente de calor o retirar la fuente y esperar a que el sistema enfríe, cuando la niebla desaparezca se podrá investigar la causa.

Pavia, Lampman, Kriz, y Engel, (2011).

### ***Cambio de los frascos receptores***

- Para cambiar los matraces receptores durante la destilación cuando un nuevo componente comienza a destilar (punto de ebullición más alto a la misma presión) abrir con cuidado la abrazadera en superior del conjunto de la trampa en “C” y bajar inmediatamente la fuente de calor.
- Retirar los tacos de madera u otro soporte utilizado situado bajo el recipiente receptor, soltar la abrazadera y sustituir el matraz por un recipiente limpio y previamente pesado, usar una pequeña cantidad de grasa para reestablecer un buen sellado.
- Cerrar la abrazadera en “C” y dejar transcurrir varios minutos para que el sistema restablezca la presión reducida, si se abrió la abrazadera del tornillo del ebullición en

“B” cerrarla y reajustarla. El burbujeo no se reanuda hasta que el líquido vuelva a salir del ebullidor, este líquido pudo haber entrado en el ebullidor cuando se interrumpió el vacío.

- Volver a colocar la fuente de calor debajo del matraz de destilación y continuar con la destilación.
- Cuando la temperatura descienda en el termómetro, normalmente indica que la destilación está completa, sin embargo, si queda una cantidad significativa de líquido, es posible que el burbujeo puede haberse detenido, la presión pudo haber aumentado, la fuente de calor no esté lo suficientemente caliente o tal vez será necesario aislar el cabezal de destilación, realizar los ajustes necesarios.

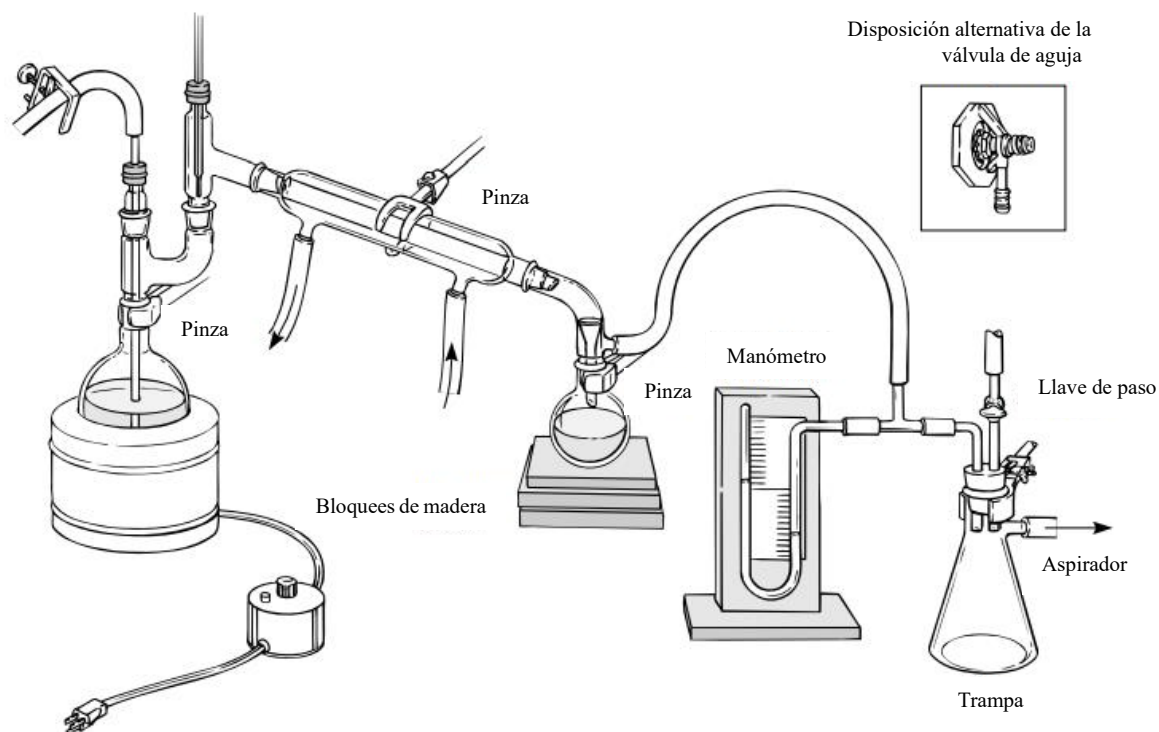
Pavia, Lampman, Kriz, y Engel, (2011).

### ***Finalización***

- Al final de la destilación, retirar la fuente de calor y abrir lentamente las abrazaderas de tornillo en “C” y “B”. Cuando el sistema este ventilado, apagar el aspirador o el vacío y desconectar la tubería.
- Retirar el matraz receptor y limpiar todo el material de vidrio tan pronto como sea posible después del desmontaje (dejar que se enfríe un poco) para evitar que los esmerilados se peguen.

Pavia, Lampman, Kriz, y Engel, (2011).

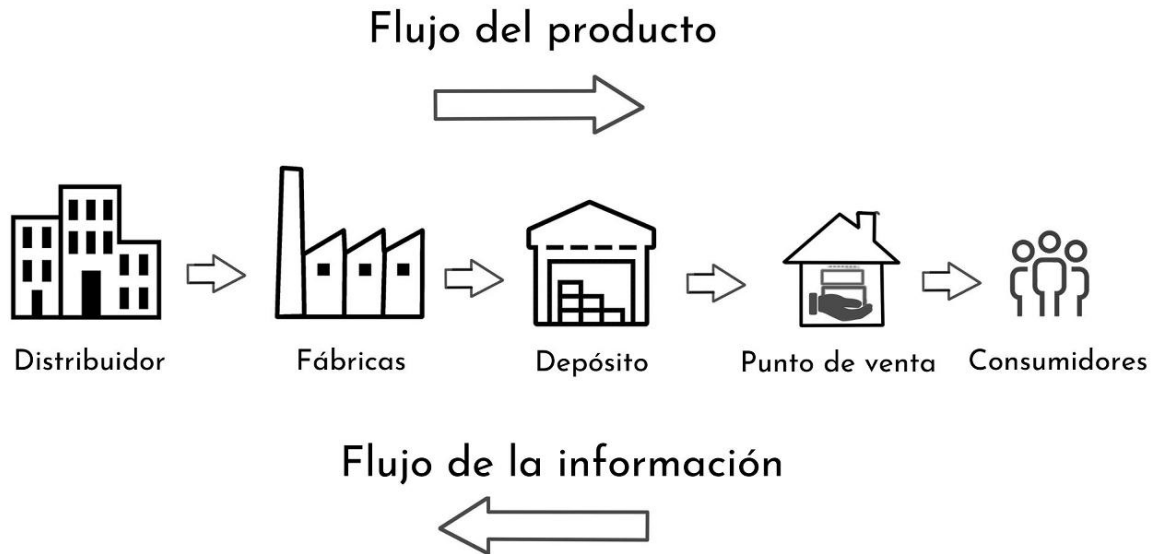
Figura 24. Sistema de destilación al vacío con componentes completos



## H. Cadena de suministros

Es un sistema que incluye todas las actividades, recursos e información para movilizar un producto o servicio de un proveedor al cliente. Se trata de una red creada entre una empresa y sus proveedores para producir y distribuir un producto específico (Lifeder, 2024).

Figura 25. Cadena de suministros



Fuente: (Lifeder, 2024).

La gestión de la cadena de suministro es un proceso vital, puesto que de esta depende un ciclo de producción más rápido y de menores costos. La gestión incluye la planificación y el manejo de todas las actividades relacionadas con el aprovisionamiento y adquisición de los productos. Así mismo impulsa la coordinación de procesos y actividades entre mercadeo, ventas, diseño de productos, finanzas y sistemas de información. También envuelve el tema de los clientes, proveedores, intermediarios y proveedores de servicio externos.

Los procesos de la cadena de suministros incluyen: planificación, fuente, elaboración, traslado y entrega, devolución y habilitación.

### 1. Estructura de una cadena de suministros.

- Definir objetivos y alcance
  - Determinar que se pretende conseguir con el análisis (por ejemplo, reducción de costos, sostenibilidad, eficiencia, etc).
  - Para el alcance, definir los límites del análisis, incluidos los tipos de biocombustibles y la zona geográfica.
- Identificar los componentes clave.
  - Analizar las fuentes de biomasa
  - Procesos de conversión: examinar las tecnologías utilizadas para convertir la biomasa en biocarburantes (por ejemplo, fermentación, transesterificación)
  - Transporte y logística: evaluar los métodos y costos de transporte de materia prima y productos acabados.
  - Distribución y venta al por menor: Examinar los canales de distribución y las redes de venta al por menor de biocarburantes.
- Recolección de datos

- Datos cuantitativos: recopilar datos sobre volúmenes de producción, costos, distancias de transporte y emisiones.
- Datos cualitativos: recopilar información sobre marcos normativos, condiciones de mercado y perspectivas de las partes interesadas.
- Evaluación de la sostenibilidad.
  - Impacto medioambiental: Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de agua y el uso del suelo.
  - Viabilidad económica: analizar costos, ingresos y competitividad en el mercado.
  - Impacto social: considerar los efectos en las comunidades locales, la creación de empleo y la equidad social.
- Modelización y análisis
  - Modelización de la cadena de suministros: utilizar herramientas como el Análisis de ciclo de vida (ACV) y modelos de optimización para simular diferentes escenarios.
  - Análisis de riesgos: Identificar posibles riesgos e incertidumbres en la cadena de suministro (por ejemplo, disponibilidad de materia prima, volatilidad de los precios)

## **I. Cadena de suministros bioqueroseno**

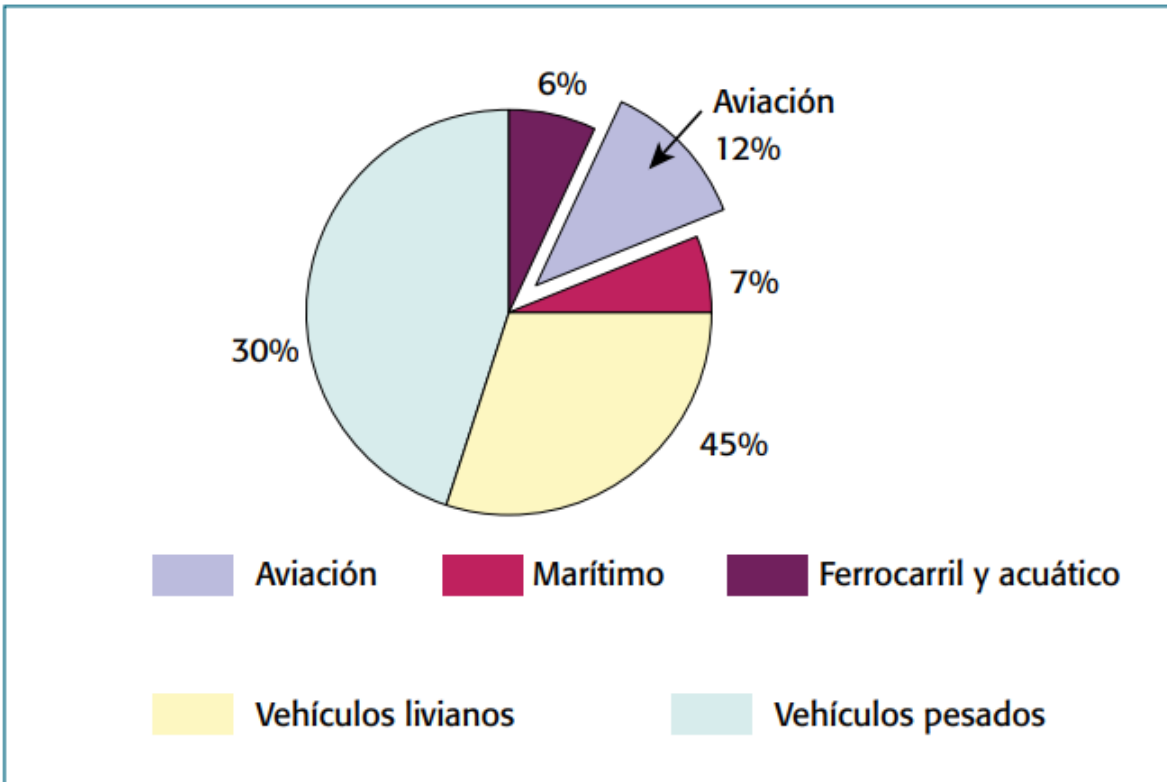
El desafío para la vinculación sustentable de los territorios rurales con los beneficios derivados de la agregación de valor en la cadena de suministros de bioqueroseno en América Latina y el Caribe ha motivado ciertas instituciones como el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) a liderar la elaboración de los eslabones de la cadena de valor del bioqueroseno para el desarrollo sostenible y la mitigación de los gases de efecto invernadero y su vinculación a los territorios rurales.

### **1. Estado de situación del bioqueroseno en el mundo.**

La industria del transporte aéreo es responsable del 2 % del total mundial de emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la combustión de carburantes fósiles. Según un análisis del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC, 2011), mediante cálculos y escenarios diferentes, la proporción puede alcanzar el 3 % y hasta el 4 – 4.7 % en el 2050.

Por otra parte el transporte en general es responsable del 23% del total mundial de emisiones de gases de efecto invernadero Stern, (2006).

Figura 26. Participación del sector de aviación en las emisiones de CO<sub>2</sub> de transporte



Fuente: (IPCC, 2011)

Más allá de una nueva opción de actividad agrícola, el surgimiento y la configuración de la cadena mundial de agroenergía y biocombustibles constituyen la posibilidad de protagonizar un nuevo paradigma con múltiples oportunidades y desafíos, para los países de Latinoamérica y el Caribe, tanto los actuales productores como los potenciales, el desarrollo de la agroenergía y de los biocombustibles representa oportunidades en términos económicos, ambientales, sociales y estratégicos.

Figura 27. Beneficios y preocupaciones de los biocombustibles

Beneficios de biocombustibles	Preocupaciones de biocombustibles
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aliviar estrés en la demanda mundial de petróleo.</li> <li>• Reducir emisiones de GEI.</li> <li>• Fomentar el desarrollo económico.</li> <li>• Promover la productividad agrícola.</li> <li>• Tener diálogos científicos.</li> <li>• Facilitar y compartir mejores prácticas.</li> <li>• Usar energía renovable, sostenible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuestiones: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Agrícolas</li> <li>– Técnicas <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conversión y tratamiento</li> <li>• Distribución y almacenamiento</li> <li>• Presencia de hongos</li> <li>• Rendimiento &amp; emisiones</li> </ul> </li> <li>– Económicas</li> <li>– Ambientales</li> <li>– Sociedad <ul style="list-style-type: none"> <li>• La seguridad alimentaria</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> <p>Cada preocupación puede ser aliviada por ciertas prácticas, pero todavía no existe un “biocombustible perfecto”. Aquí es dónde la ciencia y la tecnología están siendo desafiadas.</p>

Fuente: (IICA, 2017)

## J. Análisis Tecno-económico

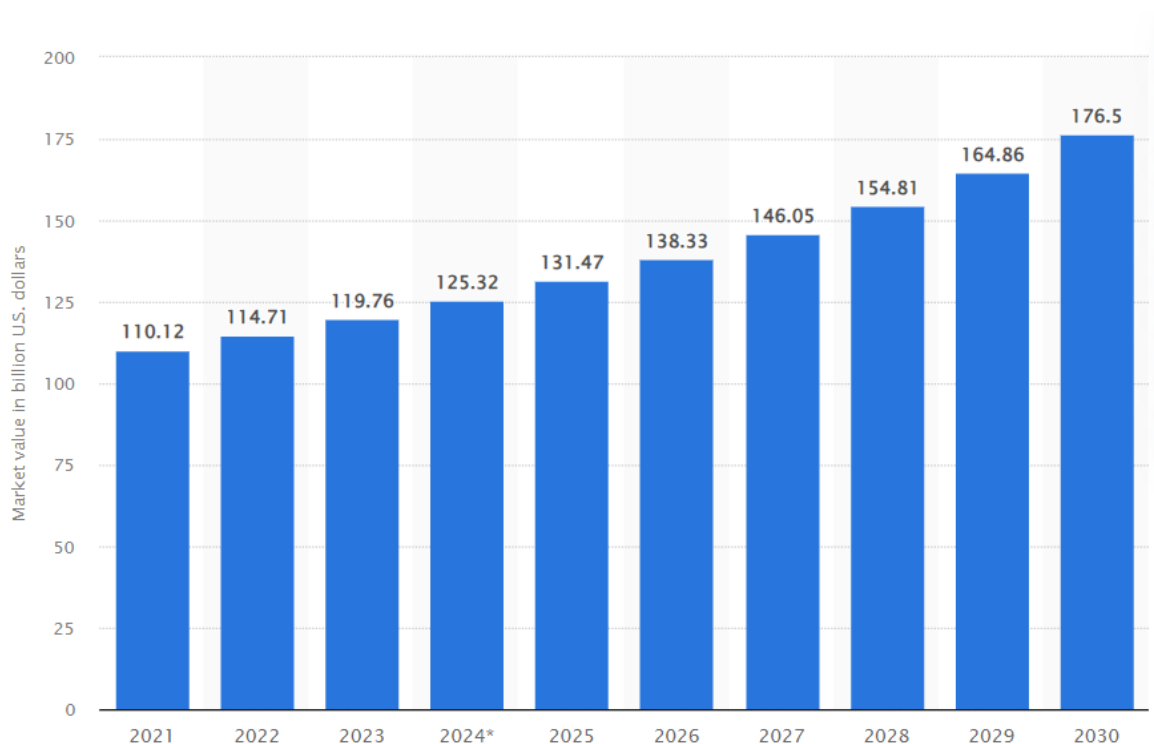
La viabilidad tecnológica y económica de la producción de biocombustibles para reactores mediante la hidroprocesación de ésteres y ácidos grasos ya ha sido descrito anteriormente, en 2013, se estimó que el costo de referencia para la producción de combustible HEFA oscilaba entre 1,01 y 1,16 US\$, representando la materia prima la parte más significativa del costo del combustible. En 2015, se evaluaron desde una perspectiva económica las vías normalizadas por la ASTM para la producción de biocombustibles para reactores (de Jong, y otros, 2015). Como resultado, la vía HEFA se consideró la alternativa más viable, sin embargo, no se esperaba que alcanzara la paridad de precios con el combustible para reactores a corto plazo, posterior a estos se reportó que la vía HEFA, no sería rentable en ausencia de incentivos gubernamentales. El valor presente neto (VPN) medio del proyecto para todas las vías es inferior a cero, lo que sugiere un apoyo político gubernamental para la viabilidad financiera. Además, las estimaciones de los costos de producción son más elevadas en el caso de los biocombustibles para motores a reacción sin HEFA, debido a los mayores gastos en materias primas y en componentes de gastos de capita Monteiro., Et al, (2022).

Aunque los materiales basados en triacilglicerol son potencialmente más caros que las basadas en materiales lignocelulósicos, la vía HEFA sigue siendo una tecnología bastante competitiva, ya que el rendimiento del combustible (86-91 %) es superior al de las tecnologías basadas en materiales lignocelulósicos (9-23 %), y el precio mínimo de venta del combustible es inferior (1.2 US\$). En general, las vías normalizadas por la ASTM para la

producción de biocombustibles de aviación están aún lejos de ser competitivas con sus homólogos fósiles, no obstante, los costos pueden verse mitigados por el mercado del carbono. En este escenario, la producción de biocombustible de aviación a través de la vía HEFA que utiliza aceite de cocina usado como materia prima tiene el costo de mitigación más bajo (Capaz, Guida, Seabra, Osseweijer, & Posada, 2020).

### **K. Valor de mercado de la producción de biocombustibles a nivel mundial de 2021 a 2023, con previsión hasta 2030**

Figura 28. Crecimiento del mercado de los biocombustibles hasta 2030



Fuente: (Statista, 2024).

El mercado mundial de producción de biocombustibles se valoró en casi 120 mil millones de dólares estadounidenses en 2023. Se prevé que las cifras sigan aumentando hasta 2030, cuando se prevé que el mercado de biocombustibles ascienda a más de 175 mil millones de dólares estadounidenses, con una tasa de crecimiento anual de 6.14% entre 2024 y 2030. Los segmentos clave del mercado por forma sólida, líquido, gaseoso, por tipo de combustible, etanol, biodiésel, diésel renovable, combustible para biojet, otros. Principales empresas que cotizan en bolsa: Diester Industries, Glencore, Infinita Renewables, Neste Oil Rotterdam, Ital Green Oil, ADM, Renewable Energy Group, Cargill, Biopetrol, Louis Dreyfus, Evergreen Bio Fuels, Jinery, RBF Port Neches, Longyan Zhuoyue, Minnesota Soybean Processors, Marathon Petroleum Corporation, Ag Processing, Hebei Jingu Group, Caramuru, Elevance, Shandong Jinjiang.

Los biocombustibles son ampliamente utilizados en el ámbito del transporte y se han promovido como una alternativa renovable a los combustibles fósiles, como la gasolina y el diésel. Entre los biocombustibles más frecuentes se encuentran el etanol y el biodiésel, los cuales se producen a partir de la destilación y refinación de materias primas tales como cultivos, aceites vegetales y grasas alimenticias. A pesar del incremento en el uso de biocombustibles, estos suelen mezclarse con gasolina y diésel para ser compatibles con motores de combustión interna convencionales. Los principales productores de biocombustibles a nivel mundial son Estados Unidos, Brasil e Indonesia (Statista, 2024)..

Se estima que la producción de biocombustibles superará los 200.000 millones de litros. Se anticipa que tanto la producción de etanol como la de biodiésel experimentarán un aumento en los próximos años. Para 2024, se pronostica que la producción global de biocombustibles podría alcanzar cerca de 200.000 millones de litros anuales (Statista, 2024)..

## V. Metodología

### A. Transesterificación de aceites usando un reactor de 2 L.

**Cuadro 2.** Materiales y cristalería necesarios para la transesterificación

Cantidad	Cristalería/Material	Capacidad	Incertidumbre	Marca
1	Reactor	2 L	No aplica	No aplica
1	Agitador magnético	No aplica	No aplica	Cussons
2	Resistencias eléctricas	400 W	No aplica	No aplica
1	Recipiente contenedor de agua	10 L	No aplica	No aplica
1	Bomba de agua	18 W	No aplica	Atman
2	Mangueras adecuadas a las boquillas del reactor	No aplica	No aplica	No aplica
1	Termómetro	100 °C	± 0.1 °C	No aplica
1	Beaker	2 L	± 0.5 L	Kimax
3	Beaker	250 mL	± 0.1 mL	Kimax
1	Varilla de vidrio	30 cm	No aplica	No aplica
1	Embudo de decantación	1000 mL	± 0.5 mL	Pirex

**Cuadro 3.** Reactivos necesarios para la transesterificación

Cantidad	Reactivo	Marca	Pureza
488 mL	Metanol	Merck	99%
22 g	Hidróxido de sodio	Merck	99%
1000 mL	Aceite usado de cocina	No aplica	No aplica
1000 mL	Aceite de coco	Cocoma extravirgen	No aplica

1. Lavar y secar toda la cristalería que se usará.
2. Armar el sistema de reacción, verificando que esté equipado con un agitador, un termopar, un condensador de agua y un embudo.
3. Agregar 1000 mL (702 g, 0,80 mol) de aceite usado de cocina\* al reactor y deshidratar durante 15 minutos calentando a 120 °C.

4. Dejar enfriar el reactor y el aceite deshidratado a temperatura ambiente.
5. Elevar la temperatura a 60 °C y agitar la mezcla a 600 rpm.
6. Preparar el catalizador (metóxido de sodio) mezclando 10.7 gramos de hidróxido de sodio con 244 mL de metanol anhidro.
7. Mantener la temperatura constante y añadir a la mezcla metóxido de sodio.
8. Esperar 4 horas aproximadamente.
9. Tomar muestras de 10 mL (8 g) de la mezcla de reacción a intervalos regulares, típicamente 10 min, neutralizar con HCl concentrado (35% peso).
10. Analizar las muestras de biodiésel mediante la prueba de 3/27 agregando 3 mL de biodiésel y 27 mL de metanol observando la miscibilidad o la formación de emulsiones.
11. Cuando la prueba 3/27 muestre la miscibilidad del biodiésel y el metanol, la conversión se ha completado, se apaga la fuente de calor del reactor.
12. Enfriar el reactor y neutralizar con la cantidad estequiométrica de ácido clorhídrico concentrado (11,5 ml, 35 % en peso) y apagar el agitador.
13. Trasvasar el contenido a un embudo de decantación de 1 L y observar la formación de dos fases distintas.
14. Decantar las dos fases para recuperar el biodiésel formado (fase superior).
15. Lavar tres veces con agua el biodiésel separado en un embudo de decantación.
16. Evaporar al vacío el exceso de metanol en ambas fases.
17. Cuantificar el producto obtenido.

\*Para la transesterificación de aceite de coco se realizan los mismos pasos, también usando 1000 mL.

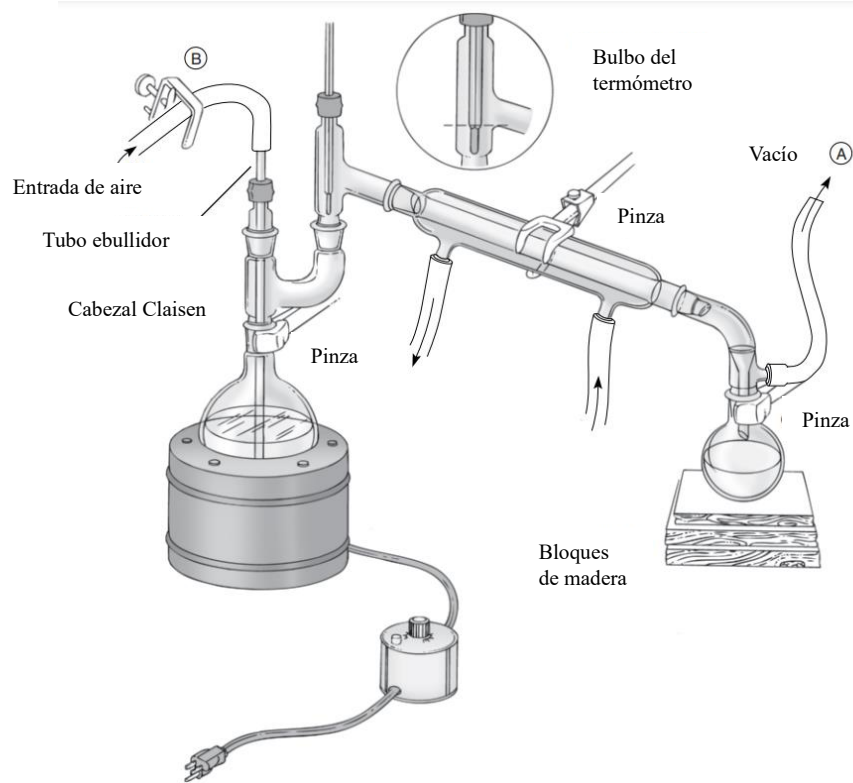
## B. Producción de Bioqueroseno a partir de la transesterificación de aceite usado de cocina.

**Cuadro 4.** Materiales necesarios para la producción de bioqueroseno

Cantidad	Cristalería/Material	Capacidad	Incertidumbre	Marca
1	Kit de destilación con adaptador de vacío	24/40	No aplica	Kimax
1	Tubo ebullición	10 mL	No aplica	Kimax
1	Kitasato	500 mL	No aplica	Pirex
3	Tubos de vidrio	5 mL	No aplica	No aplica
1	Tubo T	0.5 cm de diámetro	No aplica	
3	Mangueras adecuadas a las boquillas de los tubos de vidrio y el adaptador de vacío	No aplica	No aplica	No aplica
1	Sistema de vacío	35 inHg	No aplica	No aplica
1	Vacuómetro	35 inHg	± 0.5 inHg	No aplica
8	Claps de aseguramiento del sistema de destilación	24/40	No aplica	No aplica
5	Perlas de ebullición	No aplica	No aplica	No aplica
5	Screw Clamps de metal para sellar las mangueras	No aplica	No aplica	No aplica
1	Manta calefactora	100 W	No aplica	No aplica
1	Recipiente de agua para condensación	5 L	No aplica	No aplica
3	Pinzas de tres dedos	No aplica	No aplica	No aplica
3	Soportes Universales	No aplica	No aplica	No aplica

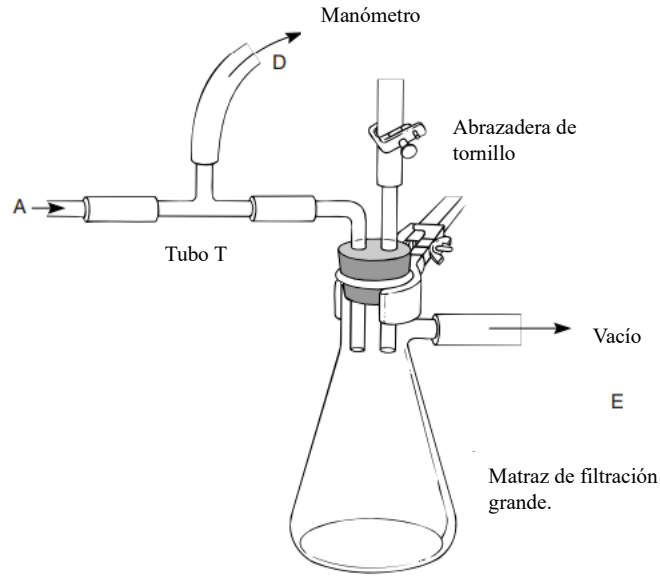
1. Armar un sistema de destilación al vacío.

Figura 29. Sistema de destilación al vacío



Fuente: Chevailer, 2017

2. Preparar una trampa para la destilación



3. Colocar 300 mL de biodiésel en el balón de entrada del sistema de destilación, colocar perlas de ebullición y usar una varilla de vidrio en contacto con la muestra.
4. Encender la fuente de calor, no tener contacto directo (dejando espacio entre la fuente y el balón).
5. Destilar entre 60 y 252 °C a - 495 mmHg.
6. Caracterizar la fracción pesada y ligera mediante espectroscopía infrarroja.
7. Comparar la composición de la fracción ligera con queroseno comercial (Jet A1).
8. Realizar mezclas entre el destilado y queroseno a base de petróleo de 5, 10 y 20% en volumen mediante procedimientos volumétricos estándares
9. Determinar propiedades fisicoquímicas, color, densidad a 25 °C, poder calorífico, punto de congelación, FTIR y GC.

### C. Caracterización de bioqueroseno producido.

#### 1. Densidad

**Cuadro 5.** Materiales necesarios para determinar la densidad del bioqueroseno

Cantidad	Cristalería/Material	Capacidad	Incertidumbre	Marca
1	Picnómetro	25 mL	± 0.1 mL	Pirex
1	Beaker	100 mL	± 0.1 mL	Kimax

1. Pesar un picnómetro de 25ml vacío.
2. Llenar el picnómetro de 25 mL con agua destilada y pesar.
3. Calcular peso de agua destilada (diferencia de pesos).
4. Calcular la densidad del agua destilada

**Ecuación 1.** Cálculo de la densidad de la muestra.

$$\rho_{agua} \left( \frac{g}{mL} \right) = \frac{m}{v}$$

5. Calcular el volumen del picnómetro

$$V_{pic} = \frac{m_{agua}}{\rho_{agua}}$$

6. Colocar una muestra de bioqueroseno dentro del picnómetro y pesar.

7. Calcular la densidad

$$\rho_{bioqueroseno} = \frac{m_{bioqueroseno}}{V_{picnómetro}}$$

## 2. Poder calorífico

**Cuadro 6.** Materiales necesarios para determinar el poder calorífico del bioqueroseno

Cantidad	Cristalería/Material	Capacidad	Incertidumbre	Marca
1	Bomba calorimétrica	2 L	No aplica	No aplica
10	Cm de alambre de cobre o hierro	No aplica	No aplica	No aplica
1	Tanque de oxígeno	No aplica	No aplica	Productos del aire

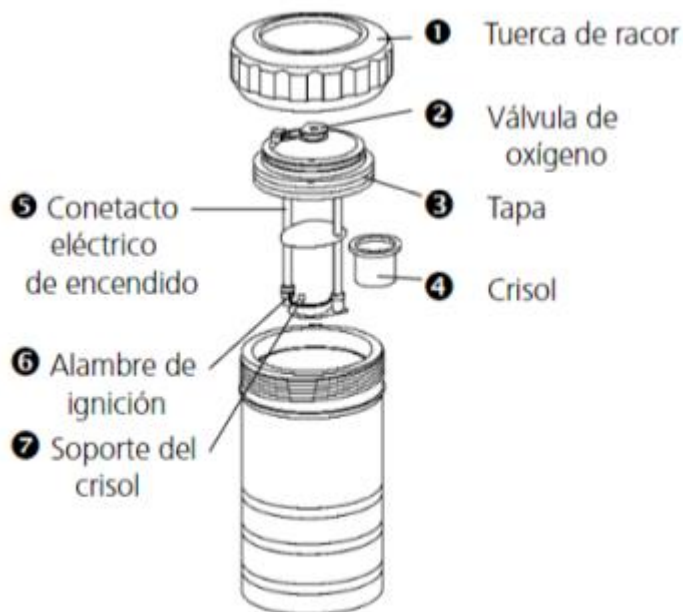
### Estandarización

1. Tomar una muestra de 0.1 g como máximo de ácido benzoico utilizando el crisol previamente pesado. Asegurarse que el crisol esté completamente limpio antes del pesaje
2. En la bomba calorimétrica (recipiente de disgregación), colocar 1 ml de agua destilada. Y en el alambre de ignición, colocar una mecha haciendo un nudo.
3. Cuidadosamente, colocar el crisol con el ácido de manera que la mecha se encuentre dentro del mismo. Cerrar la rosca de la cámara de reacción.
4. Luego, por 10 segundos, conectar a aire comprimido dicha cámara sobre la válvula de oxígeno sujeto al cabezal de llenado.
5. Después que ya esté preparada la cámara de reacción, colocar 2 L de agua dentro de la alimentación apropiada del “bucket” hasta que esté en la marca sugerida.
6. Al recipiente de disgregación colocar el adaptador de encendido y colocarlo de manera cuidadosa. Asegurarse que se conecte con el alambre de ignición.
7. Configurar los datos requeridos en el panel. Recordar: 1, es para estandarización y 0, es para prueba de muestra.

### Medición de la muestra.

\*Realizar los pasos anteriores sustituyendo el reactivo con la muestra, de la misma manera, pesar 0.1 gramos.

Figura 30. Partes del recipiente de disgregación

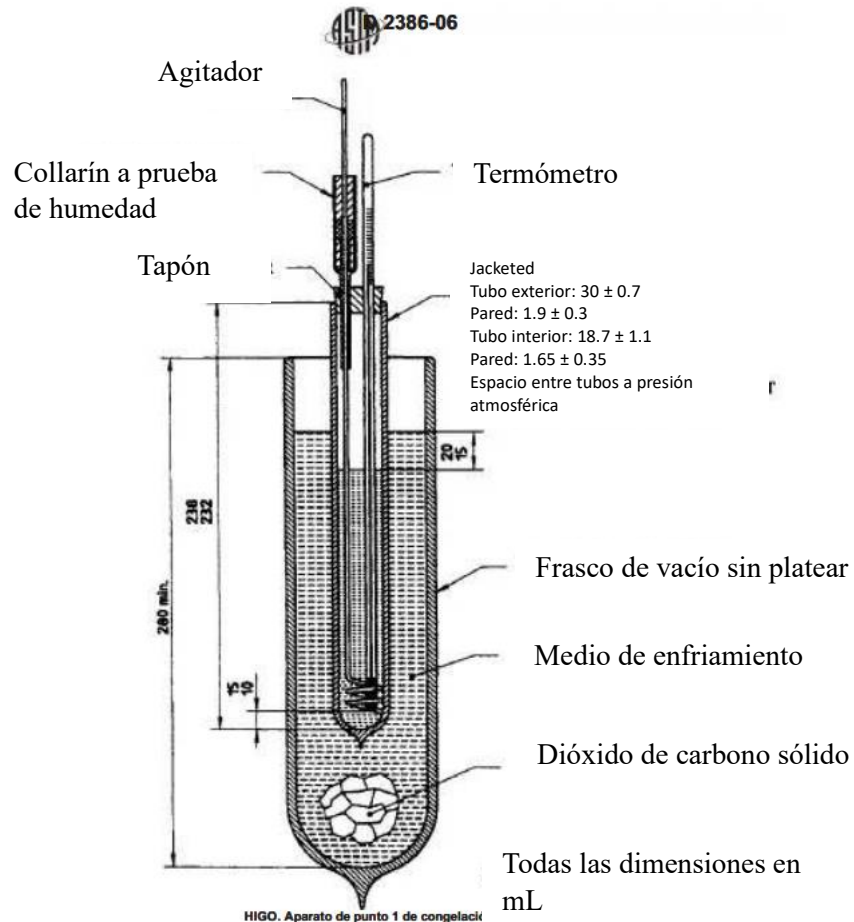


### 3. Punto de Congelación

Este análisis fue realizado por Laboratorios AMSPEC, la metodología descrita a continuación es una alternativa para realizar el análisis.

1. Lavar y secar un Jacketed tubo de muestras-A-doble pared.
2. Colocar en el espacio entre las paredes del tubo interior y exterior a presión atmosférica nitrógeno seco o aire.
3. Cerrar la boca del tubo de muestra con un tapón, apoyar el termómetro y el collar a prueba de humedad a través de la cual pasa el agitador.
4. Para el baño de enfriamiento usar etanol técnico.
5. Colocar 25 mL de bioqueroseno en un recipiente herméticamente cerrado a temperatura ambiente, minimizar la exposición a calor.
6. Medir 25 mL del biocombustible y transferir al tubo limpio y seco con camisa de muestra.
7. Cerrar el tubo herméticamente con el corcho que sostiene el agitador.
8. Ajustar la posición del termómetro de tal forma que el bulbo no toque las paredes del matraz y que se encuentre aproximadamente en el centro.

Figura 31. Dimensiones de ajuste del termómetro y el collar



Fuente: (ASTM, 2009).

9. Fijar el tubo de muestra con camisa que se extienda tan lejos como sea posible en el matraz vacío que contiene el medio de refrigeración.
10. Agregar dióxido de carbono sólido como sea necesario durante todo el ensayo para mantener el nivel de refrigerante en el matraz.
11. Agitar el bioqueroseno de forma continua, mover el agitador arriba y abajo a razón de 1 a 1.5 ciclos/s, teniendo cuidado de que los bucles de agitación se acercan a la parte inferior del matraz en la carrera descendente y se mantiene por debajo de la superficie de la muestra en la carrera ascendente.
12. Observar continuamente la formación de cristales, anotar temperatura de las primeras formaciones.
13. Quitar el tubo de muestra con camisa del refrigerante y permitir que la muestra se caliente por el aire ambiente agitándola continuamente.

14. Continuar para observar la muestra de forma continua por la desaparición de los cristales de hidrocarburos, registrar la temperatura en la que los cristales de hidrocarburo desaparecen por completo.
15. Dado que los gases liberados por el refrigerante pueden oscurecer observaciones, el tubo de muestra se puede quitar desde el refrigerante para observaciones.
16. El tubo se puede quitar no más de 10 períodos.
17. Si se observan cristales que ya se han formado, la temperatura de la muestra debe observarse y el espécimen se deja calentar por el aire del ambiente, con agitación continua, a por lo menos 5 °C por encima de la temperatura a la que desaparecen los cristales.
18. El espécimen se debe sumergir en el refrigerante y se deja enfriar.
19. Sacar la muestra del líquido refrigerante ligeramente por encima de la temperatura y observar para el aspecto de los cristales.
20. La temperatura de aparición de los cristales debe ser más fría que la temperatura de desaparición. Si esto no se cumple, no se observaron bien los cristales, además la diferencia de temperaturas no debería ser mayor que 6 °C.

#### **4. Análisis Estructural FT-IR**

Este análisis fue realizado por el Laboratorio Avanzado de Análisis Instrumental de la UVG, el procedimiento de un Espectrofotómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier puede encontrarse a continuación.

1. Colocar 5 mL de bioqueroseno en un tubo de ensayo.
2. Analizar muestras en IR.
3. Analizar picos correspondientes a biodiesel, dobles enlaces, enlaces simples y grupos funcionales.

## VI. Resultados.

**Cuadro 7.** Propiedades fisicoquímicas del bioqueroseno de aceite usado de cocina y aceite de coco

Propiedad fisicoquímica	Estadísticas	Bioqueroseno de aceite de coco	Bioqueroseno de aceite usado de cocina
Poder Calorífico (kJ/kg)	Promedio	35,990.00	36,088.67
	Desviación estándar	48.91	5.72
	Coefficiente de variación	0.0014	0.0002
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio	866.05	888.60
	Desviación estándar	0.001	0.001
	Coefficiente de variación	0.001	0.001
pH	Promedio	7.40	7.57
	Desviación estándar	0.28	0.11
	Coefficiente de variación	0.04	0.01

El cuadro anterior muestra la caracterización del destilado ligero de biodiésel a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco. Las condiciones de operación fueron presión de 125 torr y una temperatura de ebullición de 252 °C, para ambos tipos de biodiésel.

**Cuadro 8.** Comparación del poder calorífico de las distintas mezclas de queroseno comercial con los destilados ligeros de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco

	% (v/v) de bioqueroseno en la mezcla	Promedio (kJ/kg)	Desviación estándar (kJ/kg)	Coefficiente de variación
Bioqueroseno Aceite de coco	5 %	41216.33	23.70	0.0006
	10 %	41861.67	23.70	0.0006
	20 %	40780.67	23.70	0.0006
Bioqueroseno Aceite usado de cocina	5 %	43182.00	5.72	0.0001
	10 %	42555.67	5.72	0.0001
	20 %	42430.00	5.72	0.0001

El cuadro anterior muestra el poder calorífico y las estadísticas para las diferentes mezclas % (v/v) de queroseno comercial con el destilado ligero de biodiésel a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco, las mezclas fueron consultadas según (Llamas L., 2015). El poder calorífico mínimo requerido es de 42,800.00 kJ/kg ASTM D-4529, D-3338, D-4809.

**Cuadro 9.** Densidad y pH de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco

Materia prima del bioqueroseno	Parámetro	Densidad			pH		
		Promedio (kg/m <sup>3</sup> )	Desviación estándar (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de variación	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Bioqueroseno aceite de coco	5 %	803	0.00012	0.00015	7.28	0.161	0.02211
	10 %	808	0.00105	0.00130	7.41	0.361	0.04880
	20 %	814	0.00010	0.00012	7.26	0.194	0.02673
Bioqueroseno aceite usado de cocina	5 %	812	0.00042	0.00053	7.34	0.219	0.02988
	10 %	818	0.00521	0.00645	7.18	0.064	0.00896
	20 %	820	0.00282	0.00346	7.20	0.078	0.01085

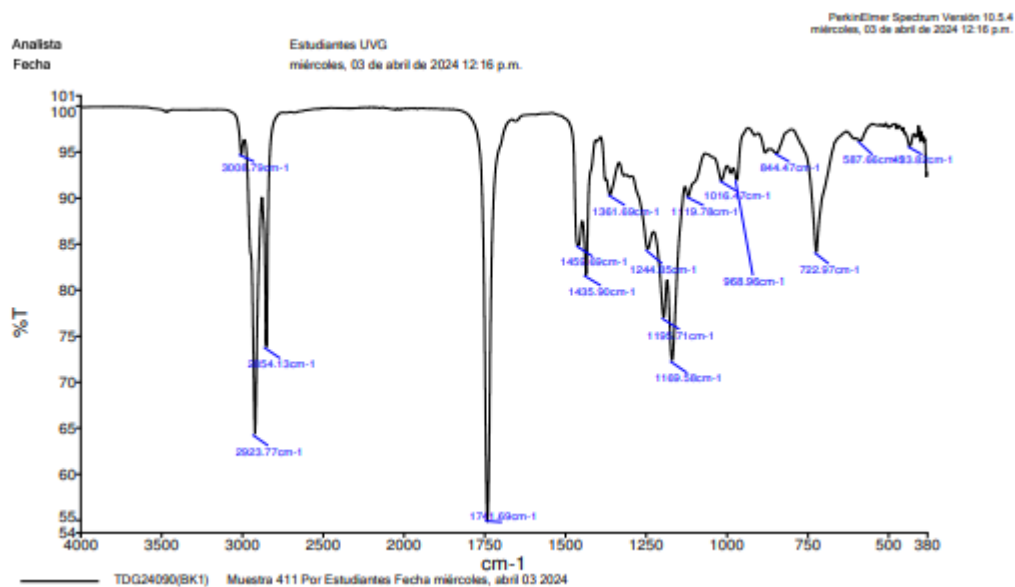
En el cuadro anterior se muestra la densidad y el pH de las mezclas realizadas entre el destilado de biodiésel a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco con queroseno de petróleo, la proporción de las mezclas fueron consultadas según (Llamas L., 2015). El rango de densidad permitido es 775 a 840 kg/m<sup>3</sup> ASTM D-1298 o D-4052

**Cuadro 10.** Punto de congelación de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco

Materia prima del bioqueroseno	% (v/v) de bioqueroseno en la mezcla	Punto de congelación (°C)
Bioqueroseno aceite de coco	5 %	-11
	10 %	-8
	20 %	-5
Bioqueroseno aceite usado de cocina	5 %	-11
	10 %	-8
	20 %	-7

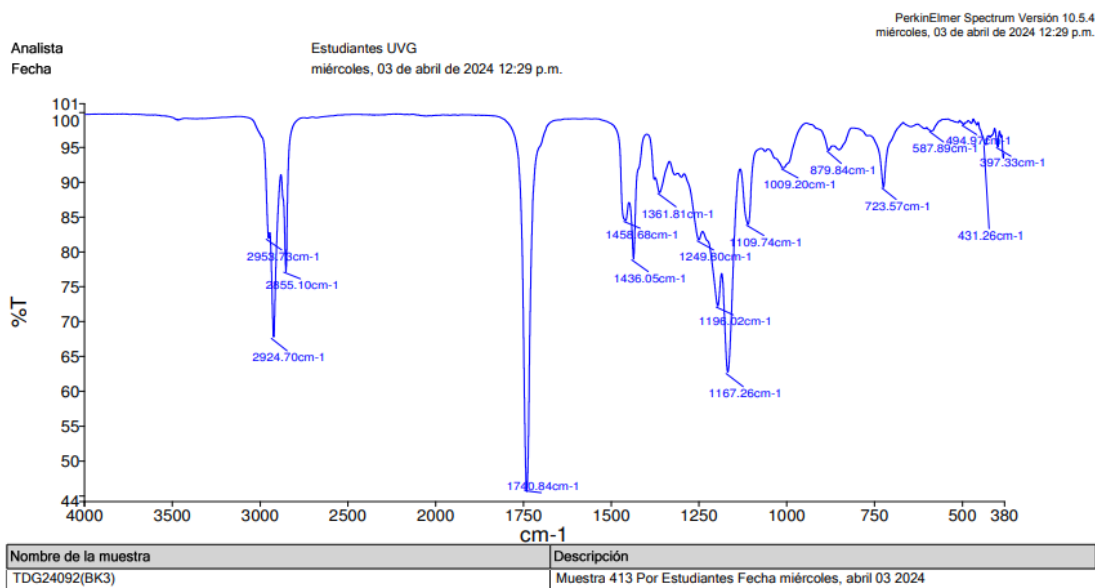
En el cuadro anterior se muestra el punto de congelación de las mezclas realizadas entre el destilado de biodiésel a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco con queroseno de petróleo, la proporción de las mezclas fueron consultadas según (Llamas L., 2015). Evaluado para alturas de vuelo de -4 y -12 °C. Estos resultados fueron realizados por OIL TEST INTERNACIONAL DE GUATEMALA, S.A, AMSPEC.

Figura 32. Espectro IR de la fracción ligera de biodiésel obtenido de aceite usado de cocina. Grupos funcionales: cetona: 1750 nm, alcano: 3000 a 3500 nm , anhídrido: 1500 a 500 nm



Fuente: FTIR-Perkin Elmer UVG, 2024. Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 33. Espectro IR de la fracción ligera de biodiésel obtenido de aceite de coco. Grupos funcionales: cetona: 1750 nm, alcano: 3000 a 3500 nm, presencia de alquenos: 3000 nm, anhídrido: 1500 a 500 nm



**Cuadro 11.** Simulación de libro de Estado de Resultados del bioqueroseno seleccionado (bioqueroseno aceite usado de cocina)

CANTIDAD DE BODEGAS, SALA DE VENTAS Y BARRILES VENDIDOS	2025											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Bodegas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sala de ventas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Barriles vendidos	100	137	146	160	190	200	236	270	294	350	389	430
<b>INGRESOS</b>												
4001 Ingresos por ventas	Q499,742	Q684,646	Q729,623	Q799,587	Q949,509	Q999,484	Q1,189,385	Q1,349,303	Q1,469,241	Q1,749,096	Q1,943,996	Q2,148,890
4111 Devoluciones y bonificaciones sobre ventas	-Q2,499	-Q3,423	-Q3,648	-Q3,998	-Q4,748	-Q4,997	-Q5,947	-Q6,747	-Q7,346	-Q8,745	-Q9,720	-Q10,744
4112 Descuentos sobre ventas	-Q4,997	-Q6,846	-Q7,296	-Q7,996	-Q9,495	-Q9,995	-Q11,894	-Q13,493	-Q14,692	-Q17,491	-Q19,440	-Q21,489
<b>Ingresos netos</b>	Q492,246	Q674,377	Q718,679	Q787,593	Q935,267	Q984,491	Q1,171,545	Q1,329,063	Q1,447,202	Q1,722,860	Q1,914,836	Q2,116,656
<b>COSTO DE VENTA</b>												
5001 Costo de los bienes vendidos	Q243,133	Q333,092	Q354,974	Q389,012	Q461,952	Q486,265	Q578,656	Q656,458	Q714,810	Q850,965	Q945,786	Q1,045,471
<b>Utilidad bruta</b>	<b>Q249,113</b>	<b>Q341,285</b>	<b>Q363,705</b>	<b>Q398,581</b>	<b>Q473,315</b>	<b>Q498,226</b>	<b>Q592,889</b>	<b>Q672,605</b>	<b>Q732,392</b>	<b>Q871,895</b>	<b>Q969,049</b>	<b>Q1,071,186</b>
<b>Margen variable</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>
<b>GASTOS</b>												
Gastos operativos												
5100 Gastos por salarios	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,120	Q6,120	Q6,120	Q6,120	Q6,120	Q6,180
5200 Gastos por suministros	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100
5301 Gastos por servicios generales	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350
5302 Gastos de internet y teléfono	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200
5400 Gastos por alquiler	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000
5500 Gastos por depreciación	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033
5600 Gastos de publicidad y mercadeo	Q1,000	Q0	Q0	Q1,000	Q0	Q0	Q1,000	Q0	Q0	Q1,000	Q0	Q0
<b>Total gastos operativos</b>	<b>Q13,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q13,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q13,803</b>	<b>Q12,803</b>	<b>Q12,803</b>	<b>Q13,803</b>	<b>Q12,803</b>	<b>Q12,863</b>
<b>Utilidad operativa</b>	<b>Q235,370</b>	<b>Q328,542</b>	<b>Q350,962</b>	<b>Q384,837</b>	<b>Q460,571</b>	<b>Q485,483</b>	<b>Q579,086</b>	<b>Q659,802</b>	<b>Q719,589</b>	<b>Q858,092</b>	<b>Q956,246</b>	<b>Q1,058,322</b>
Otros ingresos y gastos												
5800 Gastos por intereses	Q124,935	Q171,162	Q182,406	Q199,897	Q237,377	Q249,871	Q297,346	Q337,326	Q367,310	Q437,274	Q485,999	Q537,222
<b>Utilidad neta</b>	<b>Q110,434</b>	<b>Q157,380</b>	<b>Q168,556</b>	<b>Q184,941</b>	<b>Q223,194</b>	<b>Q235,612</b>	<b>Q281,739</b>	<b>Q322,476</b>	<b>Q352,279</b>	<b>Q420,818</b>	<b>Q470,247</b>	<b>Q521,100</b>
<b>Margen de utilidad</b>	<b>22.43%</b>	<b>23.34%</b>	<b>23.45%</b>	<b>23.48%</b>	<b>23.86%</b>	<b>23.93%</b>	<b>24.05%</b>	<b>24.26%</b>	<b>24.34%</b>	<b>24.43%</b>	<b>24.56%</b>	<b>24.62%</b>
Utilidad neta anual 2025	Q3,448,776											
Ingresos netos anuales 2025	Q14,294,814											
Margen de utilidad 2025	<b>24.13%</b>											

## VII. Análisis de Resultados

El objetivo de este trabajo de graduación fue evaluar técnica y económicamente la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceites.

Los aceites que se utilizaron fueron aceite usado de cocina y aceite de coco. La razón por la cual se eligieron estas dos materias primas radica en una comparación de un aceite vegetal comercial contra un aceite reciclado que contribuye al medio ambiente y al tema de seguridad alimentaria y nutricional. Además de los precios, la manera de obtención de ambas materias primas, sus propiedades fisicoquímicas y la evaluación de su comportamiento en el método propuesto también fueron factores clave. Por un lado, el aceite de coco tiene principalmente ácidos grasos con cadenas de carbono que varían entre 6 y 18 átomos de carbono, siendo los más abundantes los de cadena media (C8 a C12) esencialmente el ácido láurico. Esta particular composición, con una alta proporción de cadenas de carbono de longitud media, es una de las razones principales por las que se consideró el aceite de coco para este estudio, ya que la longitud de sus cadenas de carbono presenta similitudes con las del queroseno Jet A-1, que generalmente oscilan entre 8 y 16 átomos de carbono. Por el otro lado, el aceite usado de cocina está constituido por diferentes cadenas de carbonos para sus ácidos grasos y por tanto, algunos se asemejan a la estructura del queroseno. El aceite de coco aun cuando compite como alimento en la cadena de suministros para la seguridad alimentaria y nutricional, no necesariamente tiene que ser el aceite de coco que se usa como alimento. Esto se debe a que, al tener características moleculares similares, es posible utilizar aceite de coco de grados no aptos para el consumo humano directo, como subproductos o residuos de la industria del coco (por ejemplo, cocos que no cumplen estándares de calidad alimentaria o aceite residual de ciertos procesos). De esta forma, se aprovechan recursos que de otra manera serían descartados, añadiendo valor sin desviar directamente la materia prima destinada a la alimentación humana. Además, en un contexto de sostenibilidad, el uso de este tipo de aceite de coco puede impulsar la diversificación económica en regiones productoras y contribuir a la reducción de desechos, equilibrando la preocupación por la seguridad alimentaria con la búsqueda de alternativas energéticas más limpias

Inicialmente, se transesterificó  $1000 \pm 0.5$  mL de aceite usado de cocina purificado y  $1000 \pm 0.5$  mL de aceite de coco. Los productos de las transesterificaciones fueron posteriormente destilados al vacío. En este caso, no se consideró la purificación de ambos aceites, ya que se usó aceite comercial de coco virgen, sabiendo que su composición no tiene contaminantes. Y el aceite usado de cocina se consiguió purificado, lo que significa que no contenía ningún residuo sólido o contaminante.

La transesterificación para ambos aceites tuvo las siguientes condiciones:  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a presión atmosférica y agitación constante. La transesterificación es una reacción química en la que un triglicérido (la estructura principal de los aceites y grasas, que consiste en una molécula de glicerol unida a tres cadenas de ácidos grasos) reacciona con un alcohol (generalmente metanol o etanol) en presencia de un catalizador (como el metóxido de sodio) para producir ésteres alquílicos de ácidos grasos (biodiésel) y glicerol como subproducto. En esencia, el

alcohol reemplaza al glicerol en la unión con los ácidos grasos, rompiendo la estructura del triglicérido en moléculas más pequeñas. A temperaturas menores, la reacción es lenta y de bajo rendimiento, y a temperaturas mayores, el metóxido de sodio se evapora, lo que hace que la reacción se vuelva lenta o no se complete. Además, el catalizador es tóxico si la temperatura es mayor. Mientras que la agitación promueve una difusión turbulenta que mejora la velocidad de reacción.

Se observó que el rendimiento del destilado fue del 82% y 85% para el transesterificado de aceite usado de cocina y aceite de coco, respectivamente. Esto quiere decir que el proceso de destilación al vacío del biodiésel presenta buenos rendimientos, ya que logra producir un mayor porcentaje de bioqueroseno de la materia prima que se está destilando. La destilación al vacío es crucial porque permite la separación de los componentes del biodiésel a temperaturas más bajas que la destilación a presión atmosférica, evitando la degradación térmica. Más allá de la simple separación, en el contexto de la producción de bioqueroseno, la destilación al vacío puede inducir la ruptura de las cadenas de carbono más largas de los ésteres de ácidos grasos del biodiésel en fracciones de menor peso molecular, similares a las del queroseno.

Cabe mencionar que, como una forma adicional de producir bioqueroseno con propiedades más afines al queroseno de petróleo, se puede recurrir al craqueo catalítico. Este proceso implica la ruptura de las moléculas grandes de hidrocarburos en moléculas más pequeñas utilizando calor y un catalizador, lo que permite ajustar las cadenas de carbono para obtener un rango de destilación y características más cercanas a los combustibles de aviación convencionales. Además, para mejorar las propiedades fisicoquímicas del bioqueroseno, como el punto de congelación, el poder calorífico y otras propiedades cruciales para el rendimiento en aeronaves, se pueden emplear procesos de hidrotreamiento. El hidrotreamiento elimina impurezas como el oxígeno, azufre y nitrógeno, y satura los dobles enlaces, lo que resulta en un combustible con mayor estabilidad, densidad energética y un comportamiento superior a bajas temperaturas.

Las condiciones de operación fueron 252 °C para el punto de ebullición y 125 torr de vacío. Se observó que el volumen de muestra en el balón de alimentación era un factor crítico en el proceso. Dado que se generaba una succión cada 20 minutos, se determinó que el volumen en el balón de alimentación no debía superar las tres cuartas partes de su capacidad total. Los cambios de presión provocaban una succión intensa en el sistema, y un nivel alto en el balón podía causar arrastres que contaminaban la muestra ya destilada. Tras pruebas experimentales, se estableció que el volumen óptimo de operación es aproximadamente la mitad de la capacidad del balón. En este caso, con un balón de 250 mL, se trabajó con volúmenes de muestra entre 125 y 150 mL, lo que evitó arrastres y aseguró la pureza del destilado.

Se analizó y se comparó el espectro IR de las fracciones ligeras de bioqueroseno obtenida de ácidos grasos de aceite usado de cocina mediante transesterificación y posterior destilación al vacío (fracción ligera), con las características esperadas de un biodiésel "normal" o estándar (ésteres metílicos de ácidos grasos - FAMES) presenta una banda fuerte de C=O

(estiramiento de carbonilo): ubicada prominentemente entre  $1740-1745\text{ cm}^{-1}$ . Es una señal muy intensa y aguda que confirma la presencia del grupo éster, bandas de C-O (estiramiento de enlace éster): Un par de bandas fuertes, generalmente alrededor de  $1240-1250\text{ cm}^{-1}$  (estiramiento asimétrico C-O-C) y  $1160-1175\text{ cm}^{-1}$  (estiramiento simétrico C-O-C). Esta última, en particular, es muy característica del grupo metoxi ( $-\text{OCH}_3$ ) de los ésteres metílicos.

Bandas de C-H alifáticos (estiramiento): Múltiples picos entre  $2850-3000\text{ cm}^{-1}$ , correspondientes a los estiramientos simétricos y asimétricos de los grupos metilo ( $-\text{CH}_3$ ) y metileno ( $-\text{CH}_2-$ ) de las cadenas hidrocarbonadas.

Una banda de deformación C-H "fuera del plano" alrededor de  $965\text{ cm}^{-1}$  para los dobles enlaces trans, bandas de deformación C-H: Picos alrededor de  $1460\text{ cm}^{-1}$  y  $1370\text{ cm}^{-1}$ , y en el caso de cadenas largas, una banda de "rocking" de  $-\text{CH}_2-$  alrededor de  $720\text{ cm}^{-1}$ .

El espectro analizado exhibe de manera clara y nítida todas las características esenciales de un éster metílico, lo que confirma la exitosa formación de biodiésel a partir de los ácidos grasos del aceite usado de cocina: pico de carbonilo (C=O) de Éster: La presencia de un pico intenso y agudo a  $1740.69\text{ cm}^{-1}$  es la evidencia más contundente de la formación del grupo éster, el componente funcional principal del biodiésel.

Picos de estiramiento C-O de éster: Las bandas fuertes a  $1244.59\text{ cm}^{-1}$  y  $1169.38\text{ cm}^{-1}$  confirman el enlace éster (C-O-C), siendo el pico de  $1169.38\text{ cm}^{-1}$  particularmente indicativo del grupo metoxi ( $-\text{OCH}_3$ ) característico de los ésteres metílicos, picos de estiramiento C-H alifáticos: Los picos a  $2923.77\text{ cm}^{-1}$  y  $2854.13\text{ cm}^{-1}$  son consistentes con la naturaleza de cadena larga de los ácidos grasos de los aceites.

Picos de insaturaciones: El pico débil a  $3001.79\text{ cm}^{-1}$  (estiramiento C-H  $\text{sp}^2$ ) y la banda a  $968.90\text{ cm}^{-1}$  (deformación de alqueno trans) son cruciales. Indican que la fracción obtenida aún contiene insaturaciones, lo cual es esperable de un biodiésel derivado de aceite usado de cocina, que suele ser rico en ácidos grasos insaturados. La banda a  $722.97\text{ cm}^{-1}$  (rocking de  $-\text{CH}_2-$ ) también sugiere la presencia de cadenas alifáticas de longitud considerable.

La diferencia crucial y científicamente significativa del espectro de bioqueroseno o de la fracción ligera de la destilación de biodiésel, en comparación con un biodiésel "normal" que podría no haber pasado por una purificación exhaustiva, radica en la claridad y la ausencia de bandas de impurezas, directamente atribuible al proceso de destilación al vacío. La ausencia de contaminantes y mayor pureza: en un biodiésel crudo o con una purificación deficiente, a menudo se observan bandas de absorción correspondientes a subproductos e impurezas de la reacción de transesterificación o del material de partida. Estas incluyen: Alcoholes (glicerol, metanol residual): bandas anchas de estiramiento O-H en el rango de  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ . El espectro está notablemente limpio en esta región, lo que demuestra una eliminación altamente efectiva de glicerol y metanol.

Ácidos grasos libres (FFA): una banda ancha de O-H de ácido carboxílico entre  $2500-3300\text{ cm}^{-1}$  y un pico de C=O ligeramente desplazado (hacia  $\sim 1710\text{ cm}^{-1}$ ). La ausencia de estas bandas en el espectro indica que la transesterificación fue eficiente y/o que la destilación

eliminó los FFA residuales. triglicéridos/diglicéridos/monoglicéridos no reaccionados: aunque sus picos C=O son cercanos, la destilación elimina eficazmente estas moléculas más pesadas y menos volátiles.

La destilación al vacío permitió separar el biodiésel en fracciones con diferentes rangos de puntos de ebullición, lo que se correlaciona con la longitud de las cadenas de carbono de los ésteres metílicos. Al obtener una "fracción ligera", se infiere que se han enriquecido los ésteres metílicos con cadenas de carbono más cortas.

La definición de bioqueroseno como una mezcla de hidrocarburos (o, en este caso, ésteres metílicos) con cadenas de carbono entre C9 y C16 es fundamental. Si bien la espectroscopia IR no puede cuantificar directamente la longitud exacta de la cadena de carbono o su distribución, el hecho de que se haya realizado una destilación al vacío para obtener una "fracción ligera" respalda la intención de producir un combustible en el rango de cadena de queroseno. Los picos IR siguen siendo los mismos que para cualquier FAME, pero la pureza y la selección por volatilidad son cruciales para cumplir con las especificaciones de un combustible de aviación. La presencia aún del pico a  $722.97\text{ cm}^{-1}$  (rocking de  $-\text{CH}_2-$ ) es normal, ya que cadenas de C9-C16 siguen siendo lo suficientemente largas para exhibir esta absorción.

En síntesis, el espectro IR evaluado no solo confirma la identidad de ésteres metílicos (biodiésel) mediante la presencia de sus picos característicos (C=O, C-O, C-H), sino que también evidencia una notable pureza gracias a la ausencia de bandas de impurezas comúnmente encontradas en biodiésel menos refinado. Esta pureza, combinada con la obtención de una "fracción ligera" mediante destilación al vacío, proporciona una fuerte justificación científica de que el producto no es simplemente un biodiésel estándar, sino un biocombustible refinado y fraccionado con características potencialmente adecuadas para su uso como bioqueroseno, al enriquecer la proporción de ésteres metílicos con longitudes de cadena de carbono más cortas, un requisito clave para esta aplicación aeronáutica.

Se determinó que el poder calorífico del bioqueroseno de aceite usado de cocina fue de 36,088.67 kJ/kg con una desviación estándar de 5.72 kJ/kg mientras que el bioqueroseno de aceite de coco fue de 35,990 kJ/kg con una desviación estándar de 48.91 kJ/kg, mostrando que el aceite usado de cocina aporta más energía en una combustión. Los colores de dichas muestras fueron amarillo y blancos transparentes, el color muestra la procedencia de la materia prima, siendo el aceite usado de cocina un tono más amarillento con respecto al aceite de coco. Las densidades fueron de 0.87 g/mL y 0.89 g/mL y los pH's fueron 7.40 y 7.57, para el bioqueroseno de aceite de coco y el bioqueroseno de aceite usado de cocina, respectivamente.

La diferencia entre las densidades y los pH's no son significativas debido a que los rangos son pequeños entre sí. Con las propiedades fisicoquímicas presentadas en los resultados muestran que se obtiene bioqueroseno, el poder calorífico muestra la energía de combustión que puede ser comparado con el queroseno de petróleo, la densidad a temperatura ambiente se puede comparar con los cambios en las densidades a diferentes temperaturas del queroseno de Petróleo. Mientras que el pH y el color fueron parámetros más cualitativos que en el caso

del pH caracteriza la acidez de las muestras obtenidas mientras que el color demuestra la diferencia entre bioqueroseno obtenido de aceite de coco y bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina. Se decidió medir estas propiedades ya que fueron características de vital importancia para el funcionamiento en un motor de aviación, en el caso del poder calorífico presenta la energía de combustión que presenta un parámetro para realizar las posteriores mezclas con queroseno de petróleo siendo este una de las propiedades más importantes, no se midieron otras propiedades para delimitar el trabajo de investigación y comprender a grandes rasgos la utilidad de la producción de bioqueroseno con propiedades que necesariamente tengan que cumplir, aun cuando se tengan las demás propiedades se tendría que evaluar mediante pruebas piloto la viabilidad técnica de las mezclas de queroseno y bioqueroseno en un avión.

Estadísticamente como se puede observar en el **Cuadro 1**, las propiedades fisicoquímicas determinadas del bioqueroseno de aceite de coco y el bioqueroseno de aceite usado de cocina no presenta variaciones en las corridas por lo que se puede decir que los datos obtenidos son confiables y pueden ser usados para la reproducibilidad de nuevas muestras que presenten características similares.

Debido a que la norma ASTM no permite usar el bioqueroseno al 100 % se procedió a realizar mezclas del destilado ligero del transesterificado de aceite coco y del destilado ligero del transesterificado de aceite usado de cocina con queroseno de petróleo en % (v/v). Según (Llamas L., 2015).

En el **Cuadro 2** se muestra el poder calorífico de estas que fue de 41,216.33 kJ/kg, 41,861.67 kJ/kg y 40,780.67 kJ/kg con desviaciones estándar iguales a 23.70, respectivamente. Se observó que a medida que crece la concentración de destilado ligero en el queroseno de petróleo el poder calorífico disminuye, esto se debe a que el poder calorífico del bioqueroseno es de 35,990.00 kJ/kg y tiene un poder calorífico menor que el queroseno de petróleo (42,800 kJ/kg (MEM, 2008)), esto explica que conforme la mezcla a medida que se agrega más bioqueroseno al queroseno de petróleo la tendencia será que el poder calorífico disminuya teniendo una relación inversamente proporcional. Las mezclas del bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina presenta los siguientes resultados de capacidad calorífica, 43,182.00 kJ/kg, 42,555.67 kJ/kg y 42,430.00 kJ/kg con desviaciones estándar de 5.72, para las mezclas 5%, 10% y 20% (v/v), respectivamente.

Nuevamente se observa el mismo efecto, donde a medida que se aumenta la proporción de bioqueroseno en la mezcla el poder calorífico disminuye. Según la norma ASTM D4529, la capacidad calorífica mínima requerida para combustible de aviación es de 42,800.00 kJ/kg, donde se nota que ninguno de los bioquerosenos cumple con esta especificación, esto demuestra la necesidad de realizar mezclas de bioqueroseno con queroseno de petróleo. De las mezclas realizadas la única que cumplió fue el de 5% (v/v) de bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina y las otras mezclas no cumplieron con el mínimo requerido según la norma ASTM. Para mejorar el poder calorífico se puede realizar un redestilado del bioqueroseno ya que esto rompe las cadenas largas mejorando la combustión y agregando

valor al poder calorífico por tanto presentaría mejores resultados con mezclas mayores al 20 % (v/v).

Con respecto a la densidad de las mezclas el rango permitido se encuentra entre 775 a 840  $\text{kg/m}^3$  ASTM D1298, en el **Cuadro 3** se muestra que todas las mezclas de bioqueroseno con queroseno de petróleo en % (v/v) son aceptables debido a que están en el rango aceptable, además se muestra que no hay variación significativa en los datos según las estadísticas aplicadas. Con respecto al pH fue un parámetro adicional que sirvió para ver la acidez y alcalinidad de las muestras donde se observa que están entre 7.18 a 7.41, mostrando que las muestras son casi neutras y ligeramente alcalinas, lo que evitaría efectos de corrosión durante su uso como combustible.

En el **Cuadro 4** se muestra los resultados obtenidos del punto de congelación, parámetro esencial para las turbinas de aviación porque si este es mayor al máximo permitido al momento de atomizarse las partículas quedarán estancadas generando un problema en la turbina. Se nota que para las mezclas de 5, 10 y 20 % (v/v) para el bioqueroseno obtenido de aceite de coco el punto de congelación fue de -11, -8, y -5 °C, respectivamente, donde la tendencia es que a medida que aumenta la concentración de bioqueroseno en la mezcla el punto de congelación aumenta, este parámetro no se logró medir puesto que está relacionado con la altura de vuelo y según las normas ASTM el punto de congelación permitido es -40°C en el cual ninguna de las muestras cumplió con este estándar.

Sin embargo, es importante señalar una limitación significativa en este estudio: no se realizó una caracterización inicial del queroseno de petróleo ni de los aceites utilizados para las mezclas. Esta omisión pudo introducir una fuente de error, y, no se ajusta completamente a lo establecido por la norma ASTM. Para mejorar la fiabilidad de los resultados y las propiedades de las mezclas de queroseno de petróleo y bioqueroseno, sería esencial llevar a cabo caracterizaciones fisicoquímicas exhaustivas, como el poder calorífico y el punto de congelación, tanto de los aceites de partida como del queroseno de petróleo base. Además, la incorporación de procesos como el craqueo catalítico y los hidrotratamientos podría mejorar la estructura molecular del bioqueroseno, lo que aseguraría características más afines al queroseno de petróleo y, por ende, aumentaría el punto de congelación y el poder calorífico después de la mezcla. Esto, a su vez, permitiría mayores proporciones de mezcla y mitigaría posibles contaminaciones.

Del análisis de la cadena de suministros realizado aplicado a la producción de bioqueroseno obtenido de aceite de coco y bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina se observó que en temas de logística ambos tienen ciertas complicaciones en conseguirse como materia prima, en el caso del aceite de coco la dificultad está en los precios fluctuantes que dependen de la calidad de esta, además que es un producto no tan común en Guatemala. Respecto al aceite usado de cocina la dificultad es que no es fácil conseguirlo tratado por lo que si se consiguiera en grandes volúmenes estos pasarían por un proceso de lavado y remoción de contaminantes. Lo que se obtuvo del análisis de la cadena de suministros fueron los costos, en este caso se realizó un estudio en un estado de resultados, donde se realizó una simulación para el año 2025, se determinó que el margen neto después de gastos fue de 24.13 %, donde

se comparó con el margen de utilidad de rentabilidad del mercado el cual oscila entre 20 % y el 25 % (HEXN, 2024), rango en el que el margen determinado es aceptable. A partir de los datos obtenidos en el análisis y comparando que al hacer bioqueroseno con las ventas pronosticadas se concluye que económicamente es viable la producción. La materia prima más barata no fue determinada debido a que tanto el aceite de coco como el aceite usado de cocina compensan sus costos debido a la forma en cómo se consiguen. Por un lado, el aceite de coco tiene precios altos, aunque ya purificado, y, por el otro lado, el aceite usado de cocina compensa sus costos con el tratamiento que se le realiza. Se determinó que la materia prima a seleccionar fue el aceite usado de cocina ya que el rendimiento es similar al bioqueroseno obtenido de aceite de coco, pero presenta mejores características fisicoquímicas que dan mejores resultados en la combustión como combustible de aviación esto se puede observar en los resultados obtenidos de las mezclas realizadas.

## VIII. Conclusiones

- De acuerdo con las propiedades físicas evaluadas, las variables del proceso y la eficiencia, el aceite usado de cocina presenta una mejor factibilidad técnica para la producción de bioqueroseno.
- El poder calorífico, la densidad y el color del bioqueroseno obtenido de aceite de coco fueron de 35,990.00 kJ/kg, 870 kg/m<sup>3</sup> y blanco transparente, respectivamente.
- El poder calorífico, la densidad y el color del bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina fueron de 36,088.67 kJ/kg, 890 kg/m<sup>3</sup> y amarillo transparente, respectivamente.
- La mezcla entre bioqueroseno obtenido de aceite de coco y queroseno de petróleo tuvo un punto de congelación de -11, -8 y -5 °C para las mezclas de 5 %, 10 % y 20 %, respectivamente, con poderes caloríficos de 41,216.33, 41,861.67 y 40,780.67, densidades de 803.00, 808.00 y 814.00 kg/m<sup>3</sup>, pH's de 7.28, 7.41, 7.26 y con colores blancos transparentes, respectivamente.
- La mezcla entre bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina y queroseno de petróleo tuvo un punto de congelación de -11, -8 y -7 °C para las mezclas de 5 %, 10 % y 20 %, respectivamente, con poderes caloríficos de 43,182.00, 42,555.67 y 42,430.00, densidades de 812.00, 818.00, 820.00 kg/m<sup>3</sup>, pH's de 7.34, 7.18 y 7.20 con colores amarillos transparentes, respectivamente.
- A través del análisis de cadena de suministros, la materia prima fácil de obtener mas no barata es el aceite usado de cocina y que al realizar una simulación de ventas considerando los costos necesarios se tiene un margen de utilidad de 24.13 % el cual es rentable en el mercado comparado con las referencias.

## **IX. Recomendaciones**

- Realizar una curva de equilibrio en el sistema de destilación al vacío para posibles diseños de columnas de destilación con adaptación a vacío.
- Considerar la destilación multicomponentes en cálculos de equilibrio para determinar que componentes salen a diferentes puntos de ebullición para la separación.
- Realizar una simulación de la columna de destilación, adaptada a un sistema de vacío para determinar condiciones óptimas de presión, temperatura de ebullición, rendimiento, etc.
- Realizar el mismo análisis con diferentes materias primas y fuentes de aceite vegetal, para identificar la materia prima que mejora la factibilidad técnica y comercial del proceso.
- Redestilar el bioqueroseno, y evaluar el poder calorífico para observar si este aumenta, esto para que se pueda aumentar las mezclas con queroseno de petróleo.
- Hacer pruebas de combustión en una turbina de aviación con las mezclas obtenidas de bioqueroseno y queroseno de petróleo y evaluar las características que esta presenta.
- Realizar una simulación de Montecarlo para encontrar el valor presente neto en 10 años evaluando la viabilidad financiera y usar el resultado como un nuevo parámetro evaluado a cierto tiempo.
- Caracterizar las materias primas tanto el aceite usado de cocina como el aceite de coco, implementar procesos de purificación si la materia prima lo amerita.
- Caracterizar el queroseno se petróleo que se va a usar o asegurarse que se esté usando Jet Fuel – A1.
- Implementar el proceso de hidrotatamiento y craqueo catalítico posterior a la destilación al vacío, esta para remover los átomos de oxígeno, nitrógeno y otros elementos presentes en la estructura del bioqueroseno producido que podrían afectar las propiedades fisicoquímicas.

## X. Referencias

- ASTM. (2009). Standard specification for aviation turbine fuels. Standard ASTM D1655-9a. West Conshohocken, Pennsylvania.
- Capaz, R. S., Guida, E., Seabra, J. E., Osseweijer, P., & Posada, J. A. (2020). Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 502-524. doi:<https://doi.org/10.1002/bbb.2168>
- Coburn, A., Heyne, J., & Yang, Z. (2020). Determination of a Freeze Point Blending Rule for Jet Fuel Range Hydrocarbons. *University of Dayton*.
- de Jong, S., Hoefnagels, R., Faaji, A., Slade, R., Mawhood, R., & Junginger, M. (2015). The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels – a comprehensive techno-economic comparison. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 778-800. doi:<https://doi.org/10.1002/bbb.1613>
- Dening, A., Kuhn, M., Tassoti, S., Thiessenhusen, A., Gilch, S., Bülter, T., . . . Faber, K. (2015). Oxidative Decarboxylation of Short-Chain Fatty Acids to 1-Alkenes. *Angewandte Chemie International Edition*, 8819-8822. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.201502925>
- EE. (2024). *Propiedades físicas y químicas de la materia*. Obtenido de Ejemplos.co.
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F., Lira-Flores, J. d., & Hernández, S. (2017). A review on the production processes of renewable jet fuel. (R. & Reviews, Ed.) *ELSEIVER*, 709-729. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108>
- Gutiérrez-Antonio, C., Gómez-Castro, F., Lira-Flores, J. d., & Hernández, S. (2017). A review on the production processes of renewable jet fuel. *ELSEIVER-locate/RSER*, 709-729. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.108>
- HEXN. (12 de 7 de 2024). *HEXH*. Obtenido de Comprender los márgenes de beneficio del petróleo y el gas: <https://hexn.io/es/blog/comprender-los-m%C3%A1rgenes-de-beneficio-del-petr%C3%B3leo-y-el-gas-1086>
- Huazheng. (20 de Nov de 2021). *¿Cuál Es El Punto De Enturbiamiento, El Punto De Congelación, El Punto De Fluidéz?* Obtenido de [es.transformer-tester.com](https://es.transformer-tester.com/info/what-is-the-cloud-point-freezing-point-pour-64046866.html): <https://es.transformer-tester.com/info/what-is-the-cloud-point-freezing-point-pour-64046866.html>
- IICA. (2017). *Cadena de producción sustentable de Bioqueroseno vinculada a los territorios rurales en América Latina y el Caribe*. América Latina y el Caribe: OLADE.

- Jiang, Y., Li, Z., Zheng, S., Xu, H., J.Zhou, Y., Gao, Z., . . . Li, S. (2020). Establishing an enzyme cascade for one-pot production of  $\alpha$ -olefns from low-cost triglycerides and oils without exogenous H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> addition. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s13068-020-01684-1>
- Lee, K., Lee, M.-E., Kim, J.-K., Shin, B., & Choi, M. (2019). Single-step hydroconversion of triglycerides into biojet fuel using CO-tolerant PtRe catalyst supported on USY. *Journal of Catalysis*(379), 180-190. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jcat.2019.09.043>
- Lifeder. (2024). *Cadena de suministro*. Obtenido de Lifeder: <https://www.lifeder.com/cadena-de-suministro/>
- Llamas L., A. (2015). *BIODIESEL AND BIOKEROSENES: PRODUCTION, CHARACTERIZATION, SOOT & PAH EMISSIONS*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Llamas, A., García-Martínez, M.-J., Al-Lal, A.-M., Canoira, L., & Lapuerta, M. (2012). Biokerosene from coconut and palm kernel oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene. *ELSEIVER-locate/FUEL*, 483-490.
- Mejía Parra, C. I. (2012). *Diseño de una Columna de Destilación a Vacío para Separar Biodiesel (FAME's) con Vistas a la Producción de Bioqueroseno para Aviación*. . Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- MEM, M. d. (25 de Noviembre de 2008). ACUERDO MINISTERIAL NÚMERO 265-2008 . *LEY DE COMERCIALIZACIÓN DE HIDROCARBUROS*. Guatemala.
- Monteiro, R. R., Santos, I. A., Arcanjo, M. R., Célio L. Calvalcante, F. M., Fernandez-Lafuente, R., & Vieira., & R. (2022). Production of Jet Biofuels by Catalytic Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids: A Review. *Catalysts-MDPI*, 12, 237. doi:<https://doi.org/10.3390/catal12020237>
- Neuling, U., & Kaltchmitt, M. (2014). Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 367-385. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s13399-014-0154-2>
- Pardal, A. (2012). *Obtención de biodiésel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis*. España: Facultad de Ciencias, Universidad de Extremadura. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12207/738>
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., & Engel, & R. (2011). *A SMALL-SCALE APROACH TO Organic Laboratory Techniques* (Third Edition ed.). Canada: CENGAGE Learning.

- PIN, P. C. (21 de Jun de 2017). *Freezing Point Determination of Avgas and Jet Fuel*. Obtenido de Petro-Online.com: <https://www.petro-online.com/news/measurement-and-testing/14/pac-lp/freezing-point-determination-of-avgas-and-jet-fuel/42965>
- Sanaguano S., H., Bayas M., F., & Cabrera C., C. (2019). Componentes presentes en el aceite de fritura usado y determinantes previos a su conversión en biodiesel. *Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM*, 22(44), 33-38. doi:<http://dx.doi.org/10.15381/iigeo.v22i44.17283>
- Silva, L. N., Cardoso, C. C., & Pasa, V. M. (2016). Synthesis and characterization of esters from different alcohols using Macauba almond oil to substitute diesel oil and jet fuel. *FUEL*, 166, 453-460. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.070>
- Stern, N. (2006). (Stern Review on the Economics of Climate Change. 700.
- UV-Mx. (2022). *Universidad Veracruzana*. Obtenido de Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (GC/MS): <https://www.uv.mx/sara/equipamiento/gcms/>
- Valencia, E., Valenzuela, E., Nuñez, P., & Barrera, D. (2002). Estudio de algunas características fisicoquímicas de algunos aceites comerciales sometidos a procesos intermitentes de frituras de papas. *Información Tecnológica*, 13(4), 19-24. Obtenido de <http://bit.ly/2QpqrFk>
- Yang, J., Xin, Z., He, Q., Corcadden, K., & Niu, H. (2019). An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. *FUEL*, 916-936. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.079>

## XI. Anexos

### Datos obtenidos

**Cuadro 12.** Propiedades fisicoquímicas del bioqueroseno de aceite usado de cocina y aceite de coco

Propiedad fisicoquímica	Estadísticas	Bioqueroseno de aceite de coco	Bioqueroseno de aceite usado de cocina
Poder Calorífico (kJ/kg)	Promedio	35,990.00	36,088.67
	Desviación estándar	48.91	5.72
	Coefficiente de variación	0.0014	0.0002
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio	866.05	888.60
	Desviación estándar	0.001	0.001
	Coefficiente de variación	0.001	0.001
pH	Promedio	7.40	7.57
	Desviación estándar	0.28	0.11
	Coefficiente de variación	0.04	0.01

El cuadro anterior muestra la caracterización del destilado ligero de biodiésel a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco. Las condiciones de operación fueron presión de 125 torr y una temperatura de ebullición de 252 °C, para ambos tipos de biodiésel.

**Cuadro 13.** Comparación del poder calorífico de las distintas mezclas de queroseno comercial con los destilados ligeros de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco

	% (v/v) de bioqueroseno en la mezcla	Promedio (kJ/kg)	Desviación estándar (kJ/kg)	Coefficiente de variación
Bioqueroseno Aceite de coco	5%	41216.33	23.70	0.0006
	10%	41861.67	23.70	0.0006
	20%	40780.67	23.70	0.0006
Bioqueroseno Aceite usado de cocina	5%	43182.00	5.72	0.0001
	10%	42555.67	5.72	0.0001
	20%	42430.00	5.72	0.0001

El cuadro anterior muestra el poder calorífico y las estadísticas para las diferentes mezclas % (v/v) de queroseno comercial con el destilado ligero de biodiésel a partir de aceite usado

de cocina y aceite de coco, las mezclas fueron consultadas según (Llamas L., 2015). El poder calorífico mínimo requerido es de 42,800.00 kJ/kg ASTM D-4529, D-3338, D-4809.

**Cuadro 14.** Densidad y pH de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco

Materia prima del bioqueroseno	Parámetro	Densidad			pH		
		Promedio (kg/m <sup>3</sup> )	Desviación estándar (kg/m <sup>3</sup> )	Coficiente de variación	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación
Bioqueroseno aceite de coco	5%	803	0.00012	0.00015	7.28	0.161	0.02211
	10%	808	0.00105	0.00130	7.41	0.361	0.04880
	20%	814	0.00010	0.00012	7.26	0.194	0.02673
Bioqueroseno aceite usado de cocina	5%	812	0.00042	0.00053	7.34	0.219	0.02988
	10%	818	0.00521	0.00645	7.18	0.064	0.00896
	20%	820	0.00282	0.00346	7.20	0.078	0.01085

En el cuadro anterior se muestra la densidad y el pH de las mezclas realizadas entre el destilado de biodiésel a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco con queroseno de petróleo, la proporción de las mezclas fueron consultadas según (Llamas L., 2015). El rango de densidad permitido es 775 a 840 kg/m<sup>3</sup> ASTM D-1298 o D-4052

**Cuadro 15.** Punto de congelación de las mezclas entre destilado ligero de transesterificación de aceite usado de cocina y aceite de coco

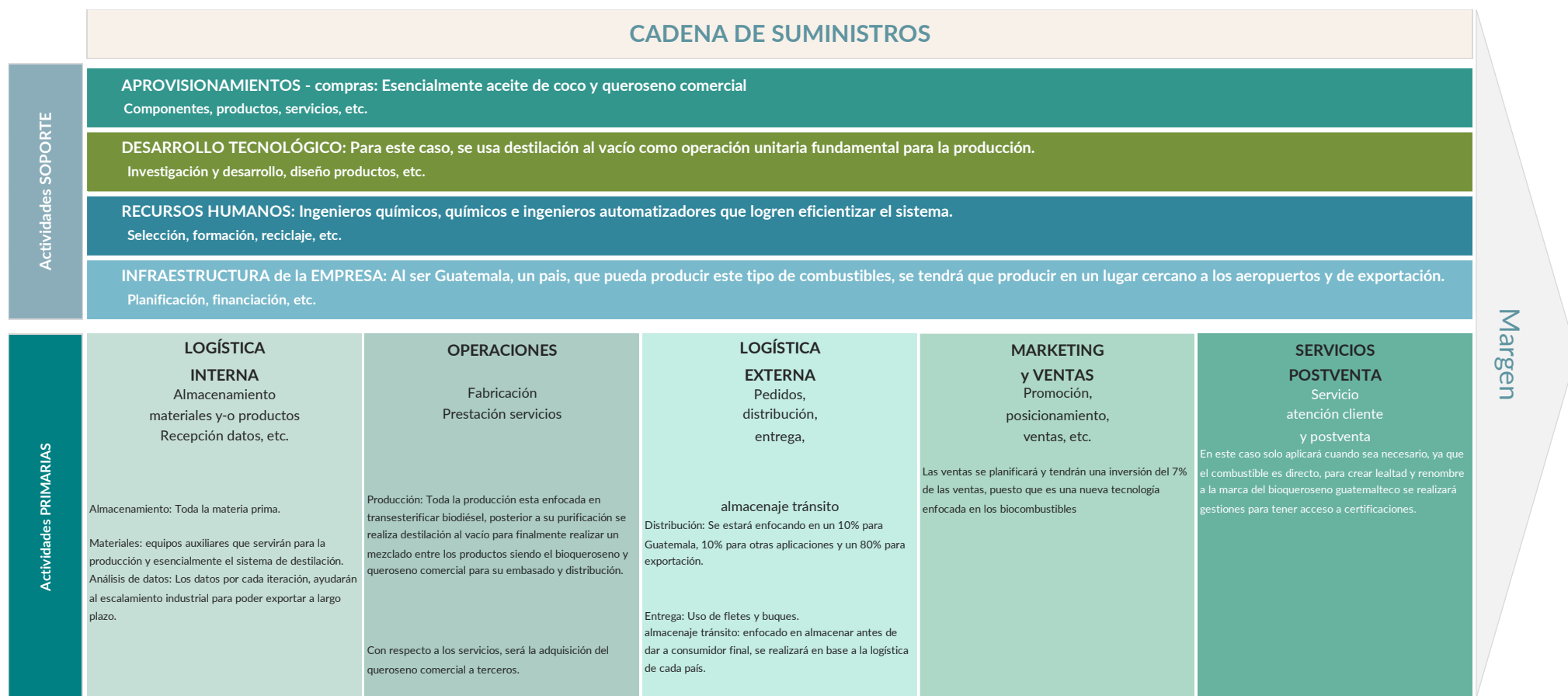
Materia prima del bioqueroseno	% (v/v) de bioqueroseno en la mezcla	Punto de congelación (°C)
Bioqueroseno aceite de coco	5%	-11
	10%	-8
	20%	-5
Bioqueroseno aceite usado de cocina	5%	-11
	10%	-8
	20%	-7

En el cuadro anterior se muestra el punto de congelación de las mezclas realizadas entre el destilado de biodiésel a partir de aceite usado de cocina y aceite de coco con queroseno de petróleo, la proporción de las mezclas fueron consultadas según (Llamas L., 2015). Evaluado para alturas de vuelo de -4 y -12 °C. Estos resultados fueron realizados por OIL TEST INTERNACIONAL DE GUATEMALA, S.A, AMSPEC.

**Cuadro 16.** Simulación de libro de Estado de Resultados del bioqueroseno seleccionado (bioqueroseno aceite usado de cocina)

CANTIDAD DE BODEGAS, SALA DE VENTAS Y BARRILES VENDIDOS	2025											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Bodegas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sala de ventas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Barriles vendidos	100	137	146	160	190	200	238	270	294	350	389	430
<b>INGRESOS</b>												
4001 Ingresos por ventas	Q499,742	Q684,646	Q729,623	Q799,587	Q949,509	Q999,484	Q1,189,385	Q1,349,303	Q1,469,241	Q1,749,096	Q1,943,996	Q2,148,890
4111 Devoluciones y bonificaciones sobre ventas	-Q2,499	-Q3,423	-Q3,648	-Q3,998	-Q4,748	-Q4,997	-Q5,947	-Q6,747	-Q7,346	-Q8,745	-Q9,720	-Q10,744
4112 Descuentos sobre ventas	-Q4,997	-Q6,846	-Q7,296	-Q7,996	-Q9,495	-Q9,995	-Q11,894	-Q13,493	-Q14,692	-Q17,491	-Q19,440	-Q21,489
<b>Ingresos netos</b>	Q492,246	Q674,377	Q718,679	Q787,593	Q935,267	Q984,491	Q1,171,545	Q1,329,063	Q1,447,202	Q1,722,860	Q1,914,836	Q2,116,656
<b>COSTO DE VENTA</b>												
5001 Costo de los bienes vendidos	Q243,133	Q333,092	Q354,974	Q389,012	Q461,952	Q486,265	Q578,656	Q656,458	Q714,810	Q850,965	Q945,786	Q1,045,471
<b>Utilidad bruta</b>	<b>Q249,113</b>	<b>Q341,285</b>	<b>Q363,705</b>	<b>Q398,581</b>	<b>Q473,315</b>	<b>Q498,226</b>	<b>Q592,889</b>	<b>Q672,605</b>	<b>Q732,392</b>	<b>Q871,895</b>	<b>Q969,049</b>	<b>Q1,071,186</b>
<b>Margen variable</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>	<b>49.85%</b>
<b>GASTOS</b>												
Gastos operativos												
5100 Gastos por salarios	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,060	Q6,120	Q6,120	Q6,120	Q6,120	Q6,120	Q6,180
5200 Gastos por suministros	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100	Q100
5301 Gastos por servicios generales	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350	Q350
5302 Gastos de internet y teléfono	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200	Q200
5400 Gastos por alquiler	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000	Q5,000
5500 Gastos por depreciación	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033	Q1,033
5600 Gastos de publicidad y mercadeo	Q1,000	Q0	Q0	Q1,000	Q0	Q0	Q1,000	Q0	Q0	Q1,000	Q0	Q0
<b>Total gastos operativos</b>	<b>Q13,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q13,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q12,743</b>	<b>Q13,803</b>	<b>Q12,803</b>	<b>Q12,803</b>	<b>Q13,803</b>	<b>Q12,803</b>	<b>Q12,863</b>
<b>Utilidad operativa</b>	<b>Q235,370</b>	<b>Q328,542</b>	<b>Q350,962</b>	<b>Q384,837</b>	<b>Q460,571</b>	<b>Q485,483</b>	<b>Q579,086</b>	<b>Q659,802</b>	<b>Q719,589</b>	<b>Q858,092</b>	<b>Q956,246</b>	<b>Q1,058,322</b>
Otros ingresos y gastos												
5800 Gastos por intereses	Q124,935	Q171,162	Q182,406	Q199,897	Q237,377	Q249,871	Q297,346	Q337,326	Q367,310	Q437,274	Q485,999	Q537,222
<b>Utilidad neta</b>	<b>Q110,434</b>	<b>Q157,380</b>	<b>Q168,556</b>	<b>Q184,941</b>	<b>Q223,194</b>	<b>Q235,612</b>	<b>Q281,739</b>	<b>Q322,476</b>	<b>Q352,279</b>	<b>Q420,818</b>	<b>Q470,247</b>	<b>Q521,100</b>
<b>Margen de utilidad</b>	<b>22.43%</b>	<b>23.34%</b>	<b>23.45%</b>	<b>23.48%</b>	<b>23.86%</b>	<b>23.93%</b>	<b>24.05%</b>	<b>24.26%</b>	<b>24.34%</b>	<b>24.43%</b>	<b>24.56%</b>	<b>24.62%</b>
Utilidad neta anual 2025	Q3,448,776											
Ingresos netos anuales 2025	Q14,294,814											
Margen de utilidad 2025	<b>24.13%</b>											

Figura 34. Cadena de suministros para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceites



. Fuente: Elaborador en Excel, 2024.

## Cálculos de muestra

**Cálculo 1.** Determinación de la densidad del bioqueroseno.

**Ecuación 1.** Cálculo de la densidad de la muestra.

$$\rho_{agua} \left( \frac{g}{mL} \right) = \frac{m}{v}$$

Calcular el volumen del picnómetro

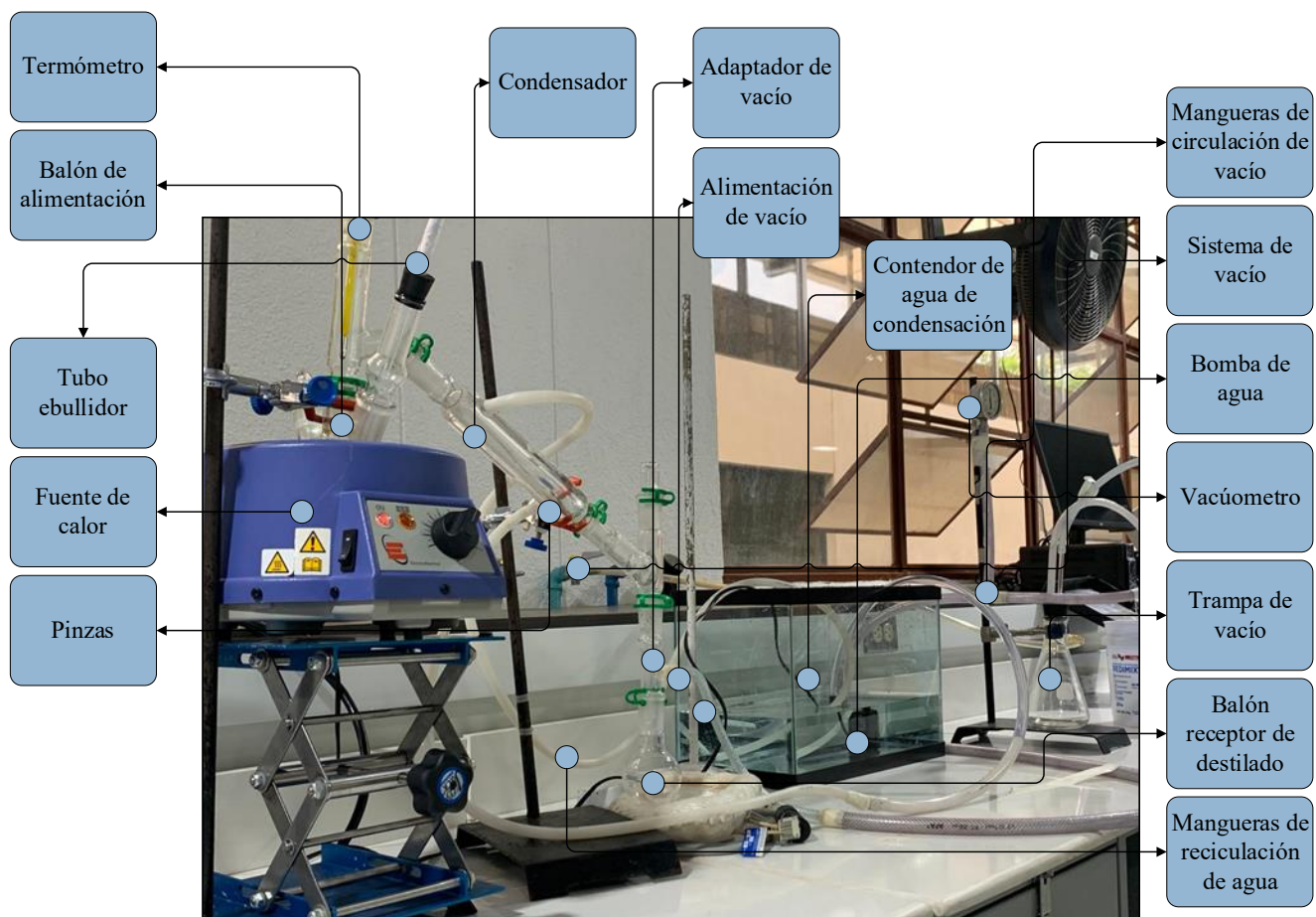
$$V_{pic} = \frac{m_{agua}}{\rho_{agua}}$$

Colocar una muestra de bioqueroseno dentro del picnómetro y pesar.

Calcular la densidad

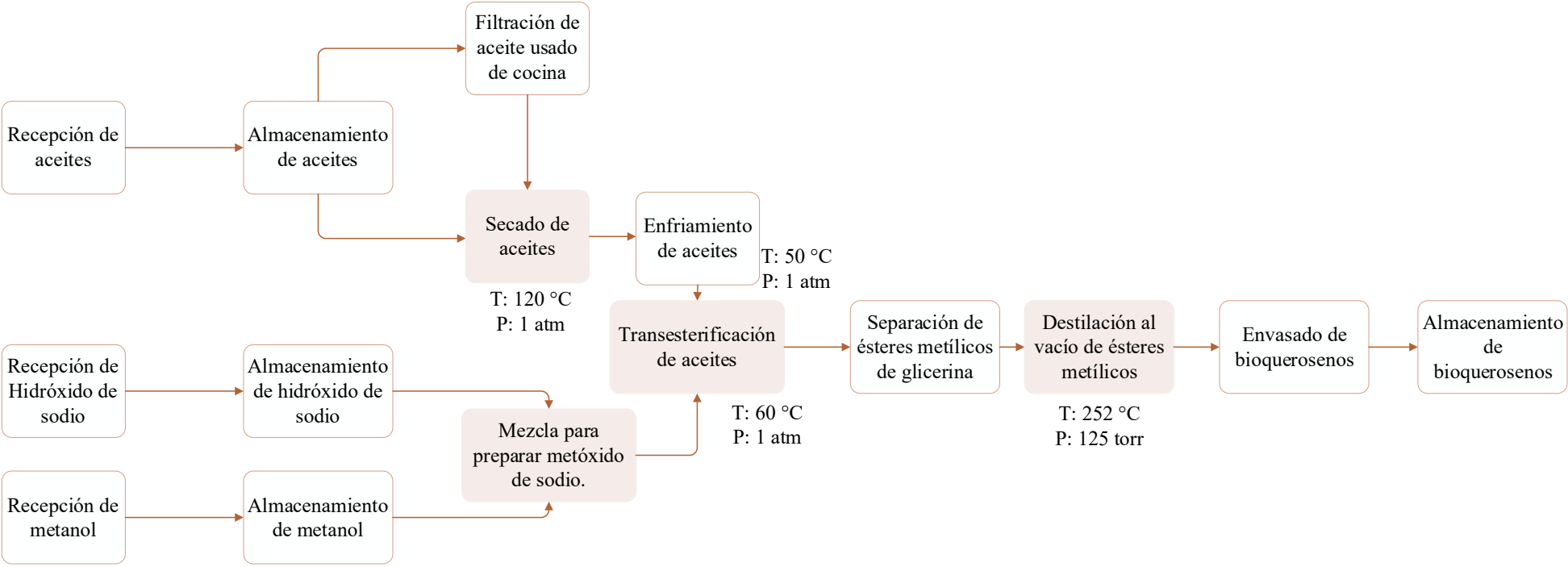
$$\rho_{bioqueroseno} = \frac{m_{bioqueroseno}}{V_{picnómetro}}$$

Figura 35. Diagrama de partes del sistema de destilación al vacío para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite



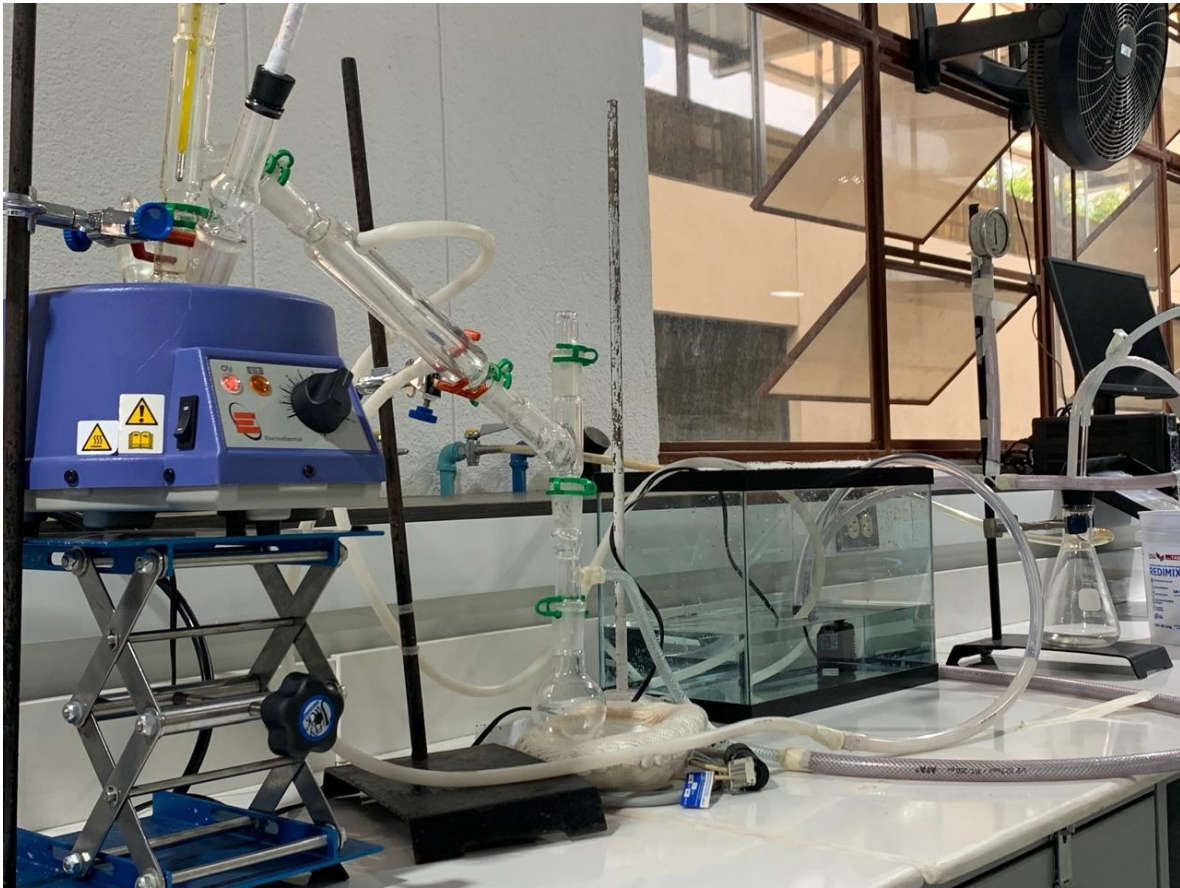
Fuente: Elaborado en Visio, 2024.

Figura 36. Diagrama de bloques de la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite



Fuente: Elaborado en Visio, 2024.

Figura 37. Sistema de destilación al vacío para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite



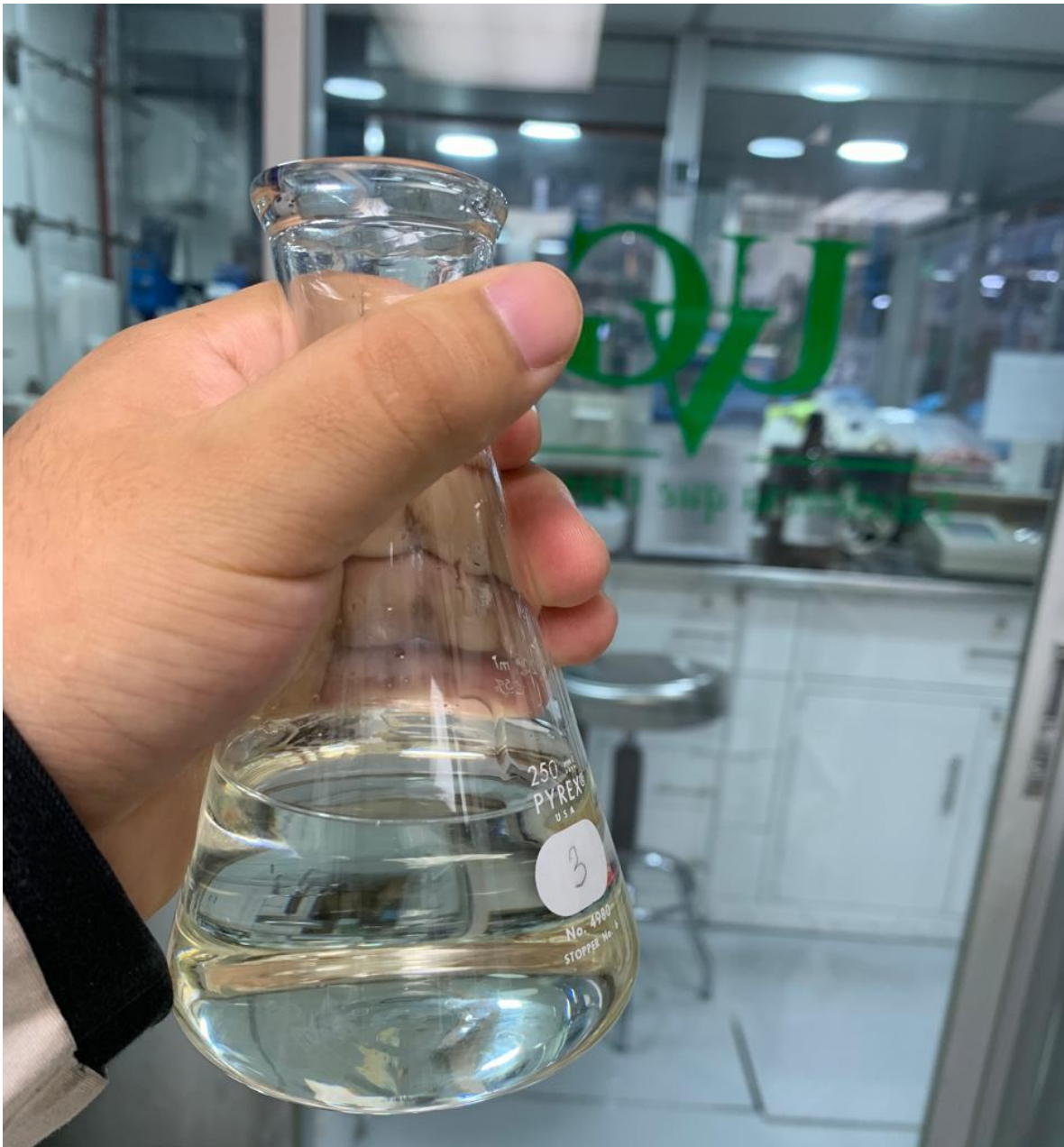
Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, julio 2024.

Figura 38. Balón de alimentación y tubo ebullidor importante en la regulación de la succión en un sistema de destilación al vacío para la producción de bioqueroseno obtenido de diferentes tipos de aceite



Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, julio 2024.

Figura 39. Bioqueroseno obtenido de aceite de coco



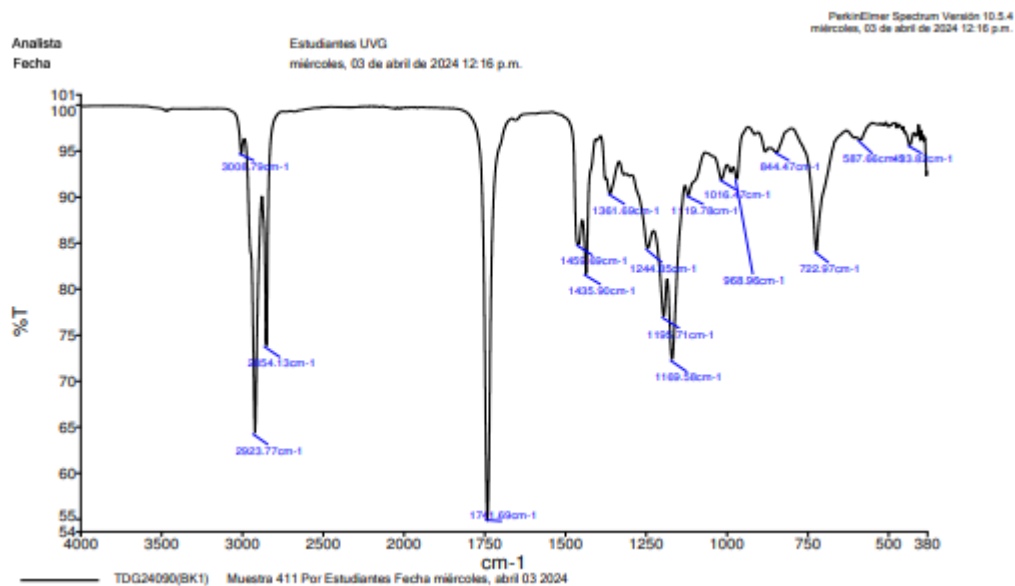
Fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, julio 2024.

Figura 40. Bioqueroseno obtenido de aceite usado de cocina



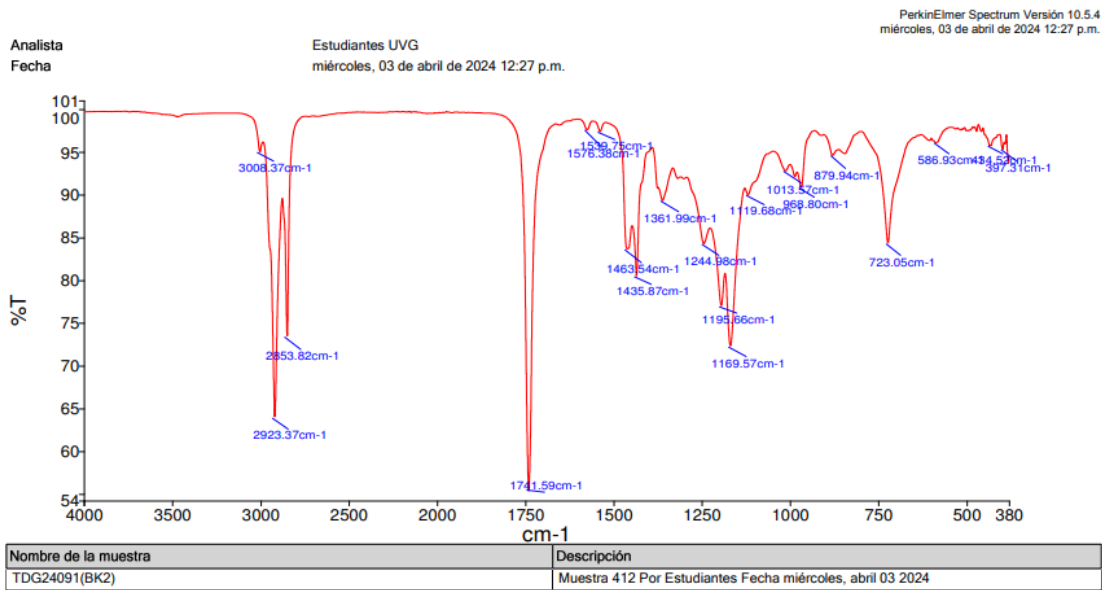
Fuente: Fotografía tomada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, julio 2024.

Figura 41. Espectro IR de la fracción ligera de biodiésel obtenido de aceite usado de cocina. Grupos funcionales: cetona: 1750 nm, alcano: 3000 a 3500 nm , anhídrido: 1500 a 500 nm



Fuente: FTIR-Perkin Elmer UVG, 2024. Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 42. Espectro IR de la fracción pesada de biodiésel obtenido de aceite usado de cocina. Grupos funcionales: cetona: 1750 nm, alcano: 3000 a 3500 nm, anhídrido: 1500 a 500 nm



Fuente FTIR-Perkin Elmer UVG, 2024. Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 43. Espectro IR de la fracción ligera de biodiésel obtenido de aceite de coco.  
Grupos funcionales: cetona: 1750 nm, alcano: 3000 a 3500 nm, presencia de alquenos: 3000 nm, anhídrido: 1500 a 500 nm.

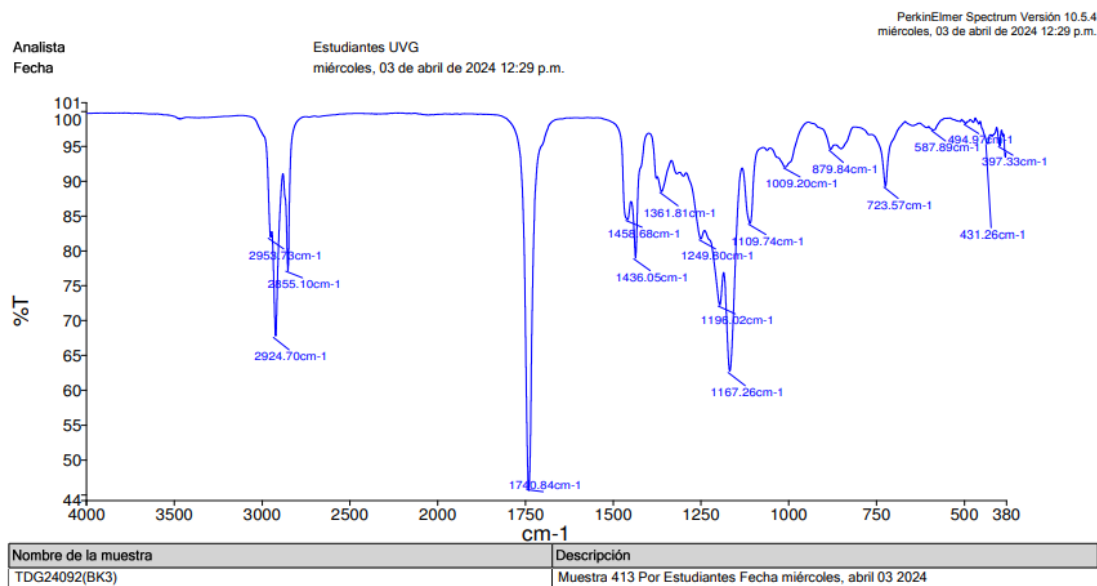
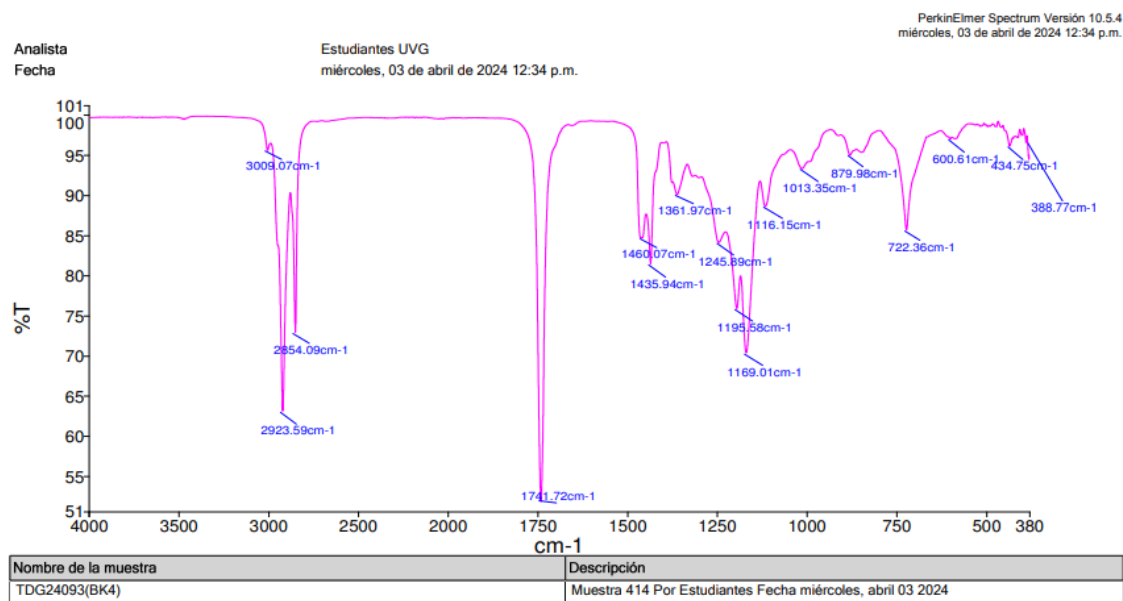


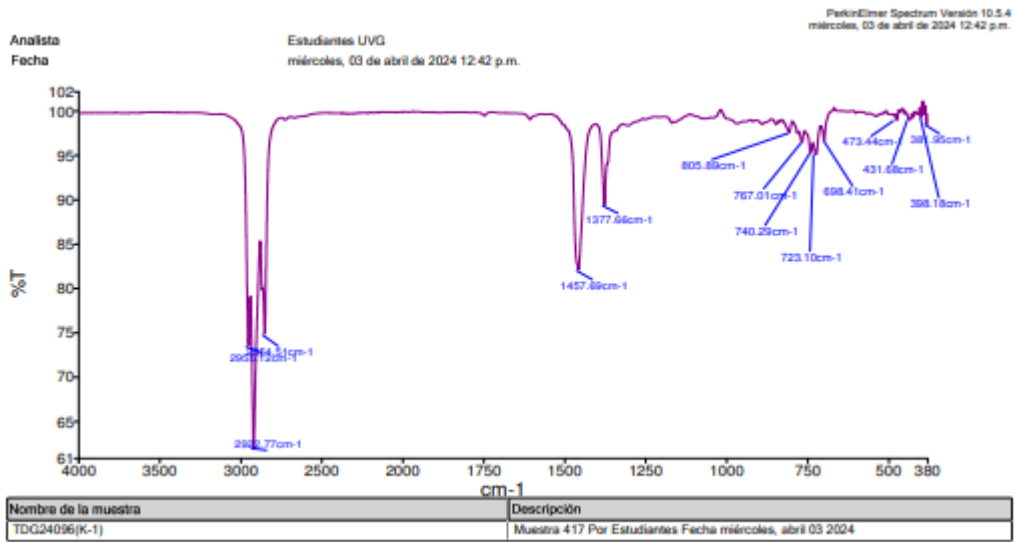
Figura 44. Fuente FTIR-Perkin Elmer UVG, 2024. Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

Espectro IR de la fracción pesada de biodiésel obtenido de aceite de coco Grupos funcionales: cetona: 1750 nm, alcano: 3000 a 3500 nm, presencia de alquenos: 3000 nm, anhídrido: 1500 a 500 nm.



Fuente FTIR-Perkin Elmer UVG, 2024. Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 45. Espectro IR de queroseno comercial obtenido de la destilación de petróleo Grupos funcionales: alcano: 3000 a 3500 nm, presencia de alquenos: 3000 nm..



Fuente FTIR-Perkin Elmer UVG, 2024. Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad del Valle de Guatemala.

## XII. Glosario

- **Propiedades fisicoquímicas:** proporcionan información útil para determinar ciertos aspectos de la peligrosidad, condiciones de almacenamiento y manipulación, así como predecir el comportamiento en distintos estadios ambientales. Las propiedades fisicoquímicas son características que distinguen una sustancia de otra se llaman propiedades. Una propiedad física es una característica de la materia que no está asociada a un cambio en su composición química, algunos ejemplos son el color, la densidad, la dureza, etc. Además, nos informan sobre el comportamiento del material ante diferentes acciones externas, como el calentamiento, las deformaciones o el ataque de productos químicos. Estas propiedades son debidas a la estructura microscópica del material; es la configuración electrónica de un átomo la que determina los tipos de enlaces atómicos y son estos los que contribuyen a forjar las propiedades de cada material (EE, 2024).
- **Color:** es el aspecto de las cosas que es causado por diferentes cualidades de la luz mientras es reflejada o emitida por ellas.
- **pH:** propiedad física que sirve para medir la acidez de una sustancia o disolución (EE, 2024).
- **Densidad:** es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos.
- **Poder calorífico:** cantidad de energía que se desprende al producirse una reacción de combustión (EE, 2024).
- **Punto de congelación:** es la temperatura a la cual un líquido se transforma en sólido (EE, 2024).
- **FTIR:** hace referencia a las siglas de Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier, método que se usa para determinar grupos funcionales en sustancias desconocidas sin determinar la estructura molecular de la muestra.
- **GC-MS:** la cromatografía de gases acoplada a Espectrometría de Masas (por sus siglas en inglés) es una técnica analítica dedicada a la separación, identificación y cuantificación de mezclas de sustancias volátiles y semivolátiles. La separación de dichas sustancias depende de la diferente distribución de las sustancias estudiadas entre las fases móvil y estacionaria que conforman el sistema. Una vez separadas las sustancias son fragmentadas y analizadas en función de su patrón de fragmentación, el cual puede ser comparado con información contenida en una base de datos de espectros de masas para su identificación preliminar. La identificación definitiva, así como la cuantificación de cada sustancia debe hacerse mediante el empleo de sustancia de referencia. El Instituto de Química Aplicada cuenta con un cromatógrafo con detector de masas (UV-Mx, 2022).
- **Antropogénico:** es un término que hace referencia a los “efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales, sin influencia humana” (AEMET y OECC, 2018). Término ampliamente usado para referirse a aquello que procede del ser humano y que tiene efectos en la naturaleza, se refiere a los fenómenos de metabolismo industrial, como

las actividades extractivistas, productivas o de consumo, y que contaminan el medio ambiente.

- IATA: siglas en inglés 'International Air Transport Association' es la asociación comercial de las aerolíneas del mundo y representa a unas 330 aerolíneas que representan más del 80% del tráfico aéreo mundial.
- HEFA: es un proceso de producción de bioqueroseno, por sus siglas en inglés significa 'Hydroprocessed Esters and Fatty Acids'.
- VPN: el valor presente neto es el valor de los flujos de efectivo proyectados, descontados al presente. Es un método de modelado financiero utilizado por los contadores para la elaboración de presupuestos de capital y por analistas e inversores para evaluar la rentabilidad de las inversiones y proyectos propuestos.