

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Estudio cinético de secado de aceite reciclado de una empresa de  
alimentos para la producción de biodiésel

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Medelyne Belen Mero Benavides

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2022

## DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis padres y hermanos, quienes son el pilar fundamental de mi vida y me siguen apoyando en cada paso.

A mis amigos del club de debate, los que me brindaron las mejores experiencias de mi vida universitaria.

A los profesores que creyeron en mis capacidades y me brindaron oportunidades de aprendizaje.

En especial, a mis abuelos en el cielo y en la tierra, sin ellos nada hubiera sido posible.

## AGRADECIMIENTOS

Quedo agradecida con mis tutoras Diana Tinoco y Andrea Barcia, por su guía en cada etapa de este proyecto.

A cada ayudante académico que contribuyó en la experimentación de este trabajo.

Finalmente, a cada persona que sigue creyendo que alcanzaré cada meta que me proponga.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Medelyne Belen Mero Benavides doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Medelyne" with a stylized flourish below it.

---

**Medelyne Belen Mero Benavides**

## EVALUADORES

---

**Ing. Nadia Flores, M.Sc.**  
PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Ing. Andrea Barcia, M.Sc.**  
PROFESOR TUTOR

---

**Ing. Diana Tinoco, M.Sc.**  
PROFESOR COTUTOR

## RESUMEN

La alta demanda energética y la generación de desechos contaminantes en la industria alimenticia han incentivado el aprovechamiento de los residuos en forma de energía. El biodiésel a partir de aceite usado de frituras representa una alternativa para producir biocombustibles, cuyo principal obstáculo es el alto costo de producción debido a la materia prima. El presente estudio caracteriza un aceite usado de frituras para la producción de biodiésel y diseña sus curvas de secado en la etapa de pretratamiento para la disminución de sus costos operativos.

El proyecto presentó 4 etapas: la caracterización fisicoquímica del aceite, seguido por el estudio cinético de secado a temperaturas entre 60 °C a 115 °C, la evaluación de la factibilidad técnica de producción de biodiésel y un análisis económico del proceso.

El aceite presentó una acidez de 3.76 % y una humedad de 0.133%, llevando a cabo la producción de biodiésel por transesterificación directa y con una etapa de secado en el pretratamiento.

Se obtuvo que la cinética de secado se ajusta al modelo logarítmico, obteniendo que a 100 °C se genera un 30.92 % de ahorro en costos con respecto a 60 °C. Además, se determinó que la transesterificación directa por catálisis básica era viable, del que se obtuvo un rendimiento de 89.02% a 60 °C, con relación molar 6:1 de metanol-aceite y 1% de catalizador.

Se concluye que la temperatura adecuada para el secado es a 100 °C, permitiendo disminuir costos en el proceso de producción de biodiésel. Finalmente, la implementación de una planta con 200 kg/h de aceite usado resulta factible y rentable, garantizando la sustitución de los combustibles fósiles.

**Palabras claves:** cinética de secado, aceite usado, biodiésel, transesterificación

## ABSTRACT

The high energy demand and the generation of polluting waste in the food industry have encouraged the use of waste in the form of energy. Biodiesel from used frying oil represents an alternative to produce biofuels, whose main obstacle is its high production costs due to the raw material. The present study characterizes a used frying oil to produce biodiesel and designs its drying curves in the pretreatment stage to reduce its operating costs.

The project presented 4 stages: the physicochemical characterization of the oil, followed by the study of dryings kinetic at temperatures between 60 °C to 115 °C, and the evaluation of the technical feasibility of biodiesel production and economic analysis of the process.

The oil presented an acidity of 3.76% and moisture of 0.133%, carrying out the production of biodiesel by direct transesterification and with a drying stage in the pretreatment.

It was obtained that the drying kinetics fit the logarithmic model, obtaining that at 100 °C a cost saving of 30.92% is generated compared to 60 °C. In addition, it was determined that direct transesterification by base catalysis was feasible, from which a yield of 89.02% was obtained at 60 °C, with a 6:1 molar ratio of methanol: oil and 1% catalyst.

It is concluded that the adequate temperature for drying is at 100 °C, allowing the reduction of costs in the biodiesel production process. Finally, the implementation of the plant with 200 kg/h of used frying oil is feasible and profitable, guaranteeing the substitution of fossil fuels.

**Keywords:** drying kinetics, used oil, biodiesel, transesterification

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	II
ABSTRACT .....	III
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Justificación del problema.....	2
1.3. Objetivos .....	4
1.4. Marco teórico.....	4
CAPÍTULO 2.....	10
2. METODOLOGÍA .....	10
2.1. Caracterización de aceite usado de frituras .....	11
2.2. Producción de biodiésel.....	17
2.3. Caracterización y validación de biodiésel .....	20
2.4. Estudio cinético de secado .....	20
2.5. Análisis económico .....	23
CAPÍTULO 3.....	24
3. RESULTADOS .....	24

3.1. Resultados de caracterización de aceite.....	24
3.2. Resultados de producción de biodiésel.....	28
3.3. Estudio cinético de secado .....	32
3.4. Condiciones óptimas de secado .....	34
3.5. Análisis económico .....	37
CAPÍTULO 4.....	39
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	39
4.1. Conclusiones .....	39
4.2. Recomendaciones .....	40
BIBLIOGRAFÍA.....	41
APÉNDICES .....	48
APÉNDICE A: MODELADO MATEMÁTICO DE CURVAS DE SECADO .....	48
APÉNDICE B: TABLA DE UTILIDADES EN SECADO .....	50
APÉNDICE C: TABLA DE CORRIENTES.....	51
APÉNDICE D: FLUJO DE CAJA.....	52

## ABREVIATURAS

<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>cal</b>	Calculado
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficiente de determinación
<b>RMSE</b>	Error cuadrático medio
<b>exp</b>	Experimental
<b>KOH</b>	Hidróxido de potasio
<b>INEN</b>	Instituto Ecuatoriano de Normalización
<b>MeOH</b>	Metanol
<b>MeOK</b>	Metóxido de potasio
<b>M</b>	Millones
<b>SS</b>	Stainless steel
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno
<b>VAN</b>	Valor actual neto
<b>I<sub>2</sub></b>	Yodo

## SIMBOLOGÍA

<b>bh</b>	Base húmeda
<b>±</b>	Desviación típica
<b>m/m</b>	Fracción masa/masa
<b>v/v</b>	Fracción volumen/volumen
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>g</b>	Gramo
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>L</b>	Litros
<b>mg</b>	Miligramo
<b>MJ</b>	MegaJoules
<b>mL</b>	Mililitro
<b>mm<sup>2</sup></b>	Milímetro cuadrado
<b>N</b>	Número de datos
<b>s</b>	Segundos

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Etapas del desarrollo de proyecto .....	10
<b>Figura 2.2</b> Diagrama del proceso de frituras en empresa de alimentos .....	11
<b>Figura 2.3</b> Diagrama de flujo del proceso para producción de biodiésel .....	17
<b>Figura 3.1</b> Resultado de reacción de transesterificación .....	28
<b>Figura 3.2</b> Resultado durante los lavados con agua .....	29

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfica 3.1</b> Curvas de secado a diferentes temperaturas .....	33
<b>Gráfica 3.2</b> Humedad final en el secado a diferentes temperaturas.....	35
<b>Gráfica 3.3</b> Costos a) operativos y b) energéticos del secado a diferentes temperaturas.....	36
<b>Gráfica 3.4</b> Análisis de flujo de caja.....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Modelos comunes de secado.....	9
<b>Tabla 3.1</b> Caracterización fisicoquímica de aceite .....	24
<b>Tabla 3.2</b> Ácidos grasos en el aceite usado.....	27
<b>Tabla 3.3</b> Caracterización fisicoquímica de biodiésel.....	31
<b>Tabla 3.4</b> Especificaciones de equipos involucrados en el secador .....	37
<b>Tabla 3.5</b> Resultados de análisis económico .....	37
<b>Tabla A.1</b> Coeficientes $R^2$ y RMSE por modelo matemático .....	48
<b>Tabla A.2</b> Coeficientes para el modelo Logarítmico.....	49
<b>Tabla B.1</b> Consumo de utilidades en secado a diferentes temperaturas .....	50
<b>Tabla C.1</b> Tabla de corrientes del proceso .....	51
<b>Tabla D.1</b> Flujo de caja.....	52



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción del problema

La industria de frituras tiene como principal desecho al aceite gastado, un líquido oleaginoso de origen vegetal que durante la operación de fritura sufre una serie de reacciones químicas que lo hace no apto para el consumo humano (Hidalgo-Crespo et al., 2020). Esto representa una problemática para la industria local e internacional en áreas económicas y ambientales debido a las diferentes alternativas de desechos del aceite y sus implicaciones en la sostenibilidad del sector, ya que estos incluyen altos costos de tratamiento.

La industria de frituras destina fondos en gestores ambientales que se encargan de incinerar el residuo, emitiendo gases de efecto invernadero a la atmósfera (Tsai, 2019). Además, debido a derrames o presencia de aceite en tanques de almacenamiento, el aceite termina en el caudal de aguas residuales, lo que representa un aumento en los costos operativos de sus plantas de tratamiento de agua al afectar la fase de tratamiento biológico. Esto ocurre principalmente por el interés de la industria en mantener la calidad final del agua para dar cumplimiento a la legislación ambiental que rige en el país.

Pese a los esfuerzos, el aceite sigue encontrándose en cuerpos de agua como ríos, lagos y aguas subterráneas, en el que 1 litro de aceite gastado puede contaminar hasta 40.000 litros de agua (Hidalgo-Crespo et al., 2020). Así mismo, este residuo se localiza en vertederos, produciéndose altas concentraciones de metano en la atmósfera como principal gas de efecto invernadero (Karmee, 2016).

Esta generación de contaminantes al medio ambiente y la desventaja económica en el postratamiento del aceite residual representa un problema que parte de la ausencia de políticas orientadas a la reutilización del residuo en la industria. Esto

puede ser solucionado con la producción de biocombustibles a partir de fuentes renovables como lo es el biodiésel, que se caracteriza por ser limpio, seguro y no peligroso debido a su biodegradabilidad (Cordero-Ravelo & Schallenberg-Rodriguez, 2018).

## **1.2. Justificación del problema**

La demanda energética en la industria alimenticia representa el 50% de la demanda a nivel mundial (Canning et al., 2017), la cual la proveen los combustibles fósiles y cuya explotación contribuye al calentamiento global causada por la emisión de gases de efecto invernadero (Nelson-Smith, 1971). Por esta razón, se buscan alternativas basadas en el uso de energías renovables que disminuyan el impacto ambiental y fomenten políticas de economía circular basada en el aprovechamiento de los residuos (Slorach et al., 2019).

Anualmente se generan toneladas de aceite usado de frituras en Ecuador, siendo una sustancia con alto potencial de ser convertido en biocombustible y que puede satisfacer la demanda energética. Cada kilogramo de aceite usado puede producir entre 0.92 – 0.97 kg de biodiésel (Corral Bobadilla et al., 2017) y se caracteriza por ser más limpio y seguro comparado con los combustibles fósiles. Además, el uso de biodiésel a partir de aceite de frituras logra reducir en un 91% el CO<sub>2</sub> emitido, en comparación con las emisiones del combustible diésel, y de un 88% con respecto a todos los gases de efecto invernadero (Energy Environment and Technology Research Centre, 2006).

Los insostenibles hábitos alimenticios de la actualidad han aumentado la producción de alimentos y por ende los desechos siguen incrementando. Del mismo modo, se presenta una ineficiencia en la economía alimentaria en la que la industria ha perdido productividad y recursos, al asumir los costos en la gestión de los desechos. La economía circular ofrece la optimización de los sistemas orientada a la disminución del consumo de materias primas a la par con la disminución de descargas al medio ambiente (Jurgilevich et al., 2016).

Este proyecto busca contribuir con el objetivo 7 de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas que busca permitir el acceso a energías asequibles, seguras,

sostenibles y modernas. Del mismo modo, se busca cumplir con el objetivo 9 al objetivo de la ONU que asegura la promoción de la industrialización inclusiva y sostenible.

Estudios previos demuestran que la transesterificación a partir de aceite de fritura usado es posible y que cumple con la normativa vigente internacional que rigen al biodiésel.

Sarno & Juliano et al. (2019) en su estudio de producción de biodiésel a partir de aceite usado de oliva logra un rendimiento de 90% a una relación molar metanol/aceite de 6:1, 45 °C durante 24 horas por medio de una catálisis enzimática con nanopartículas de  $F_3O_4/Au$  (Sarno & Juliano, 2019). Corral Bobadilla et al. (2017) en su estudio propone una combinación óptima de las variables de entrada en la reacción de transesterificación siendo una relación molar de 6.52, 0.78% de catalizador, y 24.44 °C la que mejora la conversión a un 100% (Corral Bobadilla et al., 2017).

Las variaciones que sufre un aceite residual, como las impredecibles reacciones de degradación y contenido de humedad, hacen que sea necesaria una evaluación sistemática del aceite. Las plantas de producción de biodiésel deben tener flexibilidad para procesar los ácidos grasos libres tomando en cuenta las características del aceite, así como el ajuste de sus condiciones de operación (Dimian & Kiss, 2019). Uno de los mayores obstáculos en la comercialización del biodiésel son los costos de producción puesto que dependen principalmente de los precios de la materia prima, que llega a representar más del 80% del costo total de producción.

El secado es una operación unitaria de importancia en el pretratamiento del biodiésel ya que disminuye el contenido de agua proveniente de los alimentos, una etapa necesaria para favorecer la conversión del aceite a biocombustible. (Corral Bobadilla et al., 2017) demuestra que el rendimiento de producción de biodiésel baja de 87% a 75% cuando la humedad aumenta de 0% a 3%, manteniendo las mismas condiciones durante la reacción de transesterificación. Sin embargo, esta etapa

presenta muy alto consumo energético a escala industrial debido a que frecuentemente se usa vapor saturado como medio de calentamiento.

Por lo tanto, conocer la cinética de secado del aceite residual de frituras resulta fundamental ya que se asegura operar a los tiempos mínimos necesarios para alcanzar la humedad requerida en la reacción de transesterificación. Estas acciones se traducen en la disminución de los costos de producción del biodiésel, que hará que su implementación sea económicamente viable.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Diseñar las curvas de secado del aceite usado de frituras de una industria de alimentos mediante pruebas experimentales de laboratorio para la disminución de los costos del pretratamiento en la producción de biodiésel.

#### **1.3.2. Específicos**

1. Determinar las propiedades fisicoquímicas del aceite residual para la obtención de datos de entrada en la reacción de transesterificación.
2. Desarrollar pruebas experimentales de secado del aceite a diferentes temperaturas para la obtención de las condiciones más adecuadas en el pretratamiento.
3. Determinar experimentalmente la factibilidad técnica de producción de biodiésel mediante la caracterización y validación con la normativa legal.

### **1.4. Marco teórico**

#### **1.4.1. Biodiésel**

El biodiésel es un derivado de los aceites vegetales o grasas animales que está compuesto por ésteres de metilo o etilo de ácidos grasos libres, producidos por reacciones de transesterificación (Sahar et al., 2018a).

El biodiésel representa una fuente de energía renovable, biodegradable, libre de sulfuros y de grupos aromáticos, los cuales son compuestos

cancerígenos. Por esto, estudios revelan que pueden reemplazar el diésel en motores de combustión, alcanzando pequeñas variaciones con respecto al combustible convencional (Sahar et al., 2018a).

Otros métodos de obtención de biodiesel son la mezcla de aceites vegetales con diésel convencional, micro emulsiones de alcohol con aceite y pirólisis, sin embargo, la transesterificación es el proceso más usado para producirlo (Cordero-Ravelo & Schallenberg-Rodriguez, 2018).

La demanda de los aceites comestibles es alta para la producción de alimentos, por lo que los aceites usados ha resultado una alternativa viable para producir biodiésel al reducir los costos de materia prima (Sarno & Juliano, 2019).

#### **1.4.2. Producción de biodiésel**

- **Condiciones del aceite**

La principal materia prima para la producción de biodiésel es el aceite y debe cumplir con ciertas características para determinar la ruta de que debe tomar la síntesis.

El número de acidez es un parámetro importante ya que a valores mayores a 2 mg KOH/g, la transesterificación no es adecuada por tener mayor probabilidad de formar jabones durante la reacción (Soly et al., 2021). Esto hace necesaria una etapa de esterificación para la reducción de los ácidos grasos libres en presencia de un catalizador mineral ácido como HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (Sahar et al., 2018a).

- **Transesterificación**

La transesterificación representa una serie de reacciones que convierte los triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos en ácidos grasos libres, con la presencia de un alcohol de cadena corta y un catalizador (Dimian & Kiss, 2019).

La reacción general de transesterificación es:



La síntesis del biodiésel por transesterificación puede darse en presencia de un catalizador homogéneo, heterogéneo o enzimático. El catalizador alcalino es el comercialmente empleado por sus ventajas de reacción rápida y completa, a temperaturas y presiones bajas, resultando en menores costos de operación (Amigun, 2008).

Los principales factores que afectan la transesterificación son la dosis de catalizador, dosis de alcohol, temperatura de reacción, velocidad de agitación, tiempo de agitación, contenido de agua e impurezas, que afectan directamente el rendimiento de la producción de biodiésel (Corral Bobadilla et al., 2017).

#### **1.4.3. Caracterización fisicoquímica**

Las propiedades fisicoquímicas de los aceites vegetales usados determinan su factibilidad para producir biocombustibles, siendo la humedad el más importante para definir el consumo energético en el pretratamiento. Además, las mismas propiedades también sirven para determinar la calidad del biodiésel como reemplazo de combustibles fósiles. A continuación se presentan las principales propiedades que se analizan en aceites y biodiésel.

- **Índice de yodo:** Este parámetro representa el grado de insaturación del aceite, refiriéndose a los enlaces disponibles para la oxigenación de los ácidos grasos y ésteres. A mayor índice de yodo, mayores serán los enlaces adecuados para la generación de hidroperóxidos (Haizam et al., 2008).
- **Índice de saponificación:** Este mide la cantidad de KOH requerido para la saponificación de una cantidad de aceite. Además, está relacionado con el peso molecular de la muestra, si este disminuye también lo hará el índice de saponificación (Encinar et al., 2005).
- **Índice de peróxidos:** Mide el estado de oxidación de un aceite, un alto índice de peróxidos se refleja en el desencadenamiento de reacciones secundarias hasta la formación de polímeros de pesos moleculares altos.

Se recomienda un índice de peróxidos no mayor a 3 meq O<sub>2</sub> por kg de biodiésel (Tan et al., 2000).

- **Acidez:** La acidez representa la cantidad de hidróxido de potasio requerido para neutralizar los ácidos grasos presentes en un gramo de aceite. Si un aceite presenta alto grado de acidez, los ácidos grasos impulsarán la formación de jabones y desfavorecerá al rendimiento del biodiésel (Soly Peter et al., 2021).
- **Cenizas:** Las cenizas representan la materia incombustible que resulta después de la combustión completa de un aceite. Está compuesta por compuestos organometálicos y sales disueltas en agua que se encuentra en el combustible (Sarkar, 2015).
- **Punto de inflamación:** Es la temperatura mínima a la que un líquido forma vapores que al mezclarse con el aire son inflamables. Esto ocurre en presencia de una fuente de ignición y evalúa el riesgo de inflamabilidad del material, importante para la seguridad y transporte de combustibles (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013b).
- **Punto de nube:** Temperatura en la que un combustible se torna turbio debido a la formación de cristales al enfriarse en condiciones específicas (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2015).
- **Punto de escurrimiento:** Es la temperatura más baja a la que un combustible pierde ciertas aplicaciones ya que pierde fluidez (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2013a).
- **Densidad:** Masa por unidad de volumen a condiciones de 15 °C y 101.325 kPa (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2015). El aumento de la densidad en aceites está dado por la presencia de impurezas jabonosas y en el biodiésel debido al aumento de la temperatura de reacción y concentración de catalizador (Noor & Zakir, 2016).
- **Viscosidad cinemática:** Representa la resistencia del líquido al flujo e influye en el grado de precalentamiento que requiera en el manejo y transporte. Una alta viscosidad dificulta la operación de las bombas (Sarkar, 2015).

- **Poder calorífico:** Mide el contenido de energía que se recupera cuando una sustancia sufre combustión completa, ayudando a determinar la capacidad del biodiésel como alternativa del uso de diésel convencional (Sarkar, 2015).
- **Humedad:** Es el contenido de agua que se presente en aceites como humedad libre o en emulsión. No es deseable en combustibles ya que representa una interferencia durante la combustión. Una alta humedad reduce el poder calorífico del combustible, aumenta su consumo e incrementa el volumen de los gases de combustión. (Sarkar, 2015).

#### 1.4.4. Normativa de biodiésel

Las normas ASTM D6751 y EN 14214 establecen los requerimientos para los ésteres metílicos de ácidos grasos que se usan como combustible para motores de diésel al 100% de concentración o como diluyente de combustible para motores (British Standard Institution, 2010).

Estas normativas establecen rangos, límites máximos y mínimos que debe cumplir el biocombustible de acuerdo con parámetros fisicoquímicos.

#### 1.4.5. Cinética de secado

La cinética de secado de un material ofrece información sobre la velocidad de evaporación del agua (Foerster et al., 2016) mediante las curvas de cambio de humedad en el tiempo. Además, la tasa de humedad adimensional  $M_R$  se determina mediante la siguiente ecuación.

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

Donde  $M_t$  es el contenido de humedad en cualquier momento,  $M_e$  es el contenido de humedad de equilibrio y  $M_o$  es la humedad inicial. En comparación con  $M_t$  y  $M_o$ , la humedad de equilibrio tiende a ser muy pequeña y la ecuación para la tasa de humedad se puede expresar como  $M_R = \frac{M_t}{M_o}$ .

El modelado matemático representa una herramienta para la comprensión de los factores que afectan el secado del material, como la temperatura (Ghandi et al., 2013). Los modelos frecuentemente usados para describir el

secado de materiales, en términos de  $M_R$  y el tiempo, se presentan en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1** Modelos comunes de secado

Modelo	Ecuación	Referencia
Henderson y Pabis	$M_R = a e^{-kt}$	(Henderson, 1961)
Logarítmica	$M_R = a e^{-kt} + c$	(Togrul & Pehlivan, 2002)
Lewis	$M_R = e^{-kt}$	(Lewis, 1921)
Page	$M_R = a e^{-kt^n}$	(Page, 1998)
Midilli et al.	$M_R = a e^{-kt^n} + bt$	(Midilli et al., 2002)
Gaussiano de dos términos	$M_R = a_1 e^{-\left(\frac{t-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{t-b_2}{c_2}\right)^2}$	(Gómez et al., 2020)

Para evaluar la mejor aproximación del modelo con los datos experimentales se usa el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error cuadrático medio ( $RMSE$ ).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (M_{R-cal,i} - \overline{M_{R-exp,i}})^2}{\sum_{i=1}^N (M_{R-cal,i} - \overline{M_{R-exp,i}})^2}$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{R-exp,i} - M_{R-cal,i})^2 \right]^{1/2}$$

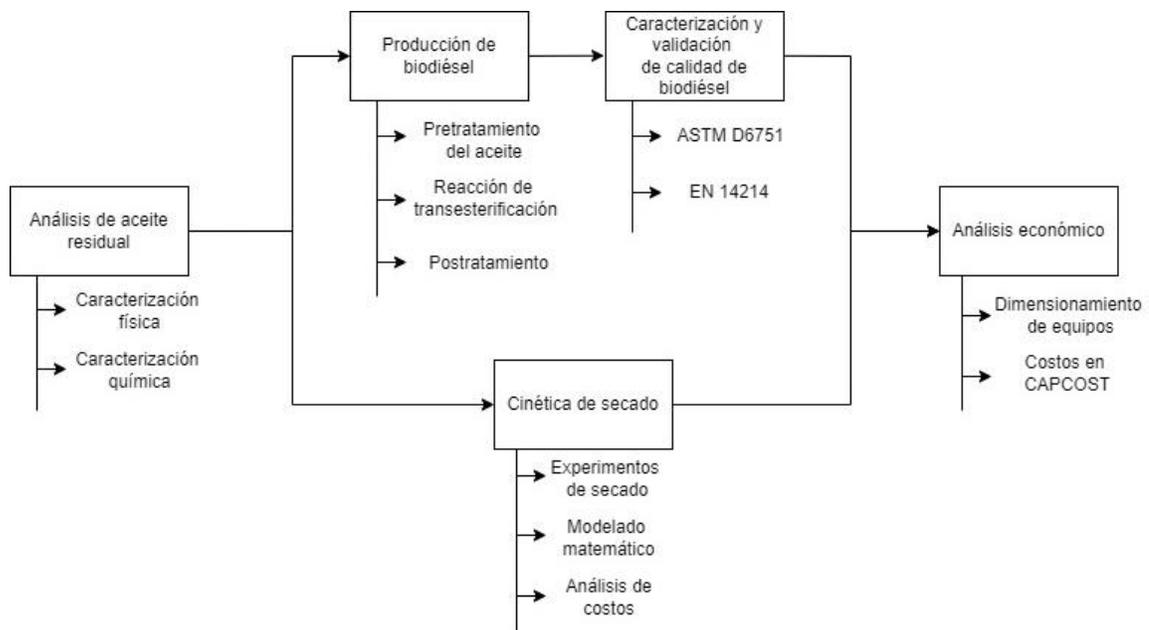
Donde  $M_{R-exp,i}$  es la relación de humedad experimental,  $M_{R-cal,i}$  es calculado por el modelo y N es el número de datos. La curva con un alto  $R^2$  y un  $RMSE$  bajo es el que describe mejor los datos de secado.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La metodología que se lleva a cabo en este proyecto seguirá las etapas presentadas en la Figura 2.1.

**Figura 2.1** Etapas del desarrollo de proyecto

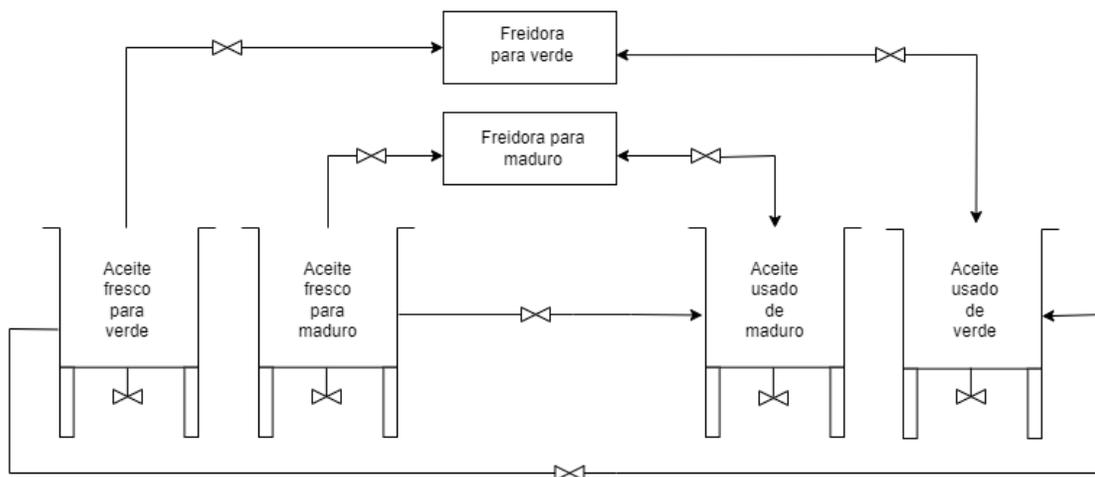


Se empleó una muestra de aceite de palma usado en una Industria de alimentos dedicada a la fritura de plátano verde y maduro que se ubica en Guayaquil, Ecuador.

La producción del aceite usado ocurre de acuerdo con la Figura 2.2, donde se cuenta con tanques cilíndricos elevados de aceite fresco y usados, independientes para cada uno de los productos procesados. Para las frituras, se mezcla el aceite usado con aceite fresco, siendo reutilizado hasta que deje de cumplir los parámetros de calidad de la empresa o cuando el tanque llega a su máxima capacidad.

La muestra que se usó fue del aceite que procesa plátano maduro, cuando ya iba a ser enviada al gestor ambiental, siendo homogénea por medio de agitación y tomada por la válvula inferior del tanque.

**Figura 2.2** Diagrama del proceso de frituras en empresa de alimentos



### 2.1. Caracterización de aceite usado de frituras

Para la caracterización del aceite, se filtró 1 L de la muestra mediante un sistema de bomba de vacío, kitasato, embudo de vidrio y papel filtro con porosidad de 125 mm.

Se realizó la caracterización del aceite siguiendo la normativa INEN 2678 para grasas y aceites vegetales residuales. Las propiedades caracterizadas para el aceite fueron: humedad, Índice de acidez, poder calorífico, viscosidad cinemática a 40 °C, índice de saponificación, índice de peróxidos, contenido de cenizas, densidad, índice de yodo, punto de nube, punto de escurrimiento y punto de inflamación.

Además, se realizó el análisis de ácidos grasos del aceite por medio de cromatografía de gases de ionización de llama, siguiendo la metodología AOAC 991.39 (AOAC INTERNATIONAL, 1995).

### 2.1.1. Caracterización fisicoquímica

- **Cenizas**

El contenido de cenizas de la muestra se determinó de acuerdo con la norma INEN 401. Este método consiste en la combustión controlada de 10 g de aceite sobre una cápsula de porcelana, con ayuda de un mechero Bunsen. Posteriormente se coloca la muestra en una mufla a 550 °C hasta la obtención de cenizas blancas. Se calculan de cenizas (C), en %, como:

$$C = 100 \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1}$$

Donde:

$m_1$  = Masa de la cápsula

$m_2$  = Masa inicial de aceite con la cápsula

$m_3$  = Masa final de las cenizas con la cápsula

- **Punto de inflamación**

Se siguió el procedimiento de la norma INEN 808 para determinación de puntos de inflamación y combustión en vaso abierto Cleveland. Este consiste en usar un vaso Cleveland para calentar el aceite, mientras un mechero de ensayo de 4 mm pasa sobre los vapores del aceite cada 2 °C. El punto de inflamación será la temperatura en la que aparezca la primera llama sobre la superficie del aceite.

- **Punto de nube**

Se realizó bajo la norma ASTM D2500 aplicable para derivados del petróleo y biodiésel. Se preparó una mezcla frigorífica con hielo y cristales de cloruro de sodio, en la que se coloca un tubo de ensayo para que baje su temperatura por convección. Se colocó un tapón con termómetro y el punto de nube se obtiene como la temperatura en la que se forme la primera nube en el aceite.

- **Punto de escurrimiento**

Se realizó el análisis bajo la norma INEN 1982 – ASTM 97. Sobre la misma mezcla frigorífica del punto de nube, se siguió enfriando la muestra de aceite y cada 3 °C se retiraba para ser inclinado para comprobar la fluidez. Se obtuvo el punto de escurrimiento como la temperatura en la que el aceite ya no se movía durante 5 segundos cuando se mantiene volteado. Este parámetro se reporta como la temperatura observada, sumándole 3 °C.

- **Densidad**

La norma NTE INEN 2903 se empleó para determinar la densidad de la muestra. Se colocó el aceite en una probeta de 100 mL hasta llenarlo. Se emplearon hidrómetros en el rango de 0.7-0.8, 0.8-0.9 y 0.9-1 de gravedad específica; se sumergieron en la probeta hasta tocar fondo y se soltaron. La medición de densidad se realiza con el hidrómetro que se mantiene flotando y se lee cuando se encuentra en reposo. Se emplearon tablas ASTM para corregir la temperatura a 15 °C.

- **Viscosidad cinemática**

Se llevó a cabo la prueba de acuerdo con el procedimiento de la norma INEN 810 y a las indicaciones del fabricante. El parámetro que se midió fue el tiempo que le tomó a la muestra caer de un punto a otro por medio de un tubo capilar Cannon-Fenske de tamaño 300. Se calcula la viscosidad cinemática ( $V_c$ ), en  $\text{mm}^2/\text{s}$ , como:

$$V_c = C \cdot t$$

Donde:

C = Constante de calibración del viscosímetro, en  $\text{mm}^2/\text{s}^2$

t = Tiempo en s.

- **Humedad**

Se empleó la norma INEN 39 para determinar el contenido de humedad. Se empleó una estufa a 103 °C para remover el contenido de agua de la muestra colocada en un vaso de 100 mL. Se determina la masa final cuando la diferencia entre una medición y otra es de 0.002 g. Se calcula la humedad (H), en %, como:

$$H = 100 \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1}$$

Donde:

$m_2$  = Masa del vaso de precipitación

$m_3$  = Masa del vaso con la muestra después del secado

$m_1$  = Masa del vaso con la muestra antes del secado.

### 2.1.2 Caracterización química

- **Acidez**

Para el cálculo de acidez se siguió el procedimiento descrito en la norma INEN 38. Se empleó 5 g de muestra, 100 mL de mezcla 1:1 de etanol:éter dietílico neutralizada con KOH. La mezcla fue titulada con 0.1 N de KOH e indicador de fenolftaleína. Se calculó el índice de acidez (IA), en mg KOH/g, como:

$$IA = \frac{56.1 \cdot V \cdot N}{m}$$

Donde:

N = Normalidad estandarizada de KOH

V = Volumen consumido de KOH

M = Masa de muestra empleada en g

Además, con este procedimiento se calculó la acidez de la muestra (A), que representa el contenido de ácidos grasos con respecto al ácido oléico, en % m/m, como:

$$A = \frac{282 \cdot V \cdot N}{10 \cdot m}$$

- **Índice de saponificación**

Para la determinación del índice de saponificación se siguió la norma INEN 40. Primero se realizó la saponificación de 2 g de la muestra con 25 mL de solución etanólica de KOH en un sistema de reflujo. Luego se tituló en caliente la muestra saponificada, con una solución de HCl 0.5 N. Se calculó el índice de saponificación (i), en mg KOH/g, como:

$$IS = \frac{56.1 \cdot (V_1 - V_2) \cdot N}{m}$$

Donde:

N = Normalidad estandarizada de HCl

$V_1$  = Volumen de consumido con la prueba en blanco

$V_2$  = Volumen consumido con la muestra

m = masa de muestra inicial empleada.

- **Peso molecular promedio**

Se calculó el peso molecular promedio del aceite (MW) de acuerdo con (Hsiao et al., 2021), donde se relaciona el índice de saponificación (IS) e índice de acidez (IA).

$$MW = 56.1 \cdot 1000 \cdot \frac{3}{(IS - IA)}$$

- **Índice de yodo**

Para el análisis de índice de yodo se siguió el procedimiento descrito en la norma ISO 3961:2018. En este se empleó una solución de Wijs previamente preparada acorde a la norma INEN 36. Se colocó 0.35 g de muestra con 20 mL una mezcla de proporción 1:1 de ciclohexano: ácido acético glacial y se hizo reaccionar con 25 mL del reactivo de Wijs, durante 1 hora. Se agregó 20 mL de yoduro de potasio y 150 mL de agua.

Se tituló la mezcla con un estándar de tiosulfato de sodio pentahidratado 0.1 N e indicador de almidón. Se calculó el índice de yodo ( $I_2$ ), en g  $I_2$ /100 g, como:

$$I_2 = \frac{12.69 \cdot N \cdot (V_1 - V_2)}{m}$$

Donde:

N = Normalidad estandarizada de tiosulfato de sodio pentahidratado

$V_1$  = Volumen de consumido con la prueba en blanco

$V_2$  = Volumen consumido con la muestra

- **Índice de peróxidos**

La norma INEN 277 fue usada para el análisis del índice de peróxidos. Se emplearon 5 g de muestra y se mezclaron con 30 mL de una solución 3:2 de ácido acético:cloroformo. Se le añadieron 0.5 mL de una solución saturada de yoduro de potasio y 30 mL de agua. La solución fue titulada con una la solución con 0.1 N de tiosulfato de sodio pentahidratado e indicador de almidón. Se calculó el índice de peróxido ( $p$ ), en meq  $O_2$ /kg, como:

$$p = \frac{V \cdot N}{m} \cdot 1000$$

Donde:

V = Volumen consumido en titulación, corregido con el blanco

N = Normalidad estandarizada de tiosulfato de sodio pentahidratado

m = Masa de la muestra en g

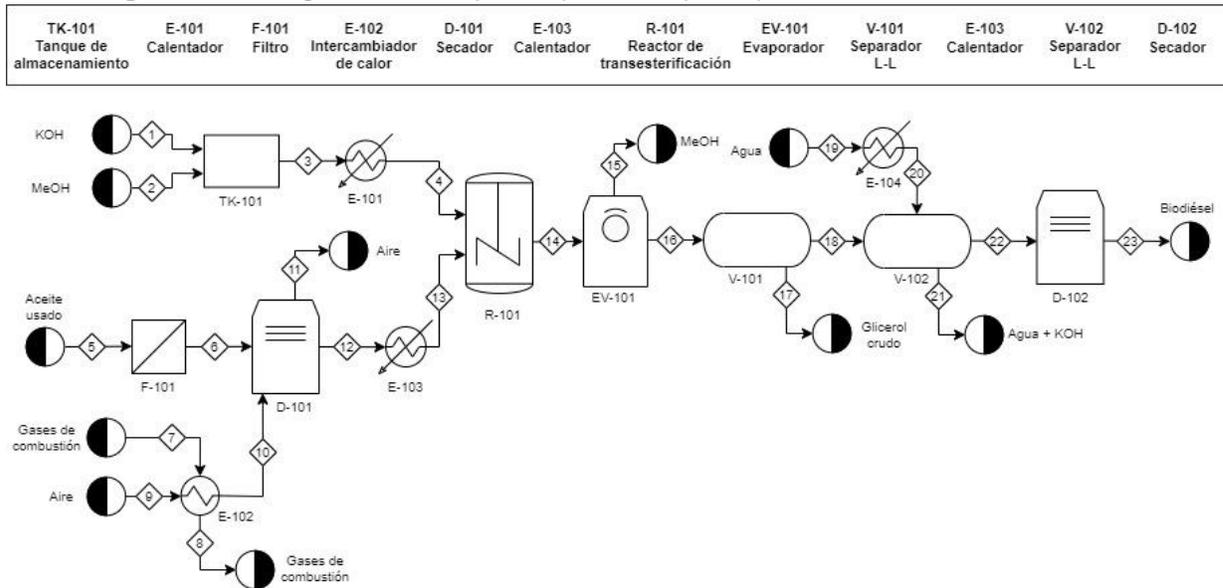
- **Poder calorífico**

Para medir poder calorífico se empleó la norma ASTM D240 que mide el calor de combustión en bomba calorimétrica. El equipo empleado es marca IKA C 200, que usó 0.5 g de muestra para la combustión controlada, Se obtuvo el poder calorífico en J/g.

## 2.2. Producción de biodiésel

El proceso de producción de biodiésel se presenta en la Figura 2.3, etapas conformadas por la preparación de solución KOH-metanol, pretratamiento del aceite usado, reacción de transesterificación y elpostratamiento, cuyos pasos se describen a continuación.

**Figura 2.3** Diagrama de flujo del proceso para producción de biodiésel



### 2.2.1. Solución KOH-metanol

1. Se pesó el metanol (MeOH) a una relación molar metanol:aceite de 6:1 y se colocó en un frasco ámbar con tapa rosca (TK-101),.

2. En un vidrio de reloj se pesó 1% de hidróxido de potasio (KOH) con respecto al aceite y se añadió al frasco ámbar con metanol, junto a un agitador magnético.
3. Se cierra el frasco para colocarlo sobre una plancha de calentamiento-agitación (E-101), a 60 °C y 5000 rpm hasta que se haya disuelto todo el hidróxido en el alcohol, lo que formó el metóxido de potasio y agua.

#### **2.2.2. Pretratamiento**

1. Se secó la muestra (D-101) de aceite filtrada previamente (F-101), durante 8 horas a 60 °C  $\pm$  1 °C y se lleva a un desecador durante 45 minutos.
2. Se pesó 200 g del aceite seco en un balón de 1000 mL (R-101) y se le colocó un agitador magnético.
3. Se cerró el balón con un tapón de corcho que tiene un orificio para insertar un termómetro hasta que el bulbo toque el aceite, sin chocar con el agitador ni la base del balón.
4. Se calentó el balón sobre una plancha de calentamiento y agitación (E-103) a 60 °C y 5000 rpm.

#### **2.2.3. Reacción de transesterificación**

1. Una vez que el aceite llega a los 60 °C, se aumentó la agitación a 9000 rpm y se añadió toda la solución de KOH-metanol con un embudo de vidrio. Se tomó el tiempo desde que toda la solución de KOH-metanol entra en contacto con el aceite.
2. Se dejó reaccionar durante 1 hora, controlando que la temperatura de reacción se mantenga a 60 °C.

#### **2.2.4. Postratamiento**

1. Para detener la reacción, se llevó el balón de destilación de 1000 mL al rotoevaporador (EV-101). Se configuró el equipo a 250 mbar, 40 °C y 40 rpm durante 20 minutos o hasta ver que no caigan más gotas de metanol del condensador. Se pesó el metanol recuperado.

2. Se transfirió el contenido del balón a un embudo de decantación de 500 mL (V-101) y se lo colocó sobre un aro de calentamiento durante 24 horas para lograr la separación de fases.
3. La fase inferior del embudo de decantación es glicerol crudo y la superior biodiésel. Se separó la fase inferior sobre un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se pesó.
4. Se calentó 500 mL de agua destilada (E-104) a 50 °C para hacer lavados a una relación del 50% v/v. Se agitó el embudo de decantación (V-102) durando 5 minutos y se esperó a que se separen las fases durante 15 minutos. Se separa la fase inferior, en un vaso de precipitación.
5. Se midió el pH del agua residual usando 5 gotas de fenolftaleína. Si tenía una coloración rosada era por la presencia de hidróxido de potasio. Se descartó el contenido del vaso de precipitación y se enjuagó con agua destilada.
6. Se repitieron los lavados hasta que el agua residual no cambiara de color a rosado. Una vez alcanzado, se realizó un último lavado y se comprobó el pH usando tirillas.
7. Se transfiere el contenido del embudo de decantación en un vaso de precipitación de 250 mL previamente pesado.
8. Se descartó el exceso de agua en el biodiésel llevándolo a la estufa durante 2 horas a 105 °C (D-102) y posteriormente se colocó en el desecador por 45 minutos. Se pesó el vaso de precipitación con el biodiésel.
9. Se repitió el paso 8 hasta que la masa permaneciera constante.
10. Se registró la masa final del biodiésel restándole la masa del vaso de precipitación.
11. Se calculó el rendimiento de la reacción de acuerdo a la ecuación:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Masa de biodiésel producido}}{\text{Masa de aceite usado}}$$

### **2.3. Caracterización y validación de biodiésel**

Para verificar que el biodiésel producido puede ser usado como combustible que reemplace al diésel, se toma en cuenta los rangos permitidos dentro de las normas ASTM D6751 y EN 14214. Los parámetros regulados por normativa son: humedad, acidez, cenizas, índice de yodo, punto de inflamación, viscosidad cinemática y densidad.

Además, se realizó una revisión bibliográfica con el fin de comparar la caracterización de este proyecto con los resultados obtenidos en estudios previos que hayan usado aceite residual de palma en producción biodiésel. Esto ocurre porque hay propiedades que no están reguladas en normativas pero son imprescindibles para determinar la calidad del combustible (Encinar et al., 2005). Los parámetros no estipulados en normas son: poder calorífico, índice de saponificación, punto de nube y punto de escurrimiento.

Se emplean los mismos procedimientos de la Sección 2.1, realizándolas por duplicado, donde se representa la desviación típica con el símbolo “±”.

### **2.4. Estudio cinético de secado**

Se tomó una muestra homogénea de 200 g del aceite residual, recientemente filtrado, y se almacenó herméticamente en un frasco ámbar para ser usado en las pruebas de secado. Esto se realizó para mantener la misma humedad inicial en cada prueba. Los experimentos se realizaron para 60, 70, 80, 90, 100 y 115 °C, por triplicado, de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Se lavan y secan los 3 crisoles a 105 °C durante 2 horas. Posteriormente, se llevaron al desecador por 45 minutos y se tomó la masa seca de cada uno.
2. Se pesó aproximadamente 5 gramos de aceite en los crisoles y se colocaron en la estufa a la temperatura del experimento.
3. Se mantuvieron las muestras en la estufa por 10 minutos y luego se colocaron durante 15 minutos en el desecador. Se tomó la masa de los crisoles con el aceite para inmediatamente devolverlo a la estufa. El proceso completo de pesar los 3 crisoles fue de aproximadamente 1

minuto. El proceso se repite hasta que la diferencia de pesos sea de 0.0001 gramos.

4. Al final de la prueba se colocan los crisoles en la estufa a 105 °C durante 2 horas, se colocan en el desecador por 45 minutos y se pesan. Con esto se determina la masa de aceite sin agua.

Con el set de datos obtenidos de tiempos y masa de aceite, por cada temperatura, se calculó la humedad en base seca de cada medición.

$$M_t = \frac{\text{Masa de agua en tiempo } t \text{ (g)}}{\text{Masa seca de aceite (g)}}$$

Posteriormente, se determina la tasa de humedad adimensional, donde  $M_t$  es la humedad en el tiempo  $t$  y  $M_o$  es la humedad inicial en base seca del aceite.

$$M_R = \frac{M_t}{M_o}$$

Los datos de  $M_R$  y tiempo, se ingresaron en el software Matlab R2016b y se empleó la aplicación Curve Fitting para evaluar los diferentes modelos de la Tabla 1, a los datos obtenidos de los experimentos de secado. Por cada modelo se toman en cuenta los  $R^2$  y RMSE, así como los coeficientes que describen la curva.

Se escogió el modelo con mayor  $R^2$  promedio y menor RMSE promedio, como el que mejor describe el proceso de secado. A partir del modelo esogido, se determinó la humedad final a la que es posible llegar por cada temperatura, evaluando el límite del modelo al tiempo en el infinito positivo.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} MR(t) = MR_{final}$$

Además, con el modelo también se determinó el tiempo mínimo de secado para llegar a la humedad final.

Para determinar la temperatura óptima que logra reducir los costos operativos del secador, se consideró que el aire que ingresa al secador (A) es calentado previamente con gases de combustión (GC) provenientes de una caldera que usa

Fuel oil No. 6. Las condiciones de los gases disponibles es 283 °C y 500 kPa, con una composición másica de: 0.1994 H<sub>2</sub>O, 0.615 N<sub>2</sub>, 0.1853 CO<sub>2</sub> y 0.0003 O<sub>2</sub>.

Se determinó la razón másica A/GC necesaria para calentar el aire hasta la temperatura del experimento. Esto se realizó por medio de un balance de energía entre los gases de combustión y el aire (E-102), asumiendo que la temperatura de salida de los gases es 112 °C. Las condiciones de entrada del aire se consideran como las condiciones del aire ambiente promedio de Guayaquil: 27 °C y 73% de humedad relativa.

$$\frac{A}{GC} = \frac{h_{GCi} - h_{GCf}}{h_{Ai} - h_{AT}}$$

Donde:

$h_{GCi}$  = Entalpía de los gases a la entrada

$h_{GCf}$  = Entalpía de los gases a la salida

$h_{Ai}$  = Entalpía del aire a la entrada

$h_{AT}$  = Entalpía del aire a la temperatura a evaluar

La razón A/GC se utilizó para calcular el flujo de gases de combustión (en kg/h), considerando el aire necesario para secar 200 kg/h de aceite residual a partir de un balance de masa, asumiendo que el aire sale saturado del secador. Se empleó los tiempos mínimos de secado por cada temperatura para determinar la masa total (en kg) de GC que se requerirá en el proceso. Se consideró que el costo específico de GC es 0.03187 \$/kg. Para el análisis energético se considera la diferencia  $h_{GCi} - h_{GCf}$  (en kJ/kg) como la energía entregada de GC al A igual a 0.2106 MJ/kg.

Se graficó el costo total (\$) vs Temperatura y la energía (MJ) vs Temperatura, para el análisis de la temperatura óptima de secado desde el punto de vista de minimizar los costos y el gasto energético.

## **2.5. Análisis económico**

Se realizará el análisis de costos de equipos siguiendo la metodología de (Turton et al., 2018), que propone la herramienta Capcost para determinar el flujo de caja del proceso y los indicadores económicos como TIR y VAN. Para esto se considera que el proceso tiene una alimentación de aceite de 200 kg/h y se calculan los flujos de metanol con la relación molar de 6:1 y 1% de catalizador, así como del agua de servicio. Los costos de equipos se determinaron por medio de Capcost siguiendo el dimensionamiento realizado por (Castro Jaime, 2021), el cual considera el mismo flujo de entrada de aceite.

El costo de los reactivos como metanol e hidróxido de potasio fueron cotizados en el sector industrial del Ecuador, obteniendo valores de 1.15 \$/kg y 2.5 \$/kg, respectivamente. El costo de venta de los productos fueron tomados de estudios previos, considerando 3.56 \$/gal para biodiésel y 0.23 \$/kg para la glicerina cruda.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Resultados de caracterización de aceite

La Tabla 3.1 presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica del aceite residual proveniente de una empresa de frituras.

**Tabla 3.1** Caracterización fisicoquímica de aceite

Parámetros	Unidades	Resultado	Valores reportados	Referencia
<i>Propiedades químicas</i>				
Poder calorífico	MJ/kg	39.95	34.72-37.2	(Thushari & Babel, 2018)- (Sahar et al., 2018a)
Índice de acidez	mg <sub>KOH</sub> /g	7.476	0.5-17.85	(Thushari & Babel, 2018)-(Sanli et al., 2011)
Acidez	%	3.758	0.21-10	(Thushari & Babel, 2018)- (Alias et al., 2018)
Índice de yodo	g I <sub>2</sub> /100g	68.74	8.57-117.34	(Phan & Phan, 2008)-(Jalkh et al., 2018)
Índice de saponificación	mg <sub>KOH</sub> /g	249.58	198-280	(Alias et al., 2018)- (Sahar et al., 2018a)
Índice de peróxido	meq <sub>O<sub>2</sub></sub> /kg	8.720	19.05-64.47	(Sanli et al., 2011)- (Jalkh et al., 2018)
<i>Propiedades físicas</i>				
Sólidos suspendidos	%	2.40	-	-

Peso molecular	kg/kmol	695.16	670.1-873.4	(Phan & Phan, 2008)-(Encinar et al., 2005)
Densidad 15 °C	g/mL	0.929	0.83-0.93	(Phan & Phan, 2008)-(Sanli et al., 2011)
Humedad	%	0.133	0.02-0.166	(Alias et al., 2018)-(Sanli et al., 2011)
Viscosidad cinemática 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	4.600	4.6-5.83	(Mohadesi et al., 2019a)-(Sahar et al., 2018a)
Contenido de cenizas	%	0.013	-	-
Punto de nube	°C	12	6-25	(Mohadesi et al., 2019a)-(Phan & Phan, 2008)
Punto de escurrimiento	°C	6	-6.5-18.5	(Thushari & Babel, 2018)-(Phan & Phan, 2008)
Punto de inflamación	°C	270	200-298	(Alias et al., 2018)-(Phan & Phan, 2008)

Se obtiene un índice de acidez de 7.476 mg KOH/g, el cual resulta un valor esperado para un aceite usado debido a la formación de ácidos grasos durante la fritura. Según (Hsiao et al., 2021), la transesterificación es favorable con un índice menor de 2 mg KOH/g, sin embargo, otros estudios han demostrado obtener biodiésel con índices de acidez mayores. Por lo que no hay un criterio absoluto en el valor de índice de acidez límite para la reacción de transesterificación, ya que su viabilidad dependerá de otros factores como materia prima, catalizador y metanol. La acidez más alta reportada para hacer la transesterificación directa es 3.0% (Yeom & Go, 2018). Por esto, con el valor de 3.76% es posible producir biodiésel con un solo paso sin riesgos hacia la formación de jabones.

El incremento de los ácidos grasos libres influye directamente en las propiedades, como índice de yodo, capacidad calorífica, viscosidad y densidad, por lo que deben ser monitoreados para el aceite de frituras (Sanli et al., 2011).

El índice de peróxidos resulta 8.72 meqO<sub>2</sub>/kg y refleja el grado de oxidación de la muestra de aceite, el cual proviene de la auto oxidación por el aire circundante y de la oxidación hidrolítica causada por el agua de los alimentos. Por esto, el índice de peróxidos está relacionado con el repetido uso del aceite para la fritura de alimentos, así como del tiempo de almacenamiento (Jalkh et al., 2018). El índice de peróxido para aceites frescos presenta valores menores a 1 meqO<sub>2</sub>/kg (Mba et al., 2015). Por lo que el valor obtenido es apropiado para los aceites usados y es menor que otros aceites de frituras reportados en la literatura.

El índice de yodo para el aceite residual es de 68.74 gI<sub>2</sub>/100g, el cual resulta un valor permitido en la norma EN14214. Este valor indica el grado de insaturación de los ácidos grasos, el cual disminuye con respecto al aceite vegetal crudo durante la fritura de alimentos por la ruptura de dobles enlaces para la formación de ácidos grasos libres. Es necesario comparar este parámetro con normativas de biodiésel ya que la transesterificación no afecta el índice de yodo, por lo que se esperan valores aproximados en el biocombustible (Encinar et al., 2005).

El índice de saponificación resultó ser 249.58 mg KOH/g, siendo mayor al del aceite de palma fresco con valor típico de 196 mg KOH/g (Mba et al., 2015). Este aumento significa el incremento de los ácidos grasos libres, lo que genera mayor requerimiento de hidróxido de potasio para que se saponifiquen. Este índice alto también tendrá un efecto en la cantidad de metanol necesaria para la transesterificación, por lo que se emplean relaciones en exceso para favorecer un alto rendimiento (Bart et al., 2010).

El peso molecular promedio del aceite se encuentra dentro del rango reportado en estudios previos y menor al del aceite de palma fresco cercano a 850 g/mol (Mba et al., 2015). Este parámetro depende del índice de saponificación, por lo que el aumento de los ácidos grasos genera la disminución del peso molecular del aceite.

El poder calorífico de 39.95 MJ/kg resulta alto en comparación a los presentados en estudios previos y demuestra un alto contenido de energía. (Castro Jaime, 2021) estudia el aceite proveniente de la misma empresa y obtiene un poder calorífico de 32.6 MJ/kg. Estas diferencias demuestran la variabilidad del aceite usado durante el proceso de frituras y el contenido de agua de los alimentos. Las impurezas y la humedad afectan el poder calorífico, siendo la filtración con poro de 125 mm y el secado, pasos importantes en el pretratamiento.

La viscosidad cinemática y la densidad presentan valores dentro de lo reportado en estudios de caracterización de aceite usado de frituras. Esto representa que no presentará problemas durante el transporte y almacenamiento del aceite durante la producción del biodiésel.

El punto de nube y de escurrimiento son 12 °C y 6 °C, respectivamente. Esto indica que las condiciones ambientales para manejar el aceite como un fluido líquido deben ser altas, mayores a los 6 °C. La variación de estas propiedades se debe principalmente al grado de saturación en las cadenas de ácidos grasos del aceite usado (Phan & Phan, 2008).

El punto de inflamación obtenido es de 270 °C y se encuentra dentro del rango esperado para un aceite usado de fritura. Este valor representa un parámetro de seguridad importante durante el manejo, almacenamiento y seguridad de la materia prima para evitar una atmósfera inflamable.

**Tabla 3.2** Ácidos grasos en el aceite usado

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
Ácidos grasos saturados	g/100 g	35.93
Ácidos grasos monoinsaturados	g/100 g	49.13
Ácidos grasos poliinsaturados	g/100 g	11.65
Ácidos grasos no saturados	g/100 g	60.77
Mirístico (C14:0)	g/100 g	0.52
Palmítico (C16:0)	g/100 g	31.31
Palmitoleico (C16:1)	g/100 g	0.28
Esteárico (C18:0)	g/100 g	3.33

Oleico (C18:1)	g/100 g	48.84
Linoleico (C18:2)	g/100 g	10.73
Linolénico (C18:3)	g/100 g	0.18

La Tabla 3.2 presenta los ácidos grasos que se encuentran en el aceite usado, llegando a detectar 95.19 g por cada 100 g de muestra. Los ácidos grasos que predominan en el aceite son el oleico y palmítico, estando acorde al origen del aceite de palma. Además, la mayor composición de ácidos grasos son los no saturados y de estos el 49.13% son monoinsaturados.

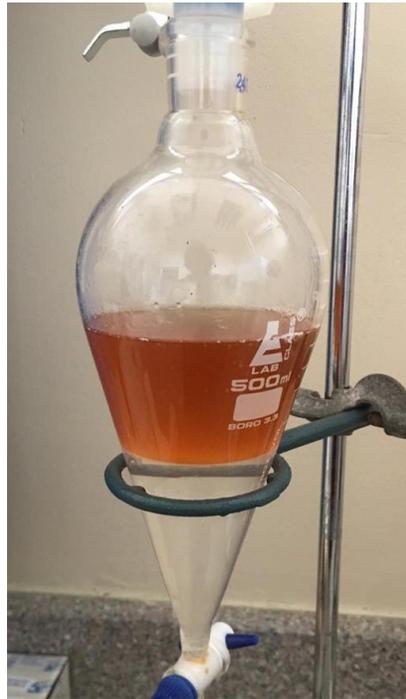
### 3.2. Resultados de producción de biodiésel

Se logró producir biodiésel a condiciones específicas de 60 °C, 1% de catalizador y relación molar metanol: aceite de 6:1. Se escogen estas condiciones como la combinación de variables óptimas que resultan de diferentes estudios bibliográficos (Encinar et al., 2005). La Figura 3.1 demuestra la mezcla obtenida después de la reacción de transesterificación, una fase aceitosa superior compuesta de ésteres de metilo y una fase inferior que contiene glicerol crudo.

**Figura 3.1** Resultado de reacción de transesterificación



**Figura 3.2** Resultado durante los lavados con agua



Esta última es llamada así por ser el coproducto de la transesterificación, que contiene en su mayoría metanol, agua, jabones y residuos orgánicos. El contenido de glicerol suele estar entre 40% y 88% (Posada-Duque & Cardona-Alzate, 2010).

No se tuvo la disponibilidad técnica para realizar la identificación del glicerol producido, por requerir equipos cromatográficos. Sin embargo, se reconocen sus propiedades características como su alta densidad y viscosidad en comparación al biodiésel, así como su inmiscibilidad. Además, otro indicador de transesterificación es el consumo de metanol durante la reacción, lo que se cuantificó al recuperar el exceso durante la operación del rotavapor.

Otras reacciones de competencia que son posibles en el reactor son la saponificación y la hidrólisis.

La saponificación es la reacción irreversible que forma jabones y moléculas de agua a partir de ácidos grasos libres con hidróxido de potasio. Esta reacción ocurre durante la transesterificación de los aceites a biodiésel, representando la disminución de los ésteres de metilo y por lo tanto un bajo rendimiento del

biocombustible. Un indicador de que ocurre la saponificación es la dificultad para purificar el biodiésel (Atadashi et al., 2012), ya que el jabón es soluble en agua y se observaría una masa viscosa que interfiere en el sistema. Sin embargo, como se observa en la Figura 3.2, durante los lavados resultaron capas claramente definidas con una fase superior oleosa y una inferior acuosa, por lo que se establece que no se favoreció la saponificación.

Otra reacción posible es la hidrólisis de los aceites vegetales, la cual produce glicerol y ácidos grasos a partir de los triglicéridos en presencia de agua. La presencia de agua inhibe la transesterificación y compite con el alcohol para llevar a la formación de ácidos grasos. Esta reacción representa una alternativa a la transesterificación, en la que se puede formar biodiésel con la hidrólisis seguida por la esterificación, para formar los ésteres de metilo. Sin embargo, esta reacción ocurre a elevadas temperaturas (250-330 °C) y altas presiones (50-60 bar), en las que el agua y las grasas son solubles entre si (Satyarthi et al., 2011). Por lo tanto, no es posible que se haya favorecido la hidrólisis debido a las condiciones del experimento.

Se valida que la reacción fue de transesterificación por medio de la caracterización fisicoquímica del biodiésel esperado, cuyos resultados se presentan en la Tabla 3.3.

Se obtuvo un rendimiento de biodiésel del 89.02%, lo que representa que esta cantidad de biodiésel fue producida por cada 100 g de aceite residual. (Encinar et al., 2005) produce biodiésel a partir de aceite usado a las mismas condiciones de reacción y obtiene un rendimiento del 92%. Este estudio concluye que el aumento del rendimiento influye en el incremento de parámetros como el poder calorífico e índice de saponificación, debido al incremento de los ésteres de metilo.

Se obtuvo que el poder calorífico fue de 38.23 MJ/kg, siendo menor al reportado por (Encinar et al., 2005) de 39.8 MJ/kg, lo que sigue la tendencia de que un mayor rendimiento representa un poder calorífico más alto.

El índice de saponificación obtenido representa que se requerirán 206.18 mg de KOH para saponificar 1 gramo de biodiésel. (Encinar et al., 2005) presenta un índice

de saponificación de 172.4 mg KOH/g, lo que continúa con la tendencia en relación con el rendimiento. Sin embargo, este también dependerá de otros factores como el peso molecular inicial del aceite debido a las frituras. (Sahar et al., 2018a) establece que un índice de saponificación para biodiésel debería ser menor a los 320 mg KOH/g para su correcta aplicación como combustible.

**Tabla 3.3** Caracterización fisicoquímica de biodiésel

Parámetros	Unidades	Resultado	EN 14214	ASTM D6751
Rendimiento	%	$89.02 \pm 2.48$	-	-
<i>Propiedades químicas</i>				
Acidez	mg KOH/g	$0.37 \pm 0.18$	< 0.50	< 0.50
Índice de yodo	g I <sub>2</sub> /100g	$67.69 \pm 0.05$	< 120	-
Índice de saponificación	mg <sub>KOH</sub> /g	$206.18 \pm 15.21$	-	-
Poder calorífico	MJ/kg	$38.23 \pm 0.44$	-	-
<i>Propiedades físicas</i>				
Humedad	% bh	$0.048 \pm 0.038$	< 0.05	< 0.05
Densidad 15 °C	g/mL	$0.878 \pm 0.001$	0.86 - 0.90	-
Viscosidad cinemática 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	$4.90 \pm 0.13$	3.5 - 5.0	1.9 – 6.0
Contenido de cenizas	%	$0.024 \pm 0.003$	<0.03	<0.05
Punto de inflamación	°C	$254 \pm 22$	>101	>130
Punto de nube	°C	$21 \pm 1.41$	-	-
Punto de escurrimiento	°C	$12 \pm 0.0$	-	-

El índice de acidez en el biodiésel se encuentra dentro del rango permitido en normativas EN y ASTM. (Sahar et al., 2018a) obtiene que un bajo índice de acidez en el biodiésel es favorecido por el uso de agua caliente en el postratamiento, lo que justifica el uso de agua a 50 °C durante los lavados.

El índice de yodo en el biodiésel es de 67.69 gI<sub>2</sub>/100g y cumple con lo estipulado en la normativa EN 14214. Este valor se aproxima al obtenido para el aceite usado y se debe a que el grado de insaturación en las cadenas de ácidos grasos no cambia a lo largo de la transesterificación. A un valor más alto de los 120 gI<sub>2</sub>/100g los

glicéridos tenderán a polimerizarse en el calentamiento, llegando a formar gomas; por lo que el biodiésel producido no presentará estos problemas.

El punto de inflamación cumple con la normativa y es considerablemente alto, lo que disminuye el riesgo de incendio mientras se almacena el biodiésel. La densidad y viscosidad cinemática se encuentran dentro de los límites establecidos. Esto indica que no presentará problemas en el transporte ni durante la combustión ya que una viscosidad cinemática alta produce que el biodiésel se penetre en el lado opuesto de los inyectores de motores (Sahar et al., 2018a).

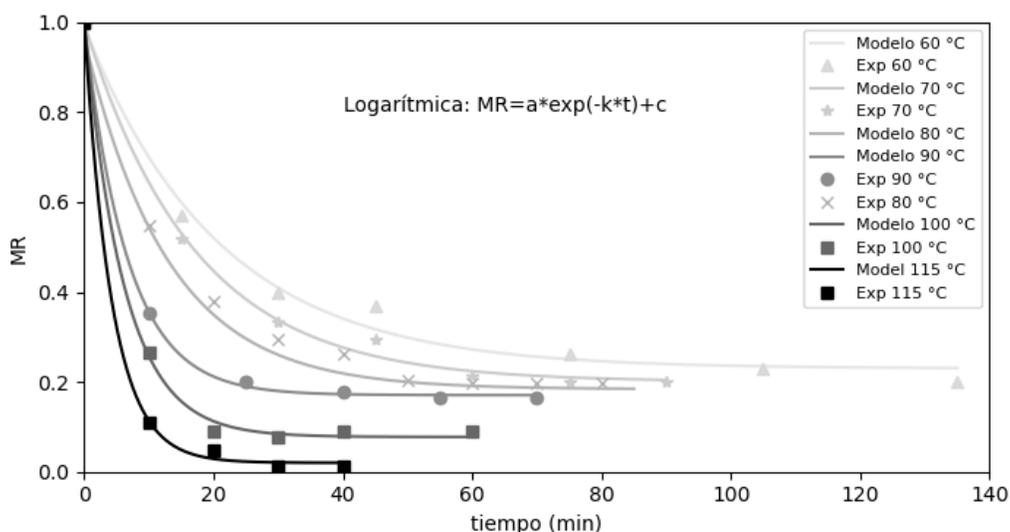
El contenido de cenizas resultó de 0.024% con respecto al biodiesel producido. Este demuestra una aproximación al contenido de sólidos que resultará cuando se lo use como combustible en calderas y motores.

Se obtiene un punto de nube y de escurrimiento de 21 y 12 °C, respectivamente, los cuales son más altos que los presentados en el aceite usado. El punto de nube más alta que se encontró en bibliografía para biodiésel a partir de aceite usado es 10.5 °C (Sahar et al., 2018b) y el mayor punto de escurrimiento es de 5 °C (Mohadesi et al., 2019b). Esto limita en las condiciones ambientales donde pueda ser usado el biodiésel para poder encenderse de forma eficiente; a punto de nube aún puede ser usado, pero requerirá ser calentado para evitar la formación de ceras.

### **3.3. Estudio cinético de secado**

La Gráfica 3.1 muestra la razón de humedad adimensional (MR) en función del tiempo de secado para el aceite residual a temperaturas entre 60 °C y 115°C. Se puede observar que el tiempo de secado disminuye a medida que incrementa la temperatura, pasando de 135 minutos a 60 °C hasta 40 minutos a 15 °C.

**Gráfica 3.1** Curvas de secado a diferentes temperaturas



La cinética de secado para aceites no se ha realizado en estudios previos. Sin embargo, estos resultados son consistentes a otros estudios cinéticos para alimentos.

Se evaluaron diferentes modelos matemáticos mediante los parámetros el  $R^2$  y RMSE, los que se presentan en la Tabla A.1. Se espera que el modelo con mayor  $R^2$  y menor RMSE sea el que mejor se ajuste al comportamiento experimental del secado, el que servirá para determinar el tiempo de secado mínimo para cada temperatura.

Los modelos que mejor se ajustan a la cinética de secado son Midilli, Logarítmico y Page que presentan  $R^2$  y RMSE promedios de 0.99762, 0.99528, 0.99242 y 0.01411, 0.01912, 0.02592, respectivamente. Para este estudio se escogió el modelo Logarítmico ya que presenta mayor correlación con los datos experimentales y genera curvas independientes por cada temperatura de secado. El Gráfico 3.1 también demuestra el modelo Logarítmico a las diferentes temperaturas del experimento y en la Tabla A.2 se presentan los coeficientes para definir la ecuación del modelo.

Otros estudios realizan el modelamiento matemático de la cinética de secado, como (Faustino et al., 2007) que obtiene que el modelo de Page es el que representa el

secado de pimientos verdes a temperaturas entre 30 °C y 70 °C. (Cuevas et al., 2019) concluye que el modelo de Page se ajusta a la cinética de secado de semillas de olivo entre los 70 °C a 120 °C.

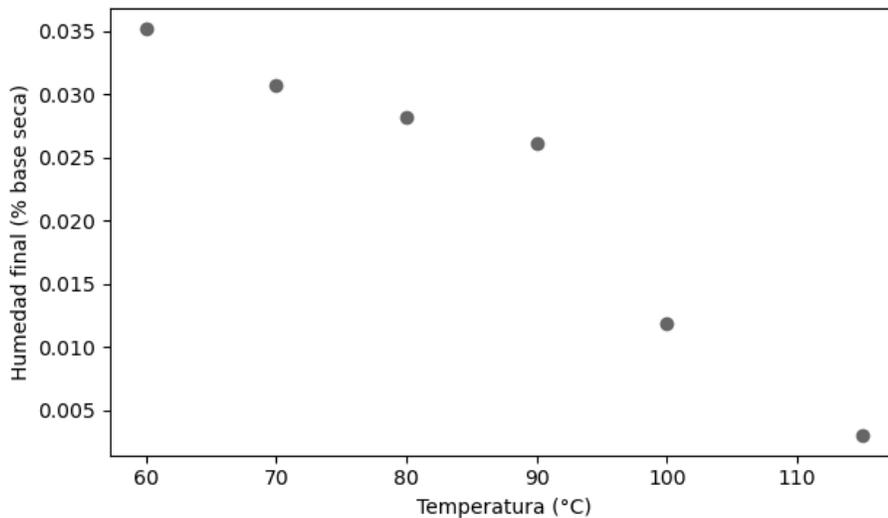
### **3.4. Condiciones óptimas de secado**

Para determinar la temperatura de secado y tiempo óptimo hay que identificar los principales requerimientos de humedad en el proceso de producción de biodiésel.

Diferentes autores concuerdan que el contenido de agua en el aceite debe ser menor al 0.06% m/m (Atadashi et al., 2012), valor en el que se lo considera como una materia prima de calidad para producir biodiésel. Este requerimiento ocurre para favorecer la transesterificación frente a las otras reacciones posibles, en las que puede llevar a la formación de jabones y la hidrólisis de los triglicéridos. Además, la humedad del aceite es importante porque en el reactor no solo hay agua proveniente de la fritura de alimentos, sino que también se encontrará el agua que se forma en la reacción preliminar entre el KOH y el MeOH. Por lo tanto, controlar este parámetro en el aceite es fundamental si el objetivo es producir biodiésel con alto rendimiento.

En la Gráfica 3.2 se observa que la humedad final del aceite es diferente en cada temperatura de secado, tendiendo a disminuir desde 60 °C a 115 °C. Este comportamiento se debe principalmente a la humedad equilibrio, que representa la humedad mínima que alcanzan los materiales a determinadas condiciones del ambiente (temperatura y humedad), así como al espesor del material.

**Gráfica 3.2** Humedad final en el secado a diferentes temperaturas

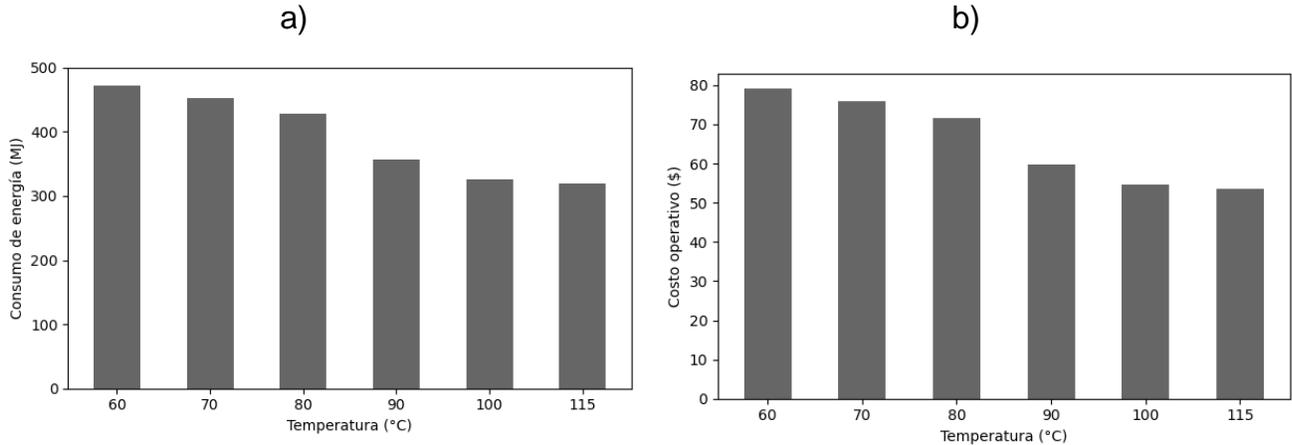


El uso de aire caliente como parte del secado emplea los mecanismos de conducción y convección, en el que simultáneamente se presenta una transferencia de la humedad en forma de vapor hacia el aire insaturado. La temperatura de secado influye en las presiones parciales del agua en el aire y el aceite, que al igualarse, detiene la transferencia de humedad al aire (Srikiatden & Roberts, 2007). Por esto, la humedad final del aceite no será la misma entre las diferentes temperaturas.

Para todas las temperaturas, se cumple que la humedad final es menor al 0.06 % m/m requerido. Por lo tanto, se realizó un análisis de costos operativos y energético que implica esta etapa para cada una de las temperaturas.

La Tabla B.1 presenta el flujo de aire, tiempo mínimo de secado, razón A/GC, el flujo de gases de combustión y la energía consumida durante el tratamiento de 200 kg/h de aceite. La Gráfica 3.3 presenta los costos operativos y energéticos durante la operación.

**Gráfica 3.3** Costos a) operativos y b) energéticos del secado a diferentes temperaturas



En la Tabla B.1 se observa que GC aumenta con el incremento de la temperatura, lo que ocurre principalmente porque al requerir menos tiempo de secado, el flujo de aire caliente es mayor y por ende también lo será GC. Esto resulta en que el cambio de temperatura de 60 °C a 115 °C pueda generar un ahorro de energía hasta del 32%, de acuerdo a la Gráfica 3.3 a). La Gráfica 3.3 b) presenta que los costos operativos pueden disminuir desde \$79.04 hasta \$53.50 al aumentar la temperatura de secado.

Un estudio previo (Myllymaa et al., 2019) analiza el efecto de las condiciones de operación de un secador y concluye que la mayor temperatura del aire es la que genera menos costos operativos. Además, recomienda recuperar el calor del aire a la salida o recircular parcialmente el aire para disminuir los costos.

Estudios previos presentan el mismo pretratamiento para el aceite usado (filtración y secado), en el que se ha reportado temperaturas de secado desde 60 °C (Mohadesi et al., 2019b) hasta 105 °C (Kara et al., 2018), siendo las adecuadas para producir biodiésel. Por lo que no se considera factible considerar el secado a 115 °C como el óptimo ya que puede afectar la calidad del aceite para producir biodiésel.

Finalmente, se establece que la temperatura más adecuada para realizar el secado es a 100 °C y a un tiempo de 1 hora, en el que se estaría ahorrando un 30.92% de costos operativos que si se hiciera a 60 °C.

### 3.5. Análisis económico

Para el análisis económico, se determinaron condiciones de las corrientes del proceso de la Figura 2.3, las cuales se observa en la Tabla C.1. Los costos de los intercambiadores, tanques y reactor fueron tomados de un estudio previo (Castro Jaime, 2021).

Las especificaciones consideradas en para el secador se presenta en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Especificaciones de equipos involucrados en el secador

<b>ID</b>	<b>Área de transferencia</b>	<b>Material</b>	<b>Costo</b>
D-101	5 m <sup>2</sup>	SS	\$ 340000

En base a estas consideraciones, la Tabla 3.4 presenta los resultados del análisis económico.

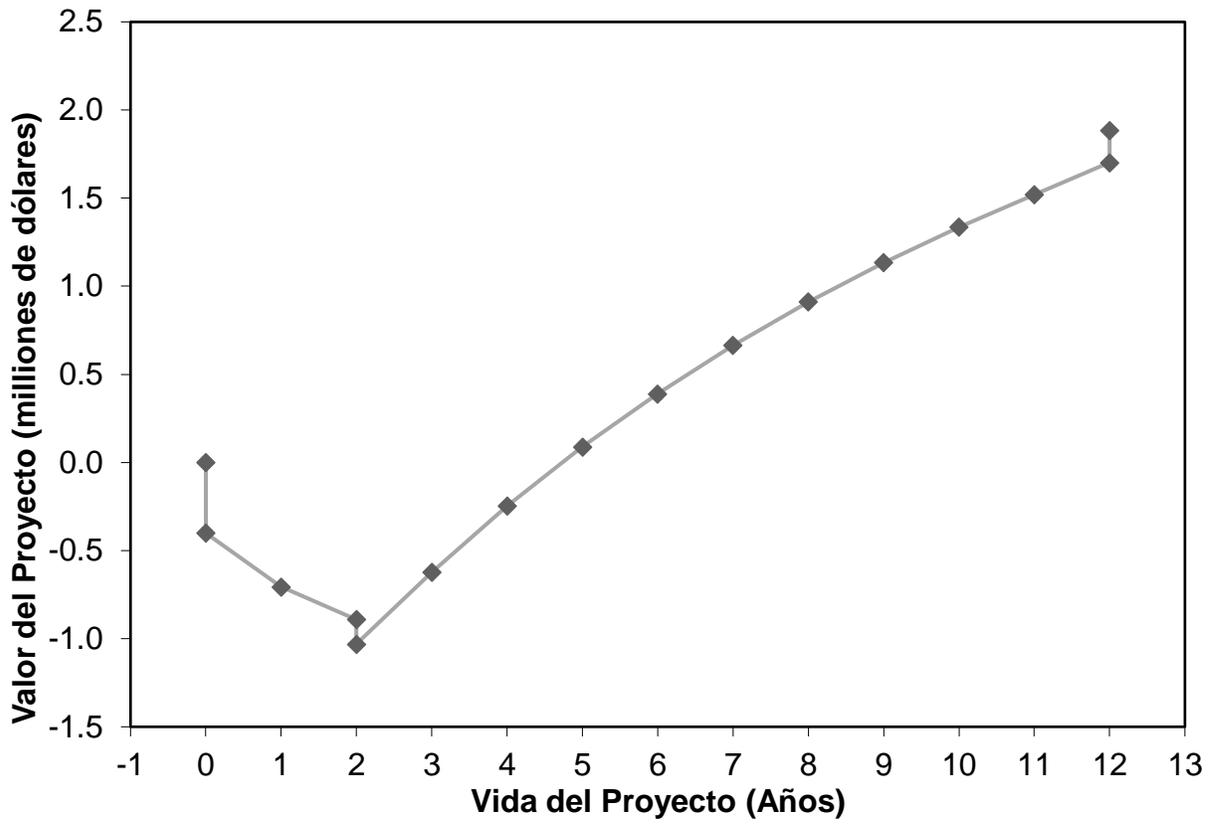
**Tabla 3.5** Resultados de análisis económico

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Inversión Inicial estimada	\$1.13 M
TIR	86.03 %
VAN	\$ 1.88 M
Período de recuperación	14 meses

Con estos resultados, el proyecto requiere una inversión inicial de \$1.13 M, que podrá recuperarse en 14 meses desde inicio de las operaciones.

La Gráfica 3.4 presenta el flujo de caja del proceso para los 12 años de operación, considerando que el período de construcción es de 2 años.

**Gráfica 3.4** Análisis de flujo de caja



# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

Se caracterizó un aceite usado de frituras proveniente de una industria de alimentos y se obtuvo que presentaba una acidez de 3.76% y una humedad de 0.133%. Esto llevó a definir que la producción de biodiésel es posible con una transesterificación directa y un pretratamiento de secado para la remoción de agua.

Se diseñaron las curvas de secado del aceite usado de frituras a escala laboratorio, a temperaturas entre 60 °C y 115 °C para determinar las condiciones que disminuyan los costos de la operación. Se determinó que el modelo logarítmico fue el de mejor ajuste, con el que se obtuvo que las condiciones más adecuadas para reducir los costos operativos son a 100 °C y un tiempo de 1 hora. Esto representó un ahorro en gastos energéticos del 30.92% con respecto a 60 °C.

Se demostró que producir biodiésel es factible y se obtuvo un rendimiento del 89.02%, cercanos a los obtenidos en bibliografía a condiciones de entrada de relación molar 6:1 de metanol: aceite, 1% de KOH, 60 °C y 1 hora de reacción. Se obtuvo que el biodiésel producido cumple con todos los parámetros fisicoquímicos que estuvieron dentro del alcance de este proyecto, al ser comparados con las normas EN 14214 y ASTM D6751. Esto hace que el biodiésel a partir de aceite usado sea capaz de reemplazar al diésel convencional.

El análisis económico para evaluación de costos indicó que la construcción de una planta de biodiésel que trate 200 kg/h de aceite usado de frituras requiere una inversión de \$1.13 millones y puede ser recuperado en 14 meses desde el inicio de las operaciones.

## **4.2. Recomendaciones**

Se recomienda la implementación de técnicas cromatográficas para la caracterización química de los productos de la transesterificación como los ésteres metílicos del biodiésel y glicerina.

Además, es conveniente realizar un diseño experimental de la producción de biodiésel para evaluar diferentes relaciones molares metanol:aceite, dosis de catalizador, tiempo de reacción, temperatura de reacción y humedad del aceite. Esto contribuirá a encontrar la combinación de variables de entrada que maximice el rendimiento del biodiésel.

Finalmente, se aconseja evaluar la cinética de secado variando espesor del aceite y velocidad de secado, lo que ayudará en la determinación de las condiciones de operación óptimas en el secador.

# BIBLIOGRAFÍA

- Alias, N. I., Kumar, J., Jayakumar, A. / L., & Zain, S. M. (2018). Characterization of Waste Cooking Oil for Biodiesel Production (Pencirian Sisa Minyak Masak untuk Penghasilan Biodisel). *Jurnal Kejuruteraan SI*, 1(2), 79–83.  
<http://dx.doi.org/10.17576/jkukm-2018-si1>
- Amigun, B. (2008). Predicting the costs of biodiesel production in Africa : learning from Germany. *Energy for Sustainable Development*, 12(1), 5–21.  
[https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60415-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60415-9)
- AOAC INTERNATIONAL. (1995). *Fatty acids in encapsulated fish oils and fish*.
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Abdul Aziz, A. R., & Sulaiman, N. M. N. (2012). The effects of water on biodiesel production and refining technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3456–3470.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.004>
- Bart, J. C. J., Palmeri, N., & Cavallaro, S. (2010). Emerging new energy crops for biodiesel production. *Biodiesel Science and Technology*, 226–284.  
<https://doi.org/10.1533/9781845697761.226>
- British Standard Institution. (2010). Automotive fuels — Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines — Requirements and test methods. *British Standard Institution*, 22.  
<http://agrifuelsqcs-i.com/attachments/1598/en14214.pdf>
- Canning, P., Rehkamp, S., & Waters, A. (2017). *The Role of Fossil Fuels in the U.S. Food System and the American Diet. January 2017, 2007–2008*.
- Castro Jaime, N. A. (2021). *Diseño conceptual de planta productora de biodiésel de aceite usado mediante la simulación del proceso*.
- Cordero-Ravelo, V., & Schallenberg-Rodriguez, J. (2018). Biodiesel production as a solution to waste cooking oil (WCO) disposal. Will any type of WCO do for a

- transesterification process? A quality assessment. *Journal of Environmental Management*, 228(November 2017), 117–129.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.106>
- Corral Bobadilla, M., Lostado Lorza, R., Escribano García, R., Somovilla Gómez, F., & Vergara González, E. P. (2017). An Improvement in Biodiesel Production from Waste Cooking Oil by Applying Thought Multi-Response Surface Methodology Using Desirability Functions. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en10010130>
- Cuevas, M., Martínez-Cartas, M. L., Pérez-Villarejo, L., Hernández, L., García-Martín, J. F., & Sánchez, S. (2019). Drying kinetics and effective water diffusivities in olive stone and olive-tree pruning. *Renewable Energy*, 132, 911–920.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.053>
- Dimian, A. C., & Kiss, A. A. (2019). Eco-efficient processes for biodiesel production from waste lipids. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118073.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118073>
- Encinar, J. M., González, J. F., & Rodríguez-Reinares, A. (2005). Biodiesel from used frying oil. Variables affecting the yields and characteristics of the biodiesel. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(15), 5491–5499.  
<https://doi.org/10.1021/ie040214f>
- Energy Environment and Technology Research Centre, (CIEMAT). (2006). Life cycle analysis of alternative fuels for transport. Phase II. Biodiesel and Diesel life cycle comparison (Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase II Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiésel y Diése. *CIEMAT*.
- Faustino, J. M. F., Barroca, M. J., & Guiné, R. P. F. (2007). Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. *Food and Bioproducts Processing*, 85(3 C), 163–170. <https://doi.org/10.1205/fbp07009>
- Foerster, M., Woo, M. W., & Selomulya, C. (2016). Single Droplet Drying. In *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.21154-2>
- García-Martín, J. F., Barrios, C. C., Alés-Álvarez, F. J., Dominguez-Sáez, A., & Alvarez-Mateos, P. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil in an oscillatory flow reactor. Performance as a fuel on a TDI diesel engine. *Renewable Energy*, 125, 546–

556. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.002>

Ghandi, A., Adhikari, B., & Powell, I. B. (2013). Powders containing microorganisms and enzymes. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties* (Issue 2004). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857098672.3.593>

Gómez, F. J., Cruz, D., Palomar, J. M., Quetzalcoatl, C., & Escobedo, H. (2020). Experimental studies on mass transfer during convective drying of spent coffee grounds generated in the soluble coffee industry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09600-3>

Haizam, A., Tarmizi, A., Lin, S. W., & Kuntom, A. (2008). *Palm-Based Standard Reference Materials for Iodine Value and Slip Melting Point*. 603, 127–133.

Henderson, S. M. (1961). Grain Drying Theory (I) Temperature Effect on Drying Coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*.

Hidalgo-Crespo, J., Coello-Pisco, S., Crespo-Vaca, T., Amaya, J. L., Soto, M., Jervis, F. X., & Moreira, C. M. (2020). Waste to Energy Potential of Domestic Waste Cooking Oil in Guayaquil : A review. *18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1–7.

Hsiao, M.-C., Liao, P.-H., Lan, N. V., & Hou, S.-S. (2021). Enhancement of Biodiesel Production from High-Acid-Value Waste Cooking Oil via a Microwave Reactor Using a Homogeneous Alkaline Catalyst. *Energies*, 14(2), 437. <https://doi.org/10.3390/en14020437>

Instituto Ecuatoriano de Normalización, I. (2013a). *NTE INEN 1982: Determinación Del Punto De Ecurrimiento. Productos De Petróleo. First Edit*, 7–12.

Instituto Ecuatoriano de Normalización, I. (2013b). NTE INEN 808: Determinación del punto de inflamación y fuego en copa abierta Cleveland. Productos derivados del petróleo. *Instituto Ecuatoriano de Normalización, First Edit*, 7–12. [https://gestionambiental.pastaza.gob.ec/biblioteca/legislacion-ambiental/patrimonio\\_natural/nte\\_inen\\_2176\\_1\\_agua\\_calidad\\_agua\\_muestreo\\_tecnicas\\_muestreo.pdf](https://gestionambiental.pastaza.gob.ec/biblioteca/legislacion-ambiental/patrimonio_natural/nte_inen_2176_1_agua_calidad_agua_muestreo_tecnicas_muestreo.pdf)

Instituto Ecuatoriano de Normalización, I. (2015). NTE INEN 2903: Determinación de la densidad, densidad relativa o gravedad API. Método del hidrómetro. Petróleo y

productos derivados de petróleo. *Annual Book of INEN, VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE PASAJEROS INTRARREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIA. REQUISITOS*, 34.

Jalkh, R., El-Rassy, H., Chehab, G. R., & Abiad, M. G. (2018). Assessment of the Physico-Chemical Properties of Waste Cooking Oil and Spent Coffee Grounds Oil for Potential Use as Asphalt Binder Rejuvenators. *Waste and Biomass Valorization*, 9(11), 2125–2132. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9984-z>

Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-lehtonen, J., Korhonen-kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., & Schösler, H. (2016). *Transition towards Circular Economy in the Food System*. <https://doi.org/10.3390/su8010069>

Kara, K., Ouanji, F., Lotfi, E. M., Mahi, M. El, Kacimi, M., & Ziyad, M. (2018). Biodiesel production from waste fish oil with high free fatty acid content from Moroccan fish-processing industries. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(2), 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.07.010>

Karmee, S. K. (2016). Liquid biofuels from food waste: Current trends, prospect and limitation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 945–953. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.041>

Lewis, W. K. (1921). The Rate of Drying of Solid Materials. *Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 427–432.

López, D. E., Goodwin, J. G., Bruce, D. A., & Lotero, E. (2005). Transesterification of triacetin with methanol on solid acid and base catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 295(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2005.07.055>

Mba, O. I., Dumont, M. J., & Ngadi, M. (2015). Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry - A review. *Food Bioscience*, 10(April 2018), 26–41. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.01.003>

Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513.

Mohadesi, M., Aghel, B., Maleki, M., & Ansari, A. (2019a). Production of biodiesel from waste cooking oil using a homogeneous catalyst: Study of semi-industrial pilot of microreactor. *Renewable Energy*, 136, 677–682.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.039>

Mohadesi, M., Aghel, B., Maleki, M., & Ansari, A. (2019b). Production of biodiesel from waste cooking oil using a homogeneous catalyst: Study of semi-industrial pilot of microreactor. *Renewable Energy*, *136*, 677–682.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.039>

Myllymaa, T., Holmberg, H., & Ahtila, P. (2019). Techno-economic evaluation of biomass drying in moving beds: The effect of drying kinetics on drying costs. *Drying Technology*, *37*(10), 1201–1214.

Nelson-Smith, A. (1971). The problem of oil pollution of the sea. *Advances in Marine Biology*, *8*(C), 215–306. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60493-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60493-9)

Page, G. (1998). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, *130*(2), 556.

Phan, A. N., & Phan, T. M. (2008). Biodiesel production from waste cooking oils. *Fuel*, *87*(17–18), 3490–3496. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.07.008>

Posada-Duque, J. A., & Cardona-Alzate, C. A. (2010). Análisis de la refinación de glicerina obtenida como coproducto en la producción de biodiésel. *Ingeniería y Universidad*, *14*(1), 9–28.

Sahar, Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H. N., Nouren, S., Habib-ur-Rehman, Nisar, J., & Iqbal, M. (2018a). Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, *41*(May), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.037>

Sahar, Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H. N., Nouren, S., Habib-ur-Rehman, Nisar, J., & Iqbal, M. (2018b). Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. *Sustainable Cities and Society*, *41*, 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.037>

Sanli, H., Canakci, M., & Alptekin, E. (2011). Characterization of Waste Frying Oils Obtained from Different Facilities. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, *57*, 479–485. <https://doi.org/10.3384/ecp11057479>

Sarkar, D. K. (2015). Fuels and Combustion. In *Thermal Power Plant*.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801575-9.00003-2>

- Sarno, M., & Juliano, M. (2019). Biodiesel production from waste cooking oil. *Green Process Synth*, 828–836.
- Satyarthi, J. K., Srinivas, D., & Ratnasamy, P. (2011). Hydrolysis of vegetable oils and fats to fatty acids over solid acid catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 391(1–2), 427–435. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.03.047>
- Slorach, P. C., Jeswani, H. K., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Environmental and economic implications of recovering resources from food waste in a circular economy. *Science of the Total Environment*, 693, 133516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.322>
- Sodhi, A. K., Tripathi, S., & Kundu, K. (2017). Biodiesel production using waste cooking oil: a waste to energy conversion strategy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(6), 1799–1807. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1357-6>
- Soly, A., Alias, M. P., Iype, M. P., Jolly, J., Sankar, V., Babu, K. J., & Baby, D. K. (2021). Proceedings Optimization of biodiesel production by transesterification of palm oil and evaluation of biodiesel quality. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1002–1007. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.995>
- Srikiatden, J., & Roberts, J. S. (2007). Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. *International Journal of Food Properties*, 10(4), 739–777. <https://doi.org/10.1080/10942910601161672>
- Tan, Y. ., Ainic, K., Slew, W. L., Mohtar, Y., & Chong, C. L. (2000). Estudio del PORIM sobre el aceite de palma crudo -97/98. Características de calidad e identidad\*. *PORIM Technology*, 21(22), 39–56.
- Thushari, I., & Babel, S. (2018). Sustainable utilization of waste palm oil and sulfonated carbon catalyst derived from coconut meal residue for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 248, 199–203. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.106>
- Togrul, I. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209–216.
- Tsai, W. T. (2019). Mandatory recycling of waste cooking oil from residential and

commercial sectors in Taiwan. *Resources*, 8(1).

<https://doi.org/10.3390/resources8010038>

Turton, R., Shaeiwitz, J. A., Bhattacharyya, D., & Whiting, W. B. (2018). *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes* (Fifth). Prentice Hall.

Yeom, S. H., & Go, Y. W. (2018). Optimization of a Novel Two-step Process Comprising Re-esterification and Transesterification in a Single Reactor for Biodiesel Production Using Waste Cooking Oil. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 23(4), 432–441. <https://doi.org/10.1007/s12257-018-0209-5>

# APÉNDICES

## APÉNDICE A: MODELADO MATEMÁTICO DE CURVAS DE SECADO

Tabla A.1 Coeficientes  $R^2$  y RMSE por modelo matemático

Modelo	T (°C)	$R^2$	RMSE
Henderson y Pabis	60	0.8370	0.1130
	70	0.8993	0.0921
	80	0.7608	0.1482
	90	0.8223	0.1390
	100	0.9666	0.0669
	115	0.9972	0.0226
Page	60	0.9930	0.0235
	70	0.9906	0.0282
	80	0.9951	0.0212
	90	0.9925	0.0286
	100	0.9836	0.0468
	115	0.9997	0.0073
Lewis	60	0.8291	0.1157
	70	0.9031	0.0903
	80	0.7875	0.1397
	90	0.8531	0.1264
	100	0.9732	0.0598
	115	0.9979	0.0196

<b>Logarítmico</b>	60	0.9843	0.0350
	70	0.9950	0.0205
	80	0.9968	0.0172
	90	0.9994	0.0080
	100	0.9977	0.0175
	115	0.9985	0.0165
<b>Midilli et al.</b>	60	0.9946	0.0207
	70	0.9955	0.0194
	80	0.9993	0.0078
	90	0.9992	0.0091
	100	0.9976	0.0178
	115	0.9995	0.0099
<b>Gaussiano de 2 términos</b>	60	0.8771	0.0981
	70	0.9746	0.0463
	80	0.9976	0.0148
	90	0.9971	0.0016
	100	1.0000	0.0163
	115	0.9997	0.0003

**Tabla A.2** Coeficientes para el modelo Logarítmico

<b>T (°C)</b>	<b>a</b>	<b>k</b>	<b>c</b>
60	0.7598	0.04806	0.2297
70	0.7968	0.05867	0.2002
80	0.7812	0.07748	0.1836
90	0.8292	0.1498	0.1704
100	0.9234	0.1637	0.0775
115	0.9798	0.2352	0.0200

## APÉNDICE B: TABLA DE UTILIDADES EN SECADO

**Tabla B.1** Consumo de utilidades en secado a diferentes temperaturas

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Aire (kg/h)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>A/CG (m/m)</b>	<b>CG (kg/h)</b>
60	3640.269	3.122	5.942	718.732
70	3762.449	2.328	4.621	924.279
80	3831.201	1.799	3.779	1129.949
90	3885.872	1.270	3.197	1335.763
100	4270.636	1.005	2.770	1541.729
115	4508.784	0.820	2.307	1851.028

## APÉNDICE C: TABLA DE CORRIENTES

**Tabla C.1** Tabla de corrientes del proceso

Corriente	Sustancias	Flujo (kg/h)	Temperatura (°C)	Presión (atm)
1	KOH	1.95	25	1
2	MeOH	53.97	25	1
3	MeOK - H <sub>2</sub> O	55.93	3	1
4	MeOK - H <sub>2</sub> O	55.93	60	1
5	Aceite usado	200.00	25	1
6	Aceite usado	195.20	25	1
7	GC	1541.75	283	4.93
8	GC	1541.75	112	4.93
9	Aire	4270.64	25	1
10	Aire	4270.64	100	1
11	Aire + H <sub>2</sub> O	4270.66	100	1
12	Aceite	195.18	25	1
13	Aceite	195.18	60	1
14	Biodiésel - Glicerina - MeOH - KOH	251.10	60	1
15	Metanol	29.95	25	1
16	Glicerol - Biodiésel - KOH	221.16	25	1
17	Glicerol	46.38	25	1
18	Biodiésel - KOH	174.78	25	1
19	Agua	347.49	25	1
20	Agua	347.49	25	1
21	Agua - KOH	348.28	25	1
22	Biodiésel - H <sub>2</sub> O	173.99	25	1
23	Biodiésel	173.75	25	1

## APÉNDICE D: FLUJO DE CAJA

Tabla D.1 Flujo de caja

Year	Investment	$d_k$	$FCI_L - Sd_k$	R	$COM_d$	$(R - COM_d - d_k) * (1 - t) + d_k$	Cash Flow (Non- discounted)	Cash Flow (discounted)	Cumulative Cash Flow (discounted)	Cumulative Cash Flow (Non- discounted)
0	0.00		0.56				0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.40		0.56				(0.40)	(0.40)	(0.40)	(0.40)
1	0.34		0.56				(0.34)	(0.31)	(0.71)	(0.74)
2	0.22		0.56				(0.22)	(0.19)	(0.89)	(0.96)
2	0.17		0.56				(0.17)	(0.14)	(1.03)	(1.13)
3		0.11	0.45	3.45	2.84	0.54	0.54	0.41	(0.62)	(0.59)
4		0.18	0.27	3.45	2.84	0.55	0.55	0.38	(0.25)	(0.04)
5		0.11	0.16	3.45	2.84	0.54	0.54	0.34	0.09	0.50
6		0.06	0.10	3.45	2.84	0.53	0.53	0.30	0.39	1.04
7		0.06	0.03	3.45	2.84	0.53	0.53	0.27	0.66	1.57
8		0.03	-	3.45	2.84	0.53	0.53	0.25	0.91	2.10
9			-	3.45	2.84	0.52	0.52	0.22	1.13	2.63
10			-	3.45	2.84	0.52	0.52	0.20	1.34	3.15
11			-	3.45	2.84	0.52	0.52	0.18	1.52	3.68
12			-	3.45	2.84	0.57	0.57	0.18	1.70	4.25
12							0.57	0.18	1.88	4.82