

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño conceptual de planta productora de biodiésel de aceite usado
mediante la simulación del proceso

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Nelson Arturo Castro Jaime

GUAYAQUIL-ECUADOR

Año:2021

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres, mi hermana y mi tía que han estado apoyándome desde el inicio de mi carrera. Sin su apoyo, no hubiera podido completar esta fase tan importante de mi vida.

A los profesores que me guiaron en el transcurso de mis estudios y que gracias a ellos pude adquirir todo el conocimiento necesario para culminar esta etapa.

Finalmente, a todos aquellos compañeros que me ayudaron en estos 5 años de estudio. Mis compañeros de proyectos, los amigos que conocí desde el primer semestre y aquellos que ya no están presentes en mi vida, gracias por apoyarme en mi camino para ser profesional

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mis tutores de tesis, la Ing. Diana Tinoco y la Ing. Andrea Barcia por sus aportes para la culminación de este proyecto.

También, agradezco al Ing. Tyrone Alcívar y a la Ing. Maribel Jaramillo que permitieron culminar la parte experimental de mi proyecto en los laboratorios de la facultad y me guiaron ante cualquier duda que tenía.

Finalmente, agradezco también a mi madre y hermana que me ayudaron económicamente durante este semestre.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *(nombre de los participantes)* y doy(damos) mi(nuestro) 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”



Nelson Arturo Castro J.

Nelson Arturo Castro
Jaime

EVALUADORES

Ing. Nadia Flores

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Andrea Barcia

PROFESOR TUTOR

Ing. Diana Tinoco

PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

El agotamiento de combustibles fósiles ha ocasionado que se busquen fuentes alternativas de energía, siendo el biodiésel derivado de aceites residuales una de las principales opciones. No obstante, en nuestro país su síntesis es un tema que necesita aún de investigaciones para conocer parámetros importantes para su producción. El presente estudio busca establecer el diseño básico de un sistema de producción a partir de aceite de frituras, determinando las condiciones de operación mediante la caracterización experimental del aceite y la simulación del proceso.

El proyecto se dividió en tres fases, primero se realizó la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del aceite mediante las metodologías propuestas por las normativas INEN, posteriormente se simuló y realizó un análisis paramétrico usando ASPEN PLUS V.12.0, finalmente se determinó la factibilidad económica del proyecto mediante CAPCOST.

Se determinó que el proceso más adecuado era uno de síntesis directa dado a la acidez media de la materia prima, mientras que, de la simulación se obtuvo que por cada 200 kg/h de materia prima se obtenía 194 kg/h de producto final usando un ratio molar metanol-agua de 6:1 y una temperatura de reacción de 60 °C. El análisis económico mostró que el proceso era factible para un período de 10 años, recuperándose lo invertido en un año después de la construcción.

De este estudio, se concluye que el análisis realizado a este proyecto lo vuelven rentable y además factible para la reutilización de gran parte del aceite, siendo el uso del simulador una valiosa herramienta para evaluar estos procesos en futuros escenarios.

Palabras Claves: simulación, biodiésel, aceite usado

ABSTRACT

Fossil fuel shortage and global warming have caused the search for alternative energy fuels, being waste-oil biodiesel one of the principal current options. Nevertheless, in our country, third-generation biodiesel production is a recent process that needs more research to determine operational conditions. This project aims to define the basic design of waste-oil biodiesel plants, determining the process parameters by experimental characterization and simulation.

The project was divided into three parts. First, it was performed the experimental characterization of physical-chemical properties using INEN proposed steps, after a simulation and an operational analysis was carried out using ASPEN PLUS V 12.0, finally, an economic analysis was performed using CAPCOST.

It was established that the most suitable process was a direct synthesis due to the medium acidity of raw material. From the simulation, the results showed that for 200 kg/h of used oil, 194 kg/h of product is obtained using process conditions of 6:1 alcohol molar ratio, 60 °C temperature reaction. Economic analysis showed the feasibility of the process for a 10-year period, recovering the initial investment in one year after the plant installment.

From this study, it is concluded that the present results shown that the project is feasible and suitable to reuse waste cooking oil, being the simulator use an important tool to evaluate these processes for future stages.

Key Words: *simulation, biodiesel, waste cooking oil*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Justificación del problema	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. General	2
1.3.2. Específicos	2
1.4. Marco teórico.....	3
1.4.1. Biocombustibles.....	3
1.4.2. Biodiésel	3
1.4.3. Generaciones de biodiésel.....	5
1.4.4. Métodos usados para la síntesis de biodiésel	7
CAPÍTULO 2.....	10
2. Metodología	10
2.1. Análisis Experimental	10
2.1.1. Caracterización del aceite	10

2.2.	Estudio bibliográfico	13
2.2.1.	Composición porcentual del aceite.....	13
2.2.2.	Cinética de la reacción.....	14
2.2.3.	Selección del proceso	16
2.3.	Simulación y análisis	16
2.3.1.	Simulación	16
2.3.2.	Análisis operacional y validación.....	17
2.3.3.	Dimensionamiento de equipos	19
2.3.4.	Análisis económico	19
CAPÍTULO 3.....		22
3.	RESULTADOS.....	22
3.1.	Resultados de análisis experimental	22
3.2.	Resultados de revisión bibliográfica	23
3.3.	Descripción del sistema propuesto	25
3.4.	Resultados de análisis paramétrico	27
3.5.	Resultados de simulación.....	29
3.6.	Resultados de análisis económico.....	30
CAPÍTULO 4.....		33
4.	Conclusiones y recomendaciones	33
4.1.	Conclusiones.....	33
4.2.	Recomendaciones.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....		35
APÉNDICES.....		39
APÉNDICE A: TRIGLICÉRIDOS HECHOS EN CHEMSKETCH		39
APÉNDICE B: TABLA DE CORRIENTES		40
APÉNDICE C: FLUJO DE CAJA		41

ABREVIATURAS

POP	1,3-dpalmitoil-2-oleil glicerol
POO	1-palmitoil-2,3-oleil glicerol
PLO	1-palmitoil-2-oleil-3-oleil glicerol
PLP	1,3-dipalmitoil-2-linoleil glicerol
PPP	Tripalmitina
MeOH	Metanol
TIR	Tasa interna de retorno
VAN	Valor actual neto

SIMBOLOGÍA

Kg	Kilogramo
KJ	KiloJoules
J	Joules
L	Litros
mg	Miligramos
m/m	Fracción masa/masa
v/v	Fracción volumen/volumen
mol/mol	Fracción mol/mol
Gal	Galón
NaOH	Hidróxido de sodio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Resumen de las distintas generaciones de aceites y principales ejemplos	6
Figura 1.2 Reacción de transesterificación de los triglicéridos	7
Figura 1.3 Reacción de saponificación de competencia.....	8
Figura 2.1 Resumen de la metodología a seguir para el diseño del proceso de producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado	10
Figura 2.2 Molécula del triacilglicérido POO diseñada mediante la aplicación ChemSketch	14
Figura 2.3 Set de reacciones generales que se producen durante la síntesis del biodiesel	14
Figura 2.4 Árbol de decisiones con respectivo método seleccionado.....	17
Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso.....	26
Figura A.1 Molécula POP.....	39
Figura A.2 Molécula POO	39
Figura A.3 Molécula PLO	39
Figura A.4 Molécula PLP	39

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico 3.1. Resultados de procesos de pretratamiento más usados.....	24
Gráfico 3.2 Resultados de procesos de postratamiento más usados	25
Gráfico 3.3 Conversión másica de aceite vs radio molar.....	27
Gráfico 3.4 Conversión másica de aceite vs temperatura	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros que debe cumplir el biodiésel según las normativas ASTM Y EN 14214.....	5
Tabla 2.1 Principales triacilglicéridos presentes en los derivados del aceite de palma y su composición porcentual estimada.....	13
Tabla 2.2 Parámetros cinéticos utilizados para la simulación.....	15
Tabla 2.3 Valores de radio molar usados para el análisis operacional y resultados experimentales	18
Tabla 2.4 Valores de temperatura usados para el análisis operacional y resultados experimentales	19
Tabla 3.1 Resultados de pruebas realizadas a la muestra de aceite.....	22
Tabla 3.2 Comparación de resultados a aquellos obtenidos experimentalmente	28
Tabla 3.3 Comparación de resultados a aquellos obtenidos experimentalmente	29
Tabla 3.4 Propiedades de relevancia del producto final	30
Tabla 3.5 Especificaciones de los intercambiadores de calor del sistema.....	30
Tabla 3.6 Especificaciones del reactor del sistema.....	30
Tabla 3.7 Especificaciones de los contenedores del sistema	31
Tabla 3.8 Resultados de análisis económico	31
Tabla B.1 Tabla de corrientes del proceso	40
Tabla C.1 Flujo de caja.....	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

La generación de desechos oleaginosos derivados del uso excesivo de aceites vegetales en el procesamiento de frituras a nivel industrial representa una problemática ambiental en nuestro país, dado que el 54% de estos residuos se desechan a vertederos, causando un daño ecológico al medio circundante (Andrade and Moncada 2020).

Además, estas industrias, como las que procesan plátanos o patatas fritas, disponen de estos residuos por medio de compañías externas, acción que resulta en un gasto adicional. Esto se debe a que la reutilización directa de estos residuos implica un previo tratamiento de refinación de aceites que puede resultar más costoso que la simple disposición final.

Estos problemas que presentan las compañías alimenticias actuales frente al tratamiento del aceite usado, se derivan a su vez de la inexistencia de políticas orientadas a la reutilización de los residuos dentro del proceso. Por ejemplo, su uso para la producción de materias primas como biocombustibles o su tratamiento para la reutilización dentro del proceso.

1.2. Justificación del problema

En el Ecuador, el consumo de energías renovables hasta el 2018 fue de apenas del 16,3% según cifras oficiales publicadas por el portal de las Naciones Unidas (ONU 2019). Esto se debe a que, a pesar de que el país posee fuentes de producción de biocombustibles, no se ha desarrollado masivamente esta industria. De entre los pocos biocarburos producidos en Ecuador, el biodiésel se produce en apenas 2 plantas y la materia prima para su obtención es principalmente el aceite de palma. Uno de los motivos es que no se ha explorado otras alternativas de obtención a nivel industrial como el uso de aceites vegetales usados, lo cual ha limitado bastante la producción nacional (Escobar 2014). Por ende, la reutilización de residuos de aceite vegetal usado para

obtener biodiésel representa un nuevo desafío para la industria ecuatoriana, que estaría a su vez enmarcado en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por las Naciones Unidas, dado que, en muchos casos, la disposición de los mismos suele conllevar un impacto ambiental significativo.

Dado que el uso de residuos para la producción de biodiésel puede ocasionar problemas de calidad en el producto final, los estudios revisados entre el 2018 y el 2020 sugieren el uso de técnicas de pretratamiento ácido; sin embargo, estos procesos previos pueden resultar más costosos de lo que implica la disposición final (Liu, Yang, and Zhu 2021). Al contrario, otras investigaciones sugieren el uso de un proceso directo de generación de biodiésel y proponen que se realicen estudios sobre parámetros de la reacción para mejorar la eficiencia, además de mejores técnicas de postratamiento.

Por lo tanto, la aplicación del uso de un software de simulación para realizar un análisis paramétrico sobre el proceso representa una gran ventaja en la mejora del mismo, dado que se permitiría conocer las condiciones más adecuadas para maximizar la eficiencia sin la necesidad de recurrir a múltiples estudios experimentales.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Diseñar un proceso para la obtención de biodiésel a partir del aceite usado de frituras de plátano mediante el análisis de las propiedades fisicoquímicas del aceite y la simulación de la planta de producción del biocombustible.

1.3.2. Específicos

1. Determinar experimentalmente las propiedades fisicoquímicas de la materia prima para la definición del proceso más adecuado de obtención de biodiésel.
2. Realizar una simulación del proceso mediante el uso de un software especializado para la determinación de las condiciones del proceso y datos relevantes al diseño.

3. Estimar el costo que implicará el diseño de la línea de producción del proceso de obtención de biodiésel y sus gastos de operación mediante un análisis económico.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Biocombustibles

La biomasa, materia orgánica derivada de productos agrícolas o animales, es considerada la cuarta fuente principal de energía disponible y además económica, en comparación con los combustibles fósiles (Gaurav et al. 2017) .

De la biomasa y de sus desechos se derivan los biocombustibles, productos que se usan en conjunto con derivados de petróleo, para proporcionar energía a motores de combustión y calderas. Estos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos y entre los principales se encuentra el bioetanol, biometanol, biogás y el biodiésel. Estos biocombustibles presentan varias ventajas respecto a los convencionales, las cuales son:

- Representan una fuente de energía de fácil almacenamiento y transporte, cuya disponibilidad está en demanda.
- Reducen las emisiones de gases de invernadero al ser usado en conjunto con combustibles fósiles.
- Incrementan la seguridad energética en países en desarrollo con pocas reservas de derivados de petróleo (Demirbas 2009).

1.4.2. Biodiésel

El biodiésel es un combustible alternativo compuesto por ésteres monoalquílicos de cadenas entre 14 y 24 carbonos. Este biocombustible es obtenido mediante la reacción de triacilglicéridos o ácidos grasos y alcoholes de bajo peso molecular como metanol o etanol(Sahar et al. 2018).

Este biocombustible ha ganado mayor atención en los últimos años dado que presenta mayores ventajas sobre otros biocarburantes como su poder lubricante en motores, además de que se puede usar en conjunto con gasóleo en cámaras de combustión sin la necesidad de hacer cambios previos en el equipo (Kadapure et al. 2018; Sahar et al. 2018).

Para su uso directo en motores de combustión o calderas, el biodiésel debe poseer valores en sus propiedades físico-químicas detallados en la normativa usada para cada región. Generalmente, las normativas más usadas son las de las Naciones Europeas (EN14214) y la Americana (ASTM) (Ambat, Srivastava, and Sillanpää 2018). Los valores idóneos para cada parámetro junto con el nombre del test de referencia se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros que debe cumplir el biodiésel según las normativas ASTM Y EN 14214

(Knothe 2006; Pauls 2011; Singh and Singh 2010)

Parámetro	Test Usado (ASTM)	Test Usado	
		ASTM	EN 14214
Contenido de éster	---	EN 141013	96,5 (% mol)
Densidad a 15 °C	---	EN ISO 3675	860-900 (kg/m ³)
Viscosidad a 40 °C	D445	EN ISO 3140	3,5-5 (mm ² /s)
Número de cetano	D613	EN ISO 5165	≥ 47
Ceniza	D874	ISO 3987	≤ 0,02 (% m/m)
Contenido de agua	D2709	EN ISO 12937	≤ 0,05 (% v/v)
Estabilidad oxidativa a 110 °C	---	EN 14112	≥ 3 h
Índice de acidez	D664	EN 14104	≤ 0,50 (mg KOH/g)
Índice de yodo	---	EN 14111	130 (g I ₂ /100 g)
Contenido de metanol	---	EN 14110	≤ 0,02 (% m/m)
Contenido de monoacilglicéridos	---	EN 14105	≤ 0,80 (% mol)
Contenido de diacilglicéridos	---	EN 14105	≤ 0,20 (% mol)
Contenido de triacilglicéridos	---	EN 14105	≤ 0,20 (% mol)
Glicerina libre	D6584	EN 14105	≤ 0,20 (% m/m)
Glicerina total	D6584	EN 14105	≤ 0,25 (% m/m)

1.4.3. Generaciones de biodiésel

El biodiésel se producía originalmente de aceites vegetales comestibles, pero el uso de esta materia prima causa problema de competencia de recursos, en especial, en países en desarrollo. Por este motivo, el uso de otras materias primas alternativas se ha popularizado (Gupta and Rathod 2018).

Dado a la variedad de materia prima para sintetizar el biocombustible, este se ha clasificado en cuatro grupos denominados “generaciones”. La división general se puede observar en el Gráfico 1.

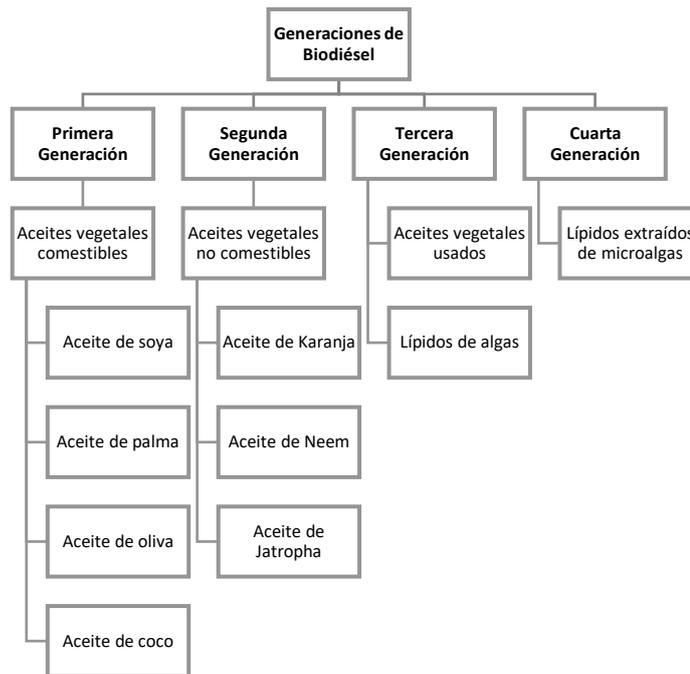


Figura 1.1 Resumen de las distintas generaciones de aceites y principales ejemplos

La diferencia entre cada generación de biodiésel radica en la calidad y costo de la materia prima. La primera generación se deriva de aceites comestibles, los cuales son más idóneos para la producción del biocombustible dado a la alta calidad del producto final, pero generan competencia de suministros de comida. A partir de la segunda generación, el biodiésel se deriva de aceites vegetales no comestibles o usados (Singh et al. 2020). Estos presentan una mayor disponibilidad y no ocasionan un problema ético alimentario, aunque presentan ciertas desventajas ya que necesitan ser tratados para su uso dado a la presencia de impurezas, usan una mayor relación molar de alcohol y el producto final presenta una mayor viscosidad (Ambat et al. 2018).

Especial interés ha tomado el uso de aceites vegetales usados para la generación de biodiésel, dado a su bajo o nulo costo de obtención, lo cual disminuye el costo de producción de la planta, el cual representa el 75% de los gastos generados en ella (Sheet 2018).

1.4.4. Métodos usados para la síntesis de biodiésel

Para la síntesis de biodiésel, se hace reaccionar el aceite y el alcohol mediante el uso de un catalizador básico o ácido en una reacción conocida como transesterificación (Sahar et al. 2018), tal y como se observa en la Figura 1.

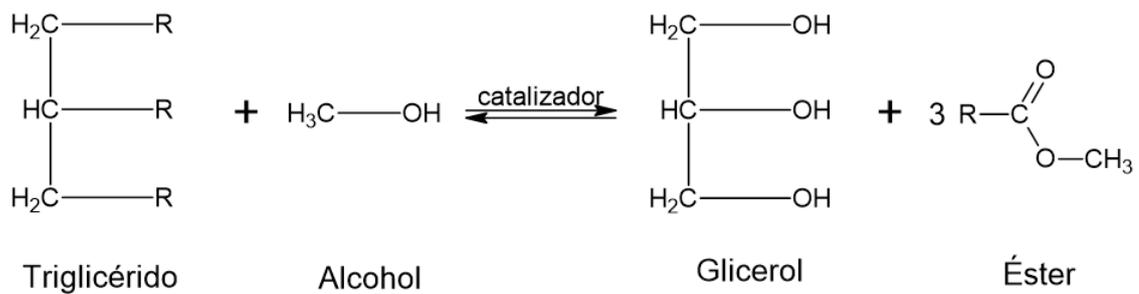


Figura 1.2 Reacción de transesterificación de los triglicéridos

Existen tres síntesis principales para llevar a cabo la reacción, estas dependen del catalizador usado y son los siguientes:

- **Catálisis homogénea**

Esta clase de reacción es la más usada y la que mayor rendimiento del producto final provee. Puede ser realizada mediante un catalizador básico o ácido disuelto en la solución reaccionante. Este catalizador no se recupera al final.

En la catálisis básica, se realiza previamente una reacción entre la base (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) con alcohol para formar un alcóxido. Este compuesto ataca al carbón electrófilo del grupo carbonilo de las grasas para formar finalmente los respectivos ésteres más una molécula de glicerol (Ambat et al. 2018). Este tipo de catálisis es la más usada, ya que provee altos rendimientos y se realiza a condiciones moderadas de temperatura (Goh et al. 2020).

La catálisis básica provee rendimientos bajos cuando el aceite contienen niveles mayores al 3% p/p de ácidos grasos libres. Esto se debe a que los ácidos reaccionan con la base en una reacción de competencia y forman jabón, tal como

se observa en la Figura 2 (Yeom and Go 2018). Para evitar la disminución del rendimiento por la presencia de jabones, se suele realizar un tratamiento previo a la catálisis básica mediante la adición de un ácido inorgánico fuerte como ácido sulfúrico o clorhídrico con el cual se esterifican los ácidos libres en ésteres (Ambat et al. 2018). Este proceso es conocido como “síntesis en dos pasos”.

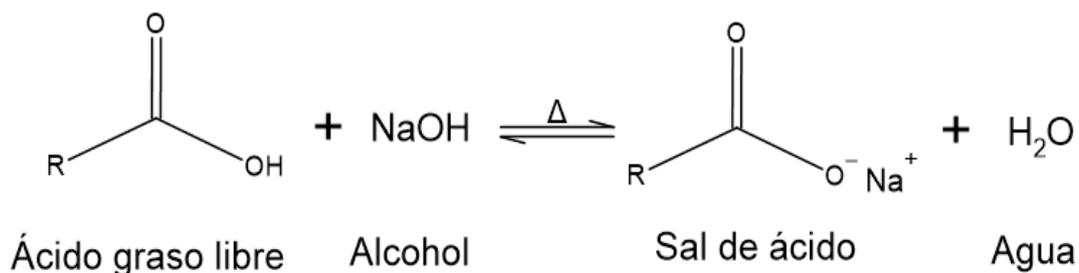


Figura 1.3 Reacción de saponificación de competencia

Alternativamente, se puede realizar una reacción ácida directa con el aceite usando los ácidos inorgánicos mencionados. Esta reacción de un solo paso se produce la protonación del grupo carbonil, lo que ocasiona que sea más susceptible a participar en un ataque nucleofílico. Este método de síntesis produce rendimientos bajos y la temperatura de operación es más elevada que la usada para la catálisis básica (Ambat et al. 2018).

- **Catálisis heterogénea**

Esta reacción se realiza mediante un catalizador sólido que no se disuelve en la solución reaccionante, lo cual permite lograr una recuperación final del mismo para su reutilización (Ambat et al. 2018). Al igual que en la catálisis homogénea, los catalizadores usados pueden ser básicos o ácidos, siendo los primeros los que muestran una mayor actividad en los procesos de transesterificación.

Para los catalizadores básicos sólidos se usa óxidos alcalinotérreos de calcio o magnesio, dado que estos muestran un mayor rendimiento en la conversión de triglicéridos. Una de las desventajas que presentan estos sólidos es que su puede aumentar el nivel de estos iones en el producto final, además de que el proceso es dependiente de la difusión de los reactivos en el medio. Los catalizadores

sólidos ácidos han tenido cierta relevancia en los últimos años dado a que son menos susceptibles a impurezas, como las silicas gel sulfonadas, pero tienden a dar rendimiento bajos a comparación de los óxidos alcalinos (Lee et al. 2014).

- **Biocatálisis**

Esta reacción se realiza mediante el uso de lipasas, enzimas extraídas de animales y plantas. Las enzimas son específicas por lo que no promueven la formación de jabón al igual que en la catálisis básica homogénea y trabajan a condiciones más bajas de temperatura. Su única desventaja es el alto costo de las enzimas lo que aumenta significativamente los costos de producción, además de necesitar condiciones fijas para evitar la desnaturalización de las enzimas (Ambat et al. 2018).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada durante la realización del proyecto se detalla en la figura 2.1

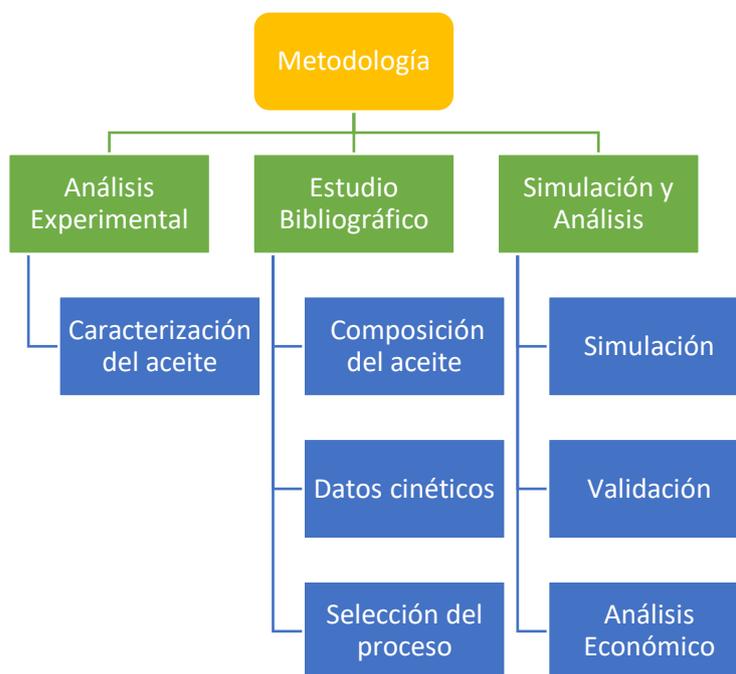


Figura 2.1 Resumen de la metodología a seguir para el diseño del proceso de producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado

2.1. Análisis Experimental

El primer paso para lograr la simulación representativa del proceso fue caracterizar la materia prima principal que se iba utilizar, en este caso, el aceite residual. Las propiedades físico-químicas del aceite fueron determinadas mediante pruebas de laboratorio.

2.1.1. Caracterización del aceite

Para la realización de los ensayos, se utilizó 1 L del aceite, el cual se secó mediante la adición de una sal anhidra. Se dejó reposar la muestra por un día hasta la deposición de la sal hidratada y otras impurezas, para posteriormente filtrar el aceite mediante un embudo de cristal.

Los análisis se realizaron siguiendo los ensayos sugeridos por la normativa NTE INEN 2678 para grasas y aceites vegetales residuales (Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2013). Cada ensayo se realizó en tandas de tres muestras consecutivas. Las propiedades caracterizadas fueron:

- **Índice de acidez**

Parámetro determinado mediante el uso de la norma NTE INEN 38. Se reporta en mg KOH/g aceite y representa la cantidad de ácidos grasos libres en el aceite. El análisis se realizó mediante un ensayo titulométrico, en el que se neutralizaron los ácidos con la adición de una solución de hidróxido de potasio (titulante). El índice se determinó indirectamente mediante la siguiente fórmula:

$$IA = \frac{N \times V \times 56.1}{P}$$

Donde:

N = normalidad de la solución básica

V = volumen del titulante consumido

P = peso de la muestra usada en g

Con este ensayo también se determinó el porcentaje de ácidos grasos libres tomando como sustancia representativa el ácido oleico. Este valor se determinó mediante:

$$\%FFA = \frac{N * V * 0.282}{P} * 100\%$$

- **Índice de saponificación**

Parámetro determinado mediante el uso de la norma NTE INEN 40. Se reporta en mg KOH/g aceite y representa la cantidad necesaria de hidróxido de potasio para saponificar una muestra de aceite. La muestra se saponificó primero y luego fue titulada usando una solución ácida. El índice se determinó indirectamente mediante la siguiente ecuación:

$$IS = \frac{(B - M) \times N}{P} \times 56,1$$

Donde:

N = normalidad de la solución ácida

B = volumen del titulante consumido con un blanco de prueba

M = volumen de titulante consumido con la muestra saponificada

P = peso de la muestra usada en g

- **Densidad**

Este parámetro, expresado en mg/L, se determinó siguiendo el procedimiento estipulado por la NTE INEN 35. Se usaron picnómetros de 10 mL para los ensayos. La densidad se calcula posteriormente con los datos másicos de cada muestra mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{(Pic - M)}{V}$$

Donde:

Pic = masa del picnómetro vacío

M = masa de la muestra más el picnómetro

V = volumen del picnómetro (10 mL)

- **Viscosidad cinemática**

Para la determinación de este parámetro se utilizó el procedimiento sugerido por la norma NTE INEN 810, dado que, no existía una referencia para aceites o grasas. Los ensayos se realizaron mediante viscosímetros Cannon-Fenske de tamaño 400 y el parámetro medido fue el tiempo que demoraba el líquido en subir por el capilar del viscosímetro hasta la marca de referencia. El tiempo promedio obtenido fue usado para obtener la viscosidad final en cSt usando las correlaciones proporcionadas por el fabricante. Se realizaron ensayos tanto a 40 °C como a 100 °C.

- **Poder calorífico**

Para la determinación de este parámetro, reportado en J/s, los ensayos se basaron en los sugeridos por la norma NTE INEN 1716, dado que, no existía referencia para aceites o grasas. Los ensayos se realizaron usando un equipo

de medición directa de este parámetro, al cual se le ingresa una masa aproximada de 0.5 g de aceite.

2.2. Estudio bibliográfico

El estudio bibliográfico posterior se realizó con la intención de reconocer la información necesaria para la simulación del proceso, como la composición porcentual del aceite y los datos cinéticos esperados para la reacción. Además, la revisión de los resultados experimentales de los artículos investigados permitió establecer el proceso adecuado para la producción de biodiésel.

2.2.1. Composición porcentual del aceite

Para lograr una adecuada representación del aceite en la etapa de simulación, se utilizó la composición de triglicéridos observada en la Tabla 2.1. Esta composición fue adaptada a partir de un estudio de derivados de aceites de palma, del cual se extrajo los triacilglicéridos con porcentaje másico mayor al 5% (Omar et al. 2015). Posteriormente, las composiciones de los aceites escogidos fueron recalculadas para que su suma total sea del 100%.

Tabla 2.1 Principales triacilglicéridos presentes en los derivados del aceite de palma y su composición porcentual estimada

(Omar et al. 2015)

Triacilglicérido	Composición
POP	36.1%
POO	31.6%
PLO	14.1%
PLP	11.6%
PPP	6.6%

Los triacilglicéridos que componen el aceite de palma residual no se encuentran en la base de datos del simulador, por lo que las moléculas tuvieron que ser diseñadas en base a su estructura esperada usando la herramienta ChemSketch. Un ejemplo de la estructura generada por el programa se observa en la figura 2.2

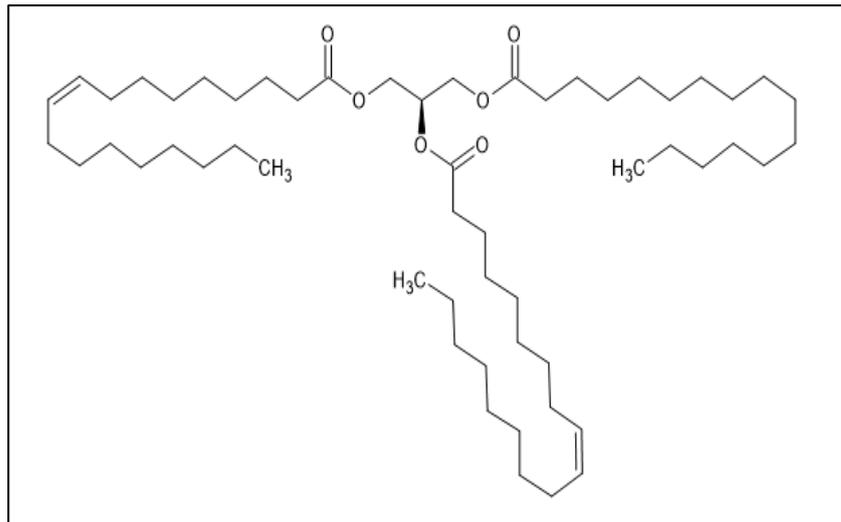


Figura 1.2 Molécula del triacilglicérido POO diseñada mediante la aplicación ChemSketch

2.2.2. Cinética de la reacción

El proceso de síntesis de biodiésel se da en tres reacciones reversibles consecutivas, en las que se van formando compuestos intermediarios hasta obtener los productos finales esperados que son los ésteres monoalquílicos y el glicerol. El set de reacciones se observa en la Figura 2.3.

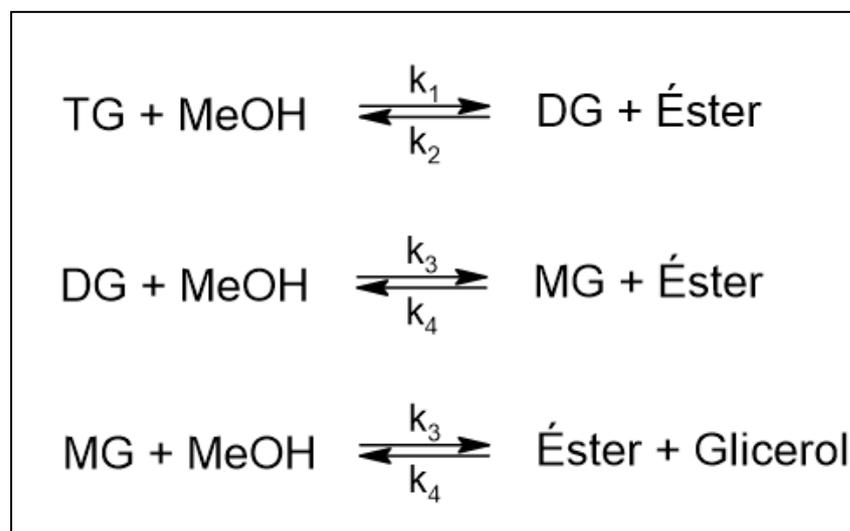


Figura 2.3 Set de reacciones generales que se producen durante la síntesis del biodiesel

(Salehi et al. 2019)

Cada reacción sigue una cinética de segundo orden en base a las concentraciones de los reactivos (Salehi et al. 2019), tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$r_i = k_i * [A] * [B]$$

Donde:

r_i = tasa de reacción

k_i = constante cinética

[A] = concentración del reactivo A

[B] = concentración del reactivo B

Para la reacción se escogió al metanol como reactivo debido a que reacciona rápidamente con los triglicéridos a comparación de otros alcoholes (Yépez 2017). Las constantes cinéticas y energías de activación de cada reacción fueron adaptadas de un estudio de metanólisis de aceite de palma y derivados (Narváez, Rincón, and Sánchez 2007). Estos datos cinéticos de relevancia se encuentran detallados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros cinéticos utilizados para la simulación

(Narváez et al. 2007)

Reacción	Constante k [L/mol*min]	Energía de Activación [Kcal/mol]
<i>TG → DG</i>	0.049	13.5
<i>DG → TG</i>	0.112	10.3
<i>DG → MG</i>	0.226	17.4
<i>MG → DG</i>	0.133	16.2
<i>MG → ESTER</i>	0.122	6.2
<i>ESTER → MG</i>	0.016	11.9

La reacción de saponificación para los ácidos grasos no se consideró para la simulación, dado que, existía poca información en literatura sobre las

propiedades físico-químicas de las sales orgánicas formadas que permitieran una correcta representación en el proceso.

2.2.3. Selección del proceso

Se realizó un estudio bibliográfico sobre los procedimientos más utilizados para las tres etapas principales del proceso:

- Pretratamiento del aceite
- Proceso reactivo
- Postratamiento de los productos

Se revisó 28 artículos para la etapa de pretratamiento y 15 estudios tanto para el proceso reactivo como para la etapa de postratamiento. Solo se escogieron artículos que hayan tenido un año de publicación igual o mayor al 2018, con el objeto de tener información actualizada sobre los procesos actuales relacionados a la producción del biocombustible.

La elección del proceso adecuado para cada etapa se basó en:

- Tendencia actual
- Parámetros físico-químicos de relevancia en cada proceso
- Factibilidad de implementación

2.3. Simulación y análisis

2.3.1. Simulación

Para la simulación del proceso se utilizó el simulador de procesos químicos Aspen Plus V.12.1. Este programa permite la representación de diferentes procesos de producción de químicos, además de poseer una base extensa de información y propiedades de diferentes sustancias.

Los compuestos principales ingresados al simulador fueron: metanol, agua destilada, triacilglicéridos, diacilglicéridos, monoacilglicéridos, ácido oleico, hidróxido de sodio, metil-ésteres y glicerol. Como se mencionó en el apartado 2.2.1, los triacilglicéridos fueron ingresados al simulador dado que no se disponía de estas sustancias en la base de datos. Se usó la opción "User-Defined" del programa para definir la estructura molecular de las grasas y luego

estimar sus propiedades usando el método UNIFAC. El ácido oleico se usó para representar al conjunto de ácidos grasos presentes en el aceite.

Las condiciones que se fijaron para el simulador fueron, la composición del aceite, dada por el estudio bibliográfico y el análisis de acidez realizado experimentalmente, el flujo másico de ingreso del aceite que se mantuvo en 200 Kg/h, la temperatura de entrada del aceite fijada en 25 °C y la presión del sistema que era la atmosférica.

El paquete termodinámico usado para el proceso fue el UNIFAC, basado en el árbol de decisiones presentado en la Figura 2.4.

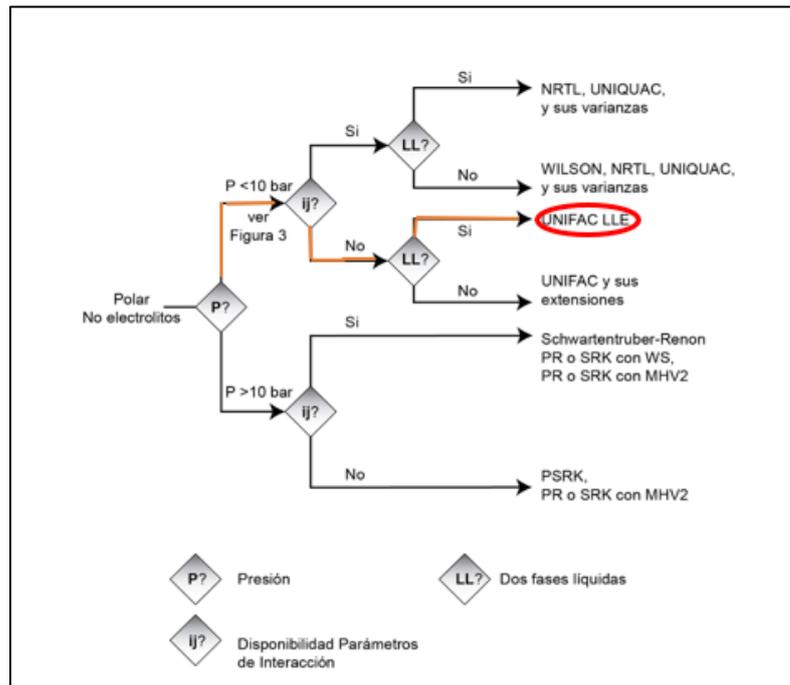


Figura 2.4 Árbol de decisiones con respecto método seleccionado

Para los procesos de purificación se utilizó el paquete termodinámico RK-SOAVE debido a que este modelo permite una representación más exacta de las diferentes fases líquidas que se pueden formar durante esta etapa.

2.3.2. Análisis operacional y validación

Para determinar las condiciones apropiadas de flujo molar de metanol y temperatura de reacción, se realizó un análisis operacional del proceso respecto

a estos dos parámetros. El parámetro de salida que serviría para la comparación fue la conversión másica del aceite usado, la cual se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\%x = \frac{m_{\text{aceite consumido}}}{m_{\text{aceite inicial}}} * 100\%$$

Para definir el flujo molar óptimo del proceso se varió el radio molar de alcohol:agua en el rango establecido por el estudio donde se obtuvo los parámetros cinéticos (Narváez et al. 2007). Dichos valores y la respuesta experimental que se usará para comparar los datos obtenidos de la simulación se observan en la Tabla 2.3. Para este análisis se mantuvieron constantes la temperatura de reacción y el volumen del reactor a 60 °C y 5 m³ respectivamente.

Tabla 2.3 Valores de radio molar usados para el análisis operacional y resultados experimentales

(Narváez et al. 2007)

Radio molar alcohol:agua	% Conversión másica experimental
3:1	94
4.5:1	98
6:1	100

Respecto a la temperatura de reacción, se determinó la conversión a un radio molar constante de 6:1, en un rango de temperaturas de entre 45°C a 60°C. Los resultados fueron validados usando un estudio experimental de optimización del proceso de conversión de aceite usado a biodiésel (Outili et al. 2020). Los valores de temperatura que se usaron para el análisis y las conversiones experimentales en dichos puntos se observan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Valores de temperatura usados para el análisis operacional y resultados experimentales

(Outili et al. 2020)

Temperatura de reacción °C	% Conversión másica experimental
45	100
50	100
60	100

2.3.3. Dimensionamiento de equipos

El dimensionamiento de los equipos se realizó en base a los datos proporcionados por el simulador y siguiendo los métodos estipulados para calcular las dimensiones de los equipos estipuladas en manuales de Ingeniería de diseño.

En el caso de intercambiadores, se usará el método “shortcut” proporcionado por el simulador para determinar el área de transferencia necesaria. Se usará vapor saturado de agua a 10 psia y una configuración a contracorriente.

El volumen del equipo de reacción también será obtenido de la simulación. El programa ofrece la posibilidad de ajustar el volumen de los reactores hasta obtener la conversión deseada.

Respecto a los distintos contenedores del sistema, sus dimensiones se calcularán en base al flujo volumétrico proporcionado por el simulador de procesos y al método de dimensionamiento de separadores horizontales propuesto por manuales de Ingeniería (Carl R. Branan 2005)..

Dado a la presencia de sustancias corrosivas a lo largo del proceso, el material a usarse para los tanques e intercambiadores será acero inoxidable 304 que se usa con frecuencia en la industria alimenticia y farmacéutica (Yépez 2017).

2.3.4. Análisis económico

El análisis de costos de equipos se realizó usando la herramienta para determinación de flujo de cajas en procesos químicos denominada CAPCOST.

Esta hoja de cálculo permite ingresar los componentes de un proceso y calcular un costo estimado basado en las dimensiones características del equipo.

El precio de cada equipo se determinará por medio de la opción de estimación del programa. Si la medida característica del equipo, como área, volumen o diámetro, fuera inferior al rango del sistema, se usará la dimensión mínima que se puede ingresar.

Se usarán como servicios principales agua y vapor de baja presión. Para el agua de servicio industrial se utilizó un precio estándar en el país de \$ 1.25/m³ (ETAPA 2021), mientras que para calcular el precio del vapor de calentamiento fue necesario asumir un valor de eficiencia para el equipo de generación e ingresar el costo del combustible usado para producir el vapor. La eficiencia de la caldera fue asumida con un valor de 0.9 y se utilizó al diésel como combustible, con un valor de \$1.60/gal.

Respecto a los costos de materia prima, el aceite vegetal usado, no representa un costo para la empresa ya que es un desecho que se quiere reutilizar, mientras que, el precio del metanol y del hidróxido de sodio se fijaron según el precio de venta en el país, es decir, en 1.15 \$/kg y 2.5 \$/kg respectivamente. Además, para el análisis se asumió que el precio de venta del biodiésel puro y el glicerol crudo de \$3.56/Gal(Energy n.d.) y \$0.23/kg respectivamente (Yang, Hanna, and Sun 2012).

Para realizar un análisis de rentabilidad, fue necesario asumir una tasa de impuestos, el costo de la tierra donde será instalada la planta y un capital de inversión inicial. La tasa de impuestos fue ingresada con un valor del 15%, dado que no se trata de un proyecto de gran envergadura (Turton, Shaeiwitz, and Bhattacharyya 2015), mientras que, el precio del lugar de instalación se asumió con un valor de \$500000. El capital de inversión inicial fue calculado a partir del costo ingresado de la tierra y el de los equipos proporcionados al programa.

Se propuso un periodo de estudio de 10 años con un tiempo de construcción de dos años, tiempo en el cual los equipos se depreciarán. El flujo de cajas fue generado en la hoja de cálculo de CAPCOST una vez ingresado todos los valores antes mencionados.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de análisis experimental

Los resultados de los análisis experimentales se observan en la tabla 3.1

Tabla 3.1. Resultados de pruebas realizadas a la muestra de aceite

Parámetro	Valor	Unidades
Ácidos grasos libres	3,56	%
Índice de saponificación	232	mg KOH/ g
Peso molecular promedio	694	g/mol
Viscosidad cinemática a 40 °C	44,8	cSt
Viscosidad cinemática a 100 °C	11,3	cSt
Densidad a 25 °C	0,920	mg/L
Poder calorífico	32,6	KJ/g

Como se observa de la Tabla 3.1, el porcentaje de ácidos grasos libres se encuentra cercano al 3%. Para el aceite de palma no usado, este parámetro tiene un valor cercano a 0,3% (Ullah et al. 2014)). El elevado porcentaje de acidez se debe principalmente a la oxidación de las grasas debido a reacciones espontáneas con el aire circundante (Cao et al. 2015). Aún con este porcentaje, el valor obtenido se encuentra por debajo del 5% reportado para el aceite de palma crudo (Rincón and Martínez 2009) e incluso menor al valor de 4% reportado en un caracterización del aceite usado (Ullah et al. 2014). Un índice de acidez cercano a 3% o menor implica que la reacción no requiere una reacción adicional para disminuir la acidez del producto y evitar la formación de jabón (Yeom and Go 2018).

El índice de saponificación del aceite posee un valor mayor comparado con el de palma tratado, siendo que el aceite sin usar tiene un valor cercano a 190 mg KOH/g (Ullah et al. 2014). Esto implica que se necesitará una mayor cantidad de metanol para obtener porcentajes de conversión altos (Bart, Palmeri, and Cavallaro 2010).

El peso molecular promedio también difiere del peso molecular de aceite de palma no usado, que tiene un valor cercano a 850 g/mol (Rincón and Martínez 2009). Esto se debe al nivel de ácidos grasos que posee el aceite.

Entre las propiedades de transporte y almacenamiento, se observa que el aceite palma usado posee una viscosidad cinemática similar a la esperada para esta clase de desechos (Ullah et al. 2014). Este valor es menor al reportado para aceites de segunda generación, por lo que suele producir biodiésel con viscosidades bajas (Rincón and Martínez 2009). La densidad también posee un valor cercano al esperado para el aceite de palma y derivados, cerca de 0,9 mg/L (Ullah et al. 2014).

El poder calorífico es menor al esperado para aceites usados, de 39 a 40 KJ/g (Ullah et al. 2014). Esta diferencia se debe a las impurezas del aceite usado, por lo que su uso directo en una caldera o motor ocasionaría bajas en el rendimiento del proceso de generación de energía. No obstante, este valor aumenta al convertir el aceite en biodiésel, llegando a valores cercanos a los del diésel convencional (Demirbas 2009).

3.2. Resultados de revisión bibliográfica

Como se especificó en la metodología, sección 2.2.3, el proceso de obtención de biodiésel se dividirá en tres partes fundamentales: pretratamiento, proceso reactivo y postratamiento.

Para el pretratamiento, de los 28 artículos revisados, 12 artículos sugerían el uso de una filtración más previo calentamiento del aceite usado representando el 43% de los procedimientos vistos, tal como se observa en la Gráfica 3.1. La filtración con tela de algodón fina o mediante el uso de una capa doble ayudaría a retener las impurezas sólidas y ceras que pueden afectar los procesos siguientes (Gupta and Rathod 2018). Un precalentamiento a la temperatura del reactor, ayudaría en cambio a eliminar parte de los materiales volátiles presentes en la materia prima y a acondicionar el aceite y la solución básica para el siguiente proceso.

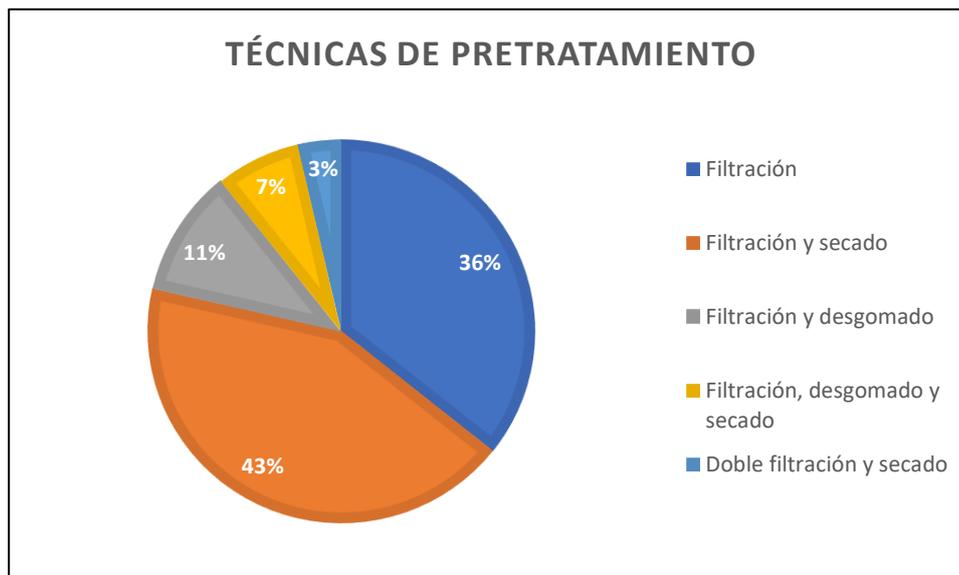


Gráfico 3.1 Resultados de procesos de pretratamiento más usados

Para el proceso reactivo, de los 15 artículos revisados, 7 estudios sugerían el uso de un proceso directo de transesterificación cuando se tenía niveles bajos de acidez. Un estudio, incluso, recomendó su uso incluso con un índice de acidez elevado de 10 mg KOH/g aceite (Eze, Phan, and Harvey 2018). Un proceso de dos pasos, que incluya una esterificación previa, implica un mayor gasto de capital, además de que se necesita procesos posteriores para el tratamiento de desechos. Un tratamiento ácido directo, aunque menos susceptible a la presencia de impurezas, implica el uso de mayor energía y además de un radio molar de alcohol más elevado respecto a un tratamiento básico (Gebremariam and Marchetti 2017). Los estudios muestran que un proceso de transesterificación básica directa se lleva a condiciones moderadas, entre 50 °C a 60 °C, y la presencia de ácidos grasos libres puede disminuirse usando la cantidad correcta de base para neutralizarlos y luego eliminar las sales por medio de un lavado con agua destilada.

Para el postratamiento, de los 15 artículos revisados, 5 estudios sugerían el uso de una decantación y un lavado con agua entre 25 °C y 30 °C. Otros 5 sugerían el uso de un proceso de secado posterior al lavado, pero este implicaría un mayor gasto de energía. Estos estudios representaban cerca del 66% de las investigaciones usadas para este proyecto.

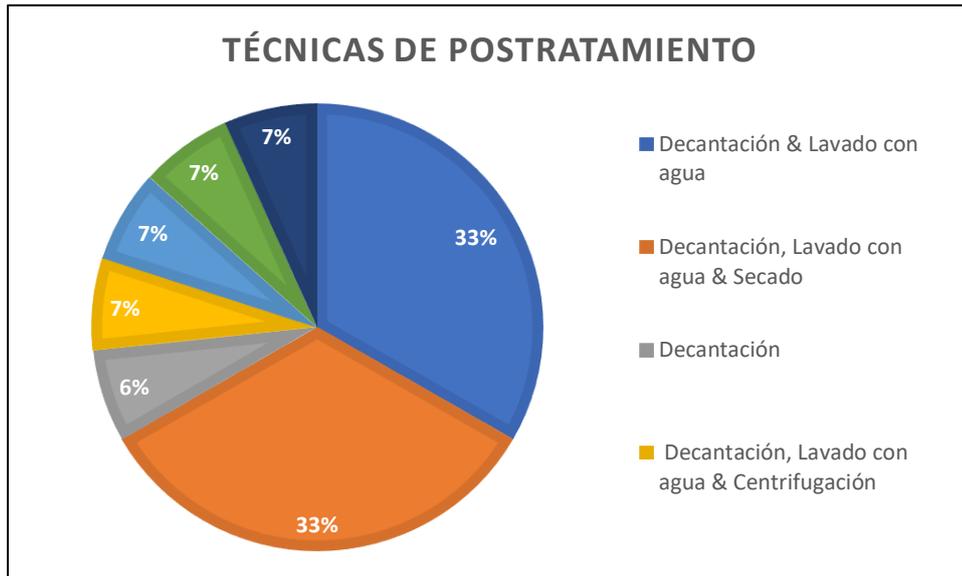


Gráfico 3.2 Resultados de procesos de posttratamiento más usados

En base a los procesos descritos, para el proceso de pretratamientos se usó una filtración del aceite usado por lana de algodón fina y un precalentamiento de los reactivos por medio de intercambiadores de calor antes de ingresar al reactor. El proceso reactivo constaba de un solo paso, donde se producía una reacción homogénea básica. Para el posttratamiento se utilizó un sistema de decantación y lavado con agua fría de tal manera que se logrará remover parte del metanol residual.

3.3. Descripción del sistema propuesto

El sistema propuesto para este estudio de producción se observa en el diagrama de flujo de la Figura 3.1.

El flujo inicial de metanol e hidróxido de sodio ingresan por las corrientes 1 y 2 respectivamente. La temperatura de estas corrientes es de 25 °C y se encuentran a una presión de 1 atm. Estas corrientes se mezclan en el tanque TK-101 para dirigirse al intercambiador E-101 donde la corriente se calienta por medio de servicio de vapor a baja presión. El flujo de aceite ingresa por la corriente 5 y pasa a través de un filtro, F-101, donde se eliminan las impurezas sólidas. Luego el flujo de aceite se dirige al intercambiador E-102 donde se calienta por medio de servicio de vapor a baja presión.

TK-101	E-101	E-102	R-101	V-101	V102
Tanque de almacenamiento	Calentador de alcohol y sosa	Calentador de aceite	Reactor de transesterificación	Separador L-L horizontal	Separador L-L horizontal
F-101					
Doble filtro					

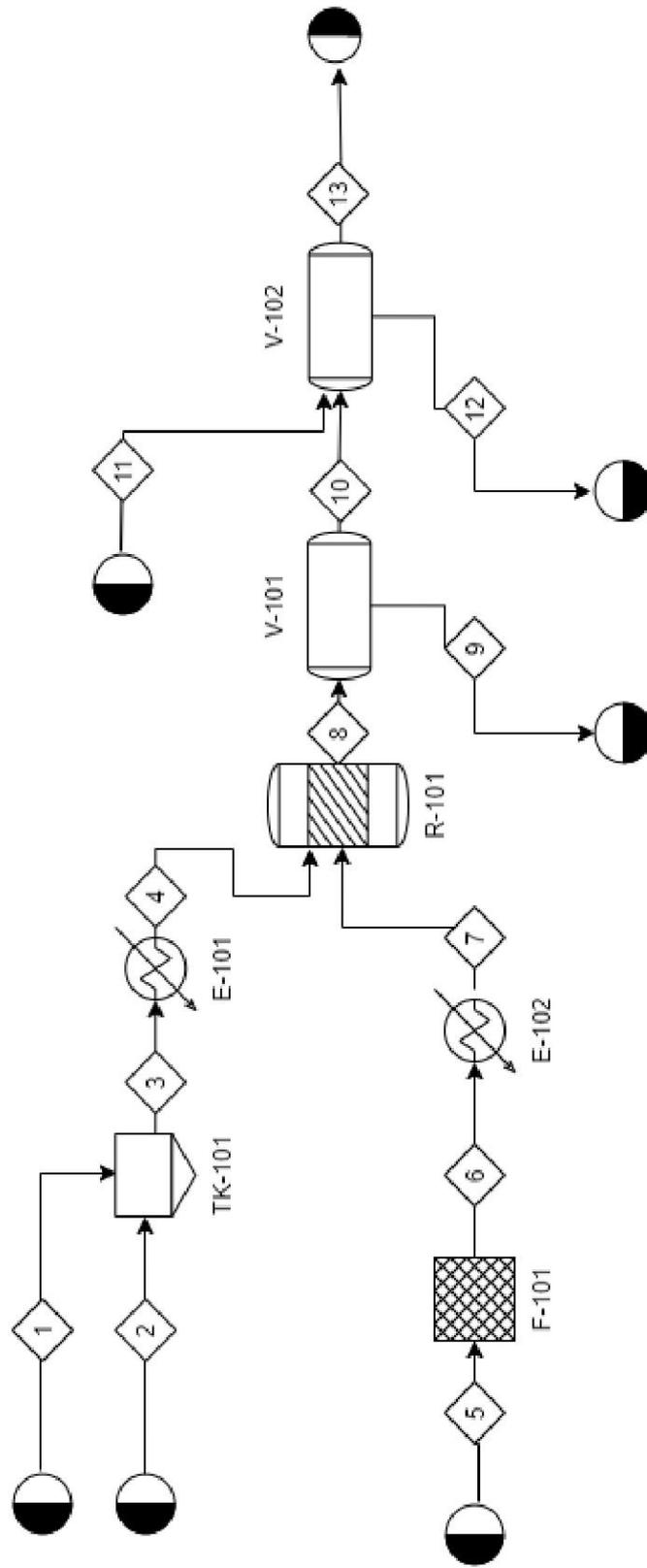


Figure 3.1 Diagrama de flujo del proceso

Los reactivos precalentados ingresan a un reactor CSTR, R-101, donde se produce el biodiésel y otros subproductos. El proceso se lleva a cabo a 1 atm.

Los productos se dirigen a un decantador horizontal, V-101, donde se separa el glicerol y la capa de aceite que no reacciono más el biodiésel. Se asume que gran parte del hidróxido de sodio presente en la solución se deposita con la glicerina y que en el tiempo en que se da el proceso, la temperatura disminuye a la del ambiente. El biodiésel crudo se mezcla con agua en otro decantador horizontal, V-102, con el objetivo de eliminar las impurezas como metanol.

Para la simulación no se consideró el tanque de mezclado TK-101 y el filtro F-101, dado a que no existen dichos elementos dentro del programa.

3.4. Resultados de análisis paramétrico

Para determinar las condiciones óptimas del proceso y que este estudio sirva como referencia para otras investigaciones, se varió el radio molar de alcohol y la temperatura de reacción para ver el efecto sobre la conversión, además de cambiar el flujo volumétrico del agua de lavado.

El efecto que tiene el radio molar sobre la conversión se observa en el Gráfico 3.3. Se evidencia que a medida que se aumenta el radio molar de metanol, la conversión másica aumenta. Esta tendencia ya había sido prevista por el elevado índice de saponificación del aceite, detallado en la sección anterior.

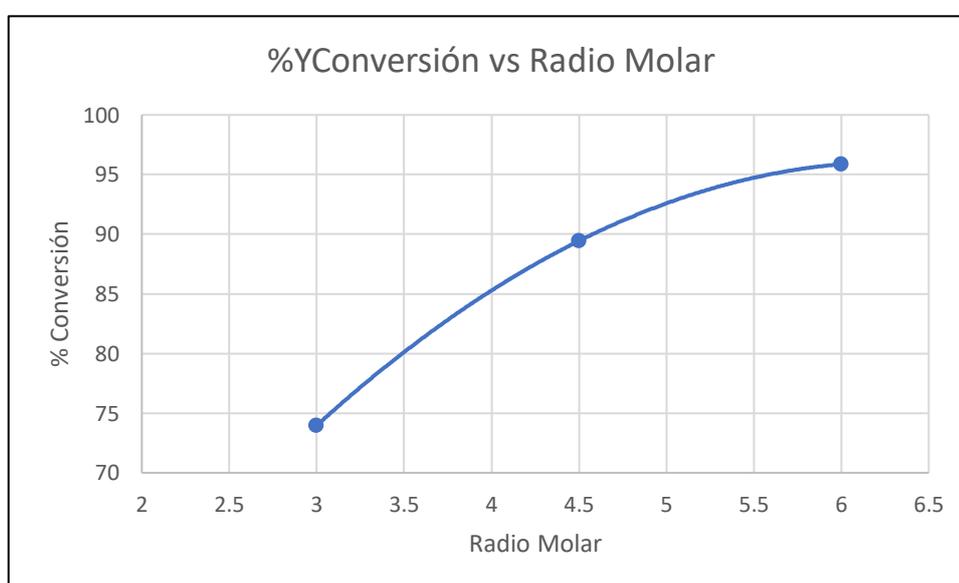


Gráfico 3.3 Conversión másica de aceite vs radio molar

Se observa que el radio molar idóneo para mejorar el rendimiento es el 6:1, un uso mayor de alcohol no aumentaría la conversión, ya que como se observa en la Gráfica 3.3, la curva presenta un máximo pasado del radio molar de 6. Esto también se relaciona a las reacciones que se dan en el sistema, dado que están en equilibrio un aumento de metanol puede ocasionar también una disminución de la conversión tras cierto intervalo de concentración del reactivo. Los resultados fueron comparados con aquellos obtenidos por el artículo donde se obtuvo la cinética (Narváez et al. 2007), observándose los siguientes resultados presentados en la Tabla 3.2. Se observa que, a intervalos bajos de proporción alcohólica, los resultados varían considerablemente a los esperados, pero a proporciones elevadas la conversión aumenta significativamente a valores cercanos a 100%. Las diferencias significativas, se deben a que en la simulación no considera que parte del aceite se saponifica debido a la presencia de la base y no todo se convierte en biodiésel, condición que es más perceptible cuando el radio molar es menos elevado. A mayor proporción, la cinética favorece a la conversión de triglicéridos antes que a la formación de jabón.

Tabla 3.2 Comparación de resultados a aquellos obtenidos experimentalmente

Radio Molar	%Conversión Simulación	%Error
3:1	73.00	28.00
4.5:1	89.00	9.200
6:1	96.00	4.000

Respecto a la temperatura de reacción, los resultados obtenidos se muestran en la Gráfica 3.4. En la gráfica se observa que la temperatura no afecta significativamente la conversión como lo hace el radio molar de alcohol, ya que, dicho valor se mantiene por debajo de 96%.

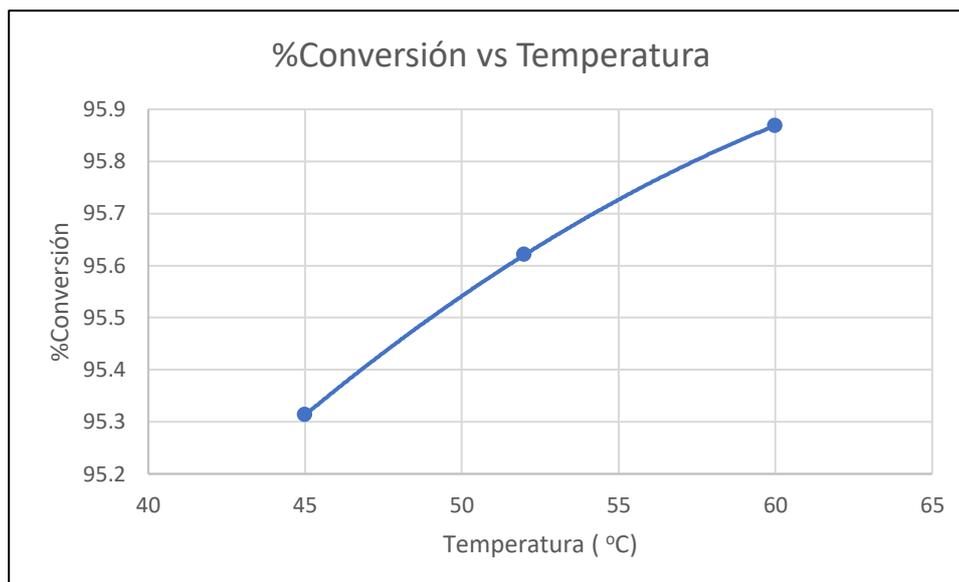


Gráfico 3.4 Conversión másica de aceite vs temperatura

Los resultados fueron comparados con los proporcionados por (Outili et al. 2020). Estos se presentan en la Tabla 3.3, donde se observa que la diferencia se mantiene casi constante. Esta tendencia también fue reportada en el estudio citado, siendo que el porcentaje de error que se genera se debe a la conversión de los triglicéridos y ácidos grasos en jabón.

Tabla 3.3 Comparación de resultados a aquellos obtenidos experimentalmente

Temperatura °C	%Conversión Simulación	%Error
45	95.32	4.680
52	95.62	4.380
60	95.87	4.130

3.5. Resultados de simulación

En base al análisis de condiciones de operación, el proceso de reacción se fijó a una temperatura de 60 °C y un radio molar de 6:1. Las condiciones de cada corriente se observan en las tablas ubicados en los Anexos.

De la simulación se obtuvo que por cada kilogramo de aceite que ingresa al proceso se obtiene alrededor de 0.96 kg de biodiésel. Las condiciones finales del producto se observan en la Tabla 3.4. Se observa que el producto final contiene niveles aceptables agua y metanol, además, de poseer una viscosidad a 40 °C permisible según las normas vistas en el Marco Teórico. El poder calorífico sigue estando por debajo del observado para el diésel como se menciona en el Capítulo1, por lo que, el presente producto podría usarse para mezclas de este combustible fósil.

Tabla 3.4 Propiedades de relevancia del producto final

Parámetro	Unidad	Valor
Agua	%m/m	2.700×10^{-4}
Metanol	%m/m	4.780×10^{-4}
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	5.000
Poder Calorífico	KJ/Kg	$32,19 \times 10^{-2}$

3.6. Resultados de análisis económico

El resumen de los costos de los equipos, su material y dimensiones puede encontrarse en las Tablas 3.5, 3.6 y 3.7. Los costos de los intercambiadores y contenedores fueron calculados en base al valor mínimo de ingreso dado que sus dimensiones son considerablemente inferiores.

Tabla 3.5 Especificaciones de los intercambiadores de calor del sistema

ID	Área de transferencia	Material	Costo
E-101	0,0286 m ²	SS	\$18000
E-102	0,133 m ²	SS	\$18000

Tabla 3.6 Especificaciones del reactor del sistema

ID	Volumen	Material	Costo
R-101	5 m ³	SS	\$164000

Tabla 3.7 Especificaciones de los contenedores del sistema

ID	Diámetro	Longitud	Material	Costo
TK-101	0,122 m	0,612 m	SS	\$27965
V-101	0,240 m	1,20 m	SS	\$27965
V-102	0,258 m	1,29 m	SS	\$27965

En base a estos valores, y a los ya mencionados en la sección anterior, se obtuvieron los siguientes resultados del análisis económico:

Tabla 3.8 Resultados de análisis económico

Parámetro	Valor
Inversión Inicial Estimada	\$4.2 M
TIR	93%
VAN	\$1.4 M
Período de Recuperación	1 año

Se observa que, para el proyecto dado, se recupera el capital invertido en 1 año, obteniéndose un valor neto actual favorable que indica la rentabilidad del proyecto, además de una tasa de recuperación alta, mayor a la esperada (10%).

Finalmente, se presenta el diagrama de flujo de caja del proceso. En este se puede observar que durante los dos años de construcción la empresa presenta pérdidas debido a la instalación de la planta, pero pasado un año se recupera el capital invertido y empiezan a ver ganancias.

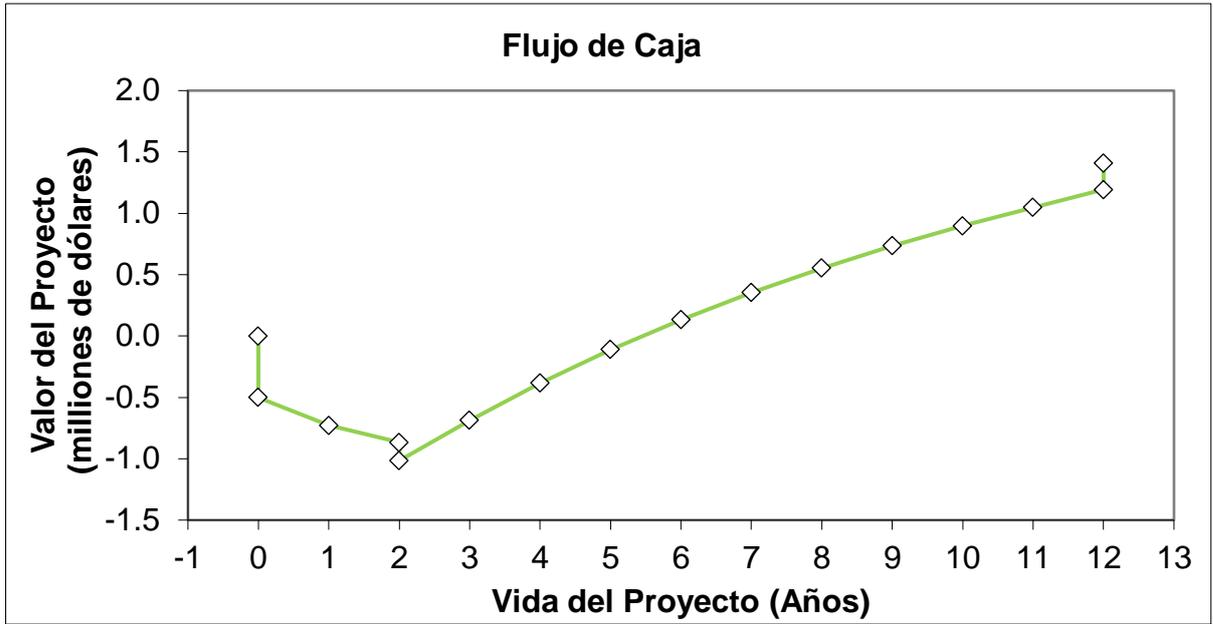


Gráfico 3.5 Diagrama de flujo de caja

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se determinó que el procedimiento más adecuado para la implementación del proceso de producción de biodiésel a mediana escala era una transesterificación directa, básica, seguida de un lavado húmedo con agua destilada a temperatura ambiente. Esto se logró debido a los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos que mostraron índices de acidez cercanos al 3% lo cual implicaba que un tratamiento ácido no era necesario.

Del estudio y la simulación del proceso se logró obtener un flujo másico de biodiésel de 202 kg/h con una viscosidad cinemática de 5 mm²/s y poder calorífico de 36 KJ/g, valores cercanos a los citados en bibliografía.

La simulación, además, permitió determinar las condiciones de proceso idóneas para el reactor. Así una razón molar de metanol:agua de 6:1 y una temperatura de reacción cercana a 60 °C permiten obtener conversiones del aceite cercanas al 96%. Esto permite ajustar directamente las condiciones del proceso sin la necesidad de implementar experimentación.

El análisis de costos usando la herramienta de estimación de precios, CAPCOST 2017, permitió conocer que la construcción de la planta sería factible y se llegaría a recobrar la inversión de la empresa después del tercer año.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda la búsqueda de implementar el proceso de saponificación dentro del sistema, para obtener resultados más cercanos a lo esperado experimentalmente. Esto además ayudaría a conocer la cantidad de hidróxido de sodio que se pierde por la presencia de ácidos grasos o la saponificación de grasas.

Dentro del conjunto de ecuaciones se debería considerar la reacción de saponificación de los triacilglicéridos para que el modelo cinético sea más robusto. Así se lograría los resultados estimados por la parte experimental cuando el nivel de metanol es bajo.

Por último, se aconseja que se pruebe otras alternativas para el postratamiento del biodiésel que logren disminuir la cantidad de derivados glicéridos, tal es el caso de tratamientos en base seca como adsorción a mediana escala.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambat, Indu, Varsha Srivastava, and Mika Sillanpää. 2018. "Recent Advancement in Biodiesel Production Methodologies Using Various Feedstock: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90(February 2017):356–69. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.069.
- Andrade, Nancy Ximena, and José Alí Moncada. 2020. "DE ACEITE COMESTIBLE." *SATHIRI:Sembrador* 15(2):185–98. doi: 10.32645/13906925.987.
- Bart, Jan C. J., Natale Palmeri, and Stefano Cavallaro. 2010. "Emerging New Energy Crops for Biodiesel Production." *Biodiesel Science and Technology* 226–84. doi: 10.1533/9781845697761.226.
- Cao, Jun, Hongyan Li, Xin Xia, Xian Guo Zou, Jing Li, Xue Mei Zhu, and Ze Yuan Deng. 2015. "Effect of Fatty Acid and Tocopherol on Oxidative Stability of Vegetable Oils with Limited Air." *International Journal of Food Properties* 18(4):808–20. doi: 10.1080/10942912.2013.864674.
- Carl R. Branran. 2005. *L V 3*. Londres.
- Demirbas, Ayhan. 2009. "Progress and Recent Trends in Biodiesel Fuels." *Energy Conversion and Management* 50(1):14–34. doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.001.
- Energy, Department of. n.d. "Alternative Fuels Data Center: Fuel Prices." Retrieved August 29, 2021 (<https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html>).
- Escobar, María Teresa. 2014. "El Ecuador." *Energía* 230:33–37.
- ETAPA. 2021. "Pliego Tarifario Del Servicio De Agua Potable Y Saneamiento Vigente Año 2021." 2021.
- Eze, Valentine C., Anh N. Phan, and Adam P. Harvey. 2018. "Intensified One-Step Biodiesel Production from High Water and Free Fatty Acid Waste Cooking Oils." *Fuel* 220(April 2017):567–74. doi: 10.1016/j.fuel.2018.02.050.
- Gaurav, N., S. Sivasankari, G. S. Kiran, A. Ninawe, and J. Selvin. 2017. "Utilization of Bioresources for Sustainable Biofuels: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73(September 2016):205–14. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.070.

- Gebremariam, Shemelis Nigatu, and Jorge Mario Marchetti. 2017. *Biodiesel Production Technologies: Review*. Vol. 5.
- Goh, Brandon Han Hoe, Cheng Tung Chong, Yuqi Ge, Hwai Chyuan Ong, Jo Han Ng, Bo Tian, Veeramuthu Ashokkumar, Steven Lim, Tine Seljak, and Viktor Józsa. 2020. "Progress in Utilisation of Waste Cooking Oil for Sustainable Biodiesel and Biojet Fuel Production." *Energy Conversion and Management* 223(August). doi: 10.1016/j.enconman.2020.113296.
- Gupta, Anilkumar R., and Virendra K. Rathod. 2018. "Waste Cooking Oil and Waste Chicken Eggshells Derived Solid Base Catalyst for the Biodiesel Production: Optimization and Kinetics." *Waste Management* 79:169–78. doi: 10.1016/j.wasman.2018.07.022.
- Kadapure, Santosh A., Prasanna Kirti, Sabhaya Singh, Sagar Kokatnur, Neeraj Hiremath, Akhil Variar, Shagufta Shaikh, and Raju Chittaragi. 2018. "Studies on Process Optimization of Biodiesel Production from Waste Cooking and Palm Oil." *International Journal of Sustainable Engineering* 11(3):167–72. doi: 10.1080/19397038.2017.1420107.
- Knothe, Gerhard. 2006. "Analyzing Biodiesel: Standards and Other Methods." *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society* 83(10):823–33. doi: 10.1007/s11746-006-5033-y.
- Lee, Adam F., James A. Bennett, Jinesh C. Manayil, and Karen Wilson. 2014. "Heterogeneous Catalysis for Sustainable Biodiesel Production via Esterification and Transesterification." *Chemical Society Reviews* 43(22):7887–7916. doi: 10.1039/c4cs00189c.
- Liu, Yanbing, Xinglin Yang, and Zongyuan Zhu. 2021. "Economic Evaluation and Production Process Simulation of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil." *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 100091. doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100091.
- Narváez, P. C., S. M. Rincón, and F. J. Sánchez. 2007. "Kinetics of Palm Oil Methanolysis." *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society* 84(10):971–77. doi: 10.1007/s11746-007-1120-y.

- Omar, Zaliha, Elina Hishamuddin, Mat Sahri Miskandar, Siti Hazirah Mohamad Fauzi, Habi Mat Dian Noor Lida, Muhammad Roddy Ramli, and Norizzah Abd Rashid. 2015. "Palm Oil Crystallisation: A Review." *Journal of Oil Palm Research* 27(2):97–106.
- ONU. 2019. *Tracking SDG 7 | Progress Towards Sustainable Energy*.
- Outili, Nawel, Halima Kerras, Chahra Nekkab, Rayane Merouani, and Abdesslam Hassen Meniai. 2020. "Biodiesel Production Optimization from Waste Cooking Oil Using Green Chemistry Metrics." *Renewable Energy* 145:2575–86. doi: 10.1016/j.renene.2019.07.152.
- Pauls, R. E. 2011. "A Review of Chromatographic Characterization Techniques for Biodiesel and Biodiesel Blends." *Journal of Chromatographic Science* 49(5):384–96. doi: 10.1093/chromsci/49.5.384.
- Rincón, Milena, and Daniel Martínez. 2009. "Análisis de Las Propiedades Del Aceite de Palma En El Desarrollo de Su Industria." *Revista Palmas* 30(2):11–24.
- Sahar, Sana Sadaf, Javed Iqbal, Inam Ullah, Haq Nawaz Bhatti, Shazia Nouren, Habib-ur-Rehman, Jan Nisar, and Munawar Iqbal. 2018. "Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: An Efficient Technique to Convert Waste into Biodiesel." *Sustainable Cities and Society* 41(December 2017):220–26. doi: 10.1016/j.scs.2018.05.037.
- Salehi, Abozar, Abdolreza Karbassi, Barat Ghobadian, Amir Ghasemi, and Amir Doustgani. 2019. "Simulation Process of Biodiesel Production Plant." *Environmental Progress and Sustainable Energy* 38(6):1–12. doi: 10.1002/ep.13264.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. 2013. *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2678 : 2013 GRASAS Y Primera Edición COMESTIBLES*. Quito/Ecuador.
- Sheet, Eiman Ali Eh. 2018. "Effect of Preheating Waste Cooking Oil on Biodiesel Production and Properties." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 40(2):207–13. doi: 10.1080/15567036.2017.1410594.
- Singh, Digambar, Dilip Sharma, S. L. Soni, Sumit Sharma, Pushpendra Kumar Sharma, and Amit Jhalani. 2020. "A Review on Feedstocks, Production Processes, and Yield for Different Generations of Biodiesel." *Fuel* 262(October):116553. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116553.

- Singh, S. P., and Dipti Singh. 2010. "Biodiesel Production through the Use of Different Sources and Characterization of Oils and Their Esters as the Substitute of Diesel: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1):200–216. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.017.
- Turton, Richard, Joseph Shaeiwitz, and Debangsu Bhattacharyya. 2015. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Boston.
- Ullah, Zahoor, Mohamad Azmi Bustam, and Zakaria Man. 2014. "Characterization of Waste Palm Cooking Oil for Biodiesel Production." *International Journal of Chemical Engineering and Applications* 5(2):134–37. doi: 10.7763/ijcea.2014.v5.366.
- Yang, Fangxia, Milford A. Hanna, and Runcang Sun. 2012. "Value Added Use Crude Glycerol." *Biotechnology for Biofuels* 5(1):1–10.
- Yeom, Sung Ho, and Young Wook Go. 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):432–41. doi: 10.1007/s12257-018-0209-5.
- Yépez, Julio Paredes. 2017. *UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO Colegio de Ciencias e Ingeniería Diseño y Construcción de Una Planta de Producción de Biodiesel a Partir de Aceite Vegetal Reciclado Dispositivos Tecnológicos*.

APÉNDICES

APÉNDICE A: TRIGLICÉRIDOS HECHOS EN CHEMSKETCH

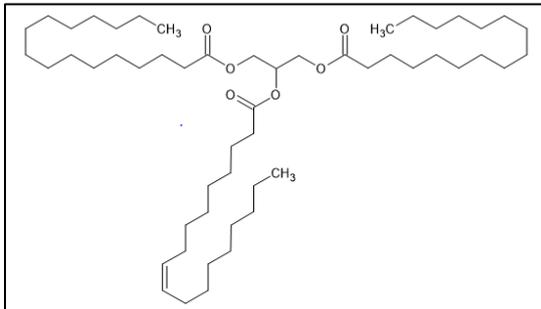


Figura A.1 Molécula POP

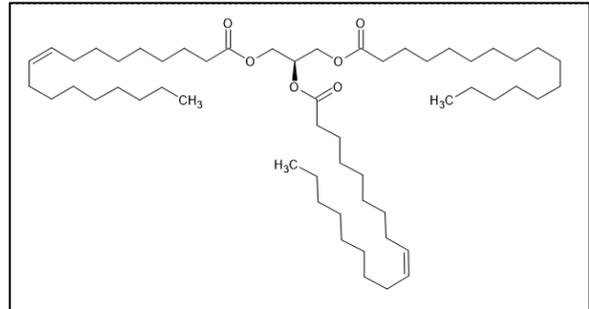


Figura A.2 Molécula POO

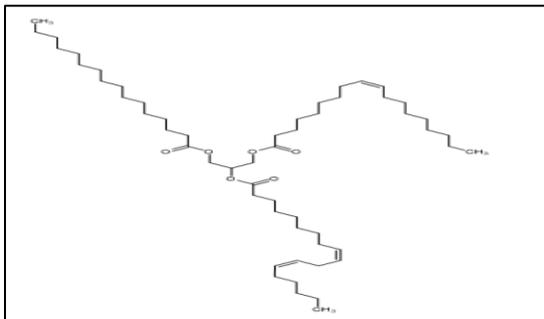


Figura A.3 Molécula PLO

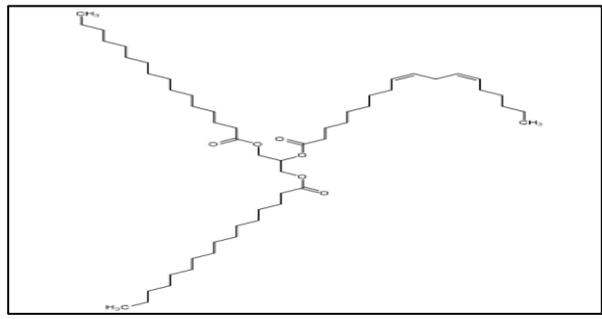


Figura A.4 Molécula PLP

APÉNDICE B: TABLA DE CORRIENTES

Tabla B1. Tabla de corrientes del proceso

Nº Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temperatura [°C]	25	25	25	60	25	25	60	60	25	25	25	25	25
Presión [atm]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo Másico [Kg/h]	45.5	2.00	47.5	47.5	200	200	200	247	20.8	227	959	982	203
Flujo Molar [Kmol/h]	1.42	0.0500	1.47	1.47	0.237	0.237	0.237	1.71	0.254	1.45	53.2	53.2	0.729
%Molar													
TG	0	0	0	0	100	100	100	0.586	0	0.689	0	0	1.37
DG	0	0	0	0	0	0	0	0.435	0	0.511	0	0	1.00
MG	0	0	0	0	0	0	0	0.908	0	1.067	0	0	2.12
BIODIÉSEL	0	0	0	0	0	0	0	38.2	0	44.8	0	0	89.3
METANOL	100	0	96.6	96.6	0	0	0	45.0	0	52.9	0	1.41	0.960
NAOH	0	100	3.40	3.40	0	0	0	2.929	19.7	0.000	0	0	0
AGUA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	98.6	5.18
GLICEROL	0	0	0	0	0	0	0	12.0	80.3	0.000	0	0	0

APÉNDICE C: FLUJO DE CAJA

Tabla C.1 Flujo de caja

Año	Inversión	d_k	$FCI_L - S_{dk}$	R	COM_d	$(R - COM_d - d_k) * (1 - t) + d_k$	Flujo de Caja (No-descontado)	Flujo de Caja (descontado)	Flujo de Caja Acumulativo (descontado)	Flujo de Caja Acumulativo (No-descontado)
0	0.00		0.42				0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.50		0.42				(0.50)	(0.50)	(0.50)	(0.50)
1	0.25		0.42				(0.25)	(0.23)	(0.73)	(0.75)
2	0.17		0.42				(0.17)	(0.14)	(0.87)	(0.92)
2	0.18		0.42				(0.18)	(0.15)	(1.02)	(1.10)
3		0.08	0.34	3.58	3.08	0.44	0.44	0.33	(0.69)	(0.66)
4		0.13	0.20	3.58	3.08	0.44	0.44	0.30	(0.38)	(0.22)
5		0.08	0.12	3.58	3.08	0.44	0.44	0.27	(0.11)	0.22
6		0.05	0.07	3.58	3.08	0.43	0.43	0.24	0.13	0.65
7		0.05	0.02	3.58	3.08	0.43	0.43	0.22	0.35	1.09
8		0.02	-	3.58	3.08	0.43	0.43	0.20	0.55	1.51
9			-	3.58	3.08	0.42	0.42	0.18	0.73	1.94
10			-	3.58	3.08	0.42	0.42	0.16	0.90	2.36
11			-	3.58	3.08	0.42	0.42	0.15	1.05	2.79
12			-	3.58	3.08	0.46	0.46	0.15	1.19	3.25
12							0.68	0.22	1.41	3.93