



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS DE POLLO**

Pablo Alejandro Sazo Magaña

Asesorado por la Mtra. Adela María Marroquín González

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS DE POLLO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PABLO ALEJANDRO SAZO MAGAÑA

ASESORADO POR LA MTRA. ADELA MARÍA MARROQUÍN GONZÁLES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. César Ariel Villela Rodas
EXAMINADORA	Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS DE POLLO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 29 de octubre de 2020.



Pablo Alejandro Sazo Magaña

Ref. EEPFI-0510-2021
Guatemala, 22 de abril de 2021

Director
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS DE POLLO**, presentado por el estudiante **Pablo Alejandro Sazo Magaña** carné número **201314269**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Energía y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Adela María Marroquín González
Asesora

Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col. No. 1446


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético




Mtro. Edgar Darío Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Ref.EEP.EIQ. 009.2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS DE POLLO**, presentado por el estudiante universitaria Pablo Alejandro Sazo Magaña, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. William G. Alvarez Mejía, M.I.Q., M.C.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, abril de 2021



DTG. 435-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS DE POLLO**, presentado por el estudiante universitario: **Pablo Alejandro Sazo Magaña**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
Mis padres	Por haberme traído al mundo y guiado a través de él, mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.
Mis hermanos	William y Marcela Sazo por su apoyo y compañía durante mi vida.
Mi abuela	Cándida Flor Arriaza, por sus sabias enseñanzas y consejos durante toda mi vida.
Mi novia	Ana Lucía García, por brindarme su apoyo incondicional durante todo el desarrollo de la carrera universitaria y la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <i>alma mater</i> que me permitió nutrirme de conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Laboratorio de Ingeniería Química	Por haberme brindado el conocimiento necesario para realizar este diseño de investigación.
Mis amigos	Por haberme acompañado durante la carrera.
Mi asesora	Inga. Adela Marroquín por haberme guiado durante el trabajo de graduación.
Catedrático del curso seminario de investigación	Ing. José Rosal, por su exigencia en entregar un trabajo de calidad digno de un profesional de maestría.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Combustibles.....	17
7.1.1. Combustibles fósiles.....	17
7.1.1.1. Diésel.....	18
7.1.2. Biocombustibles.....	19
7.1.2.1. Bioalcoholes	23
7.1.2.2. Bioaceites	24
7.2. Biodiésel.....	24

7.2.1.	Propiedades del biodiésel	26
7.2.1.1.	Dependencia de las propiedades del biodiésel con la estructura de los alquil-ésteres de ácidos grasos	27
7.2.1.2.	Calor de combustión	28
7.2.1.3.	Flujo en frío	28
7.2.1.4.	Estabilidad oxidativa.....	29
7.2.1.5.	Viscosidad.....	29
7.2.1.6.	Lubricidad.....	29
7.2.2.	Métodos de producción de biodiésel	30
7.2.2.1.	Tecnologías para la producción de biodiésel	32
7.2.3.	Transesterificación	34
7.2.3.1.	Variables que afectan el proceso de transesterificación	36
7.3.	Operaciones unitarias	38
7.3.1.	Filtración.....	39
7.3.1.1.	Filtros de torta	41
7.3.2.	Destilación.....	44
7.3.2.1.	Destilación continua	48
7.3.3.	Decantación	49
7.4.	Reactores.....	51
7.4.1.	Reactores por lotes	51
7.4.2.	Reactores de flujo continuo.....	53
7.4.2.1.	Reactor continuo de tanque agitado.....	53
7.4.2.2.	Reactor tubular.....	53
7.4.2.3.	Reactor de lecho empacado.....	54
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	55

9.	METODOLOGÍA.....	59
9.1.	Tipo de estudio	59
9.2.	Definición de variables.....	59
9.3.	Fases del estudio	60
9.3.1.	Fase 1: exploración bibliográfica	61
9.3.2.	Fase 2: recolección de materia prima	61
9.3.3.	Fase 3: producción de biodiésel	61
9.3.3.1.	Preparación de metóxido de sodio	63
9.3.3.2.	Procedimiento de producción de biodiésel	64
9.3.4.	Fase 4: caracterización del biodiésel obtenido	65
9.3.5.	Fase 5: diseño de la planta piloto	67
9.3.6.	Fase 6: análisis económico.....	68
9.3.7.	Fase 7: estimación de reducción en la contaminación.....	69
9.3.8.	Fase 8: presentación y discusión de resultados	69
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	71
11.	CRONOGRAMA.....	75
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	77
13.	REFERENCIAS	81
14.	APÉNDICES	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Proceso de producción de biodiésel discontinuo.....	33
2.	Representación de un reactor PFR y su relación con los reactores CSTR	34
3.	Ecuación química de la reacción de transesterificación	35
4.	Ecuación química de la reacción de saponificación	36
5.	Filtro tipo Nutsche	41
6.	Modelo de decisión para resolver problemas de filtración.....	43
7.	Columna de fraccionamiento continuo con secciones de rectificación y agotamiento.....	46
8.	Plato de circulación cruzada típico	47
9.	Válvula fija	48
10.	Destilación simple en un destilador discontinuo	49
11.	Decantador vertical	50
12.	Decantador horizontal	51
13.	Reactor homogéneo por lotes simple.....	52
14.	Reactor PFR.....	54
15.	Reactores usados comúnmente.....	54

TABLAS

I.	Clasificación de tipos de diésel según el uso	19
II.	Tipos de biocombustibles.....	21
III.	Procesos de obtención de biocombustibles	22

IV.	Tipos de biomasa y sus características	22
V.	Grupos de ácidos grasos típicos en el biodiésel.....	26
VI.	Propiedades de los ésteres de ácidos grasos más relevantes para el biodiésel.....	27
VII.	Parámetros que influyen en el proceso de producción de biodiésel por transesterificación	37
VIII.	Características de materiales de filtros	39
IX.	Variables involucradas en el estudio.....	59
X.	Equipo que se utilizará en la planta piloto del LIEXVE	62
XI.	Reactivos y materia prima	63
XII.	Estándar americano ASTM D6751 y estándar europeo EN14214 para biodiésel.....	66
XIII.	Cronograma de actividades	75
XIV.	Materiales y equipo para utilizar	77
XV.	Equipo de seguridad	78
XVI.	Reactivos y materia prima	78
XVII.	Resumen de costos	78

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
h	Horas
=	Igual que
Kg	Kilogramo
KJ	Kilojoule
psi	Libras por pulgada cuadrada
m	Metro
m^3	Metro cúbico
Min	Minuto
%	Porcentaje
% (m/m)	Porcentaje en masa
P	Potencia
“	Pulgadas
Q	Quetzales

GLOSARIO

Ácidos grasos	Grupo de ácidos orgánicos, con un único grupo carboxilo (RCOOH), entre los que se encuentran los ácidos saturados de cadena lineal producidos por la hidrólisis de grasas.
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
Biocombustible	Cualquier combustible sólido, líquido o gaseoso producido a partir de materia orgánica.
Biodiésel	El nombre biodiésel es aplicado a combustibles de origen orgánico que se prestan a sustituir total o parcialmente el diésel de petróleo, en particular en el empleo en motores a pistón de encendido por compresión (los llamados “motores diésel”).
Catalizador	Sustancia que altera la velocidad de una reacción química, acelerándola o retrasándola, pudiendo recuperarse sin cambios esenciales en su forma o composición al final de la reacción.
Concentración	Cantidad de soluto en el extracto y en el refinado.
Densidad	Peso específico.

Éster	Compuesto formado por la reacción de un ácido y un alcohol.
Éster metílico	Producto de la separación de compuestos en una reacción de transesterificación, se le conoce comúnmente como biodiésel.
Esterificación	Proceso reactivo que produce un éster a partir de un ácido y un alcohol.
Plantas oleaginosas	Plantas que de su semilla o fruto puede extraerse aceite, en algunos casos comestibles o de uso industrial.
Transesterificación	Reacción de esterificación por la cual se obtiene el biodiésel que consiste en combinar aceite con un alcohol ligero y que deja como producto secundario a la glicerina.
Triglicérido	Son acilgliceroles que están formados por una molécula de glicerol que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo por tres ácidos grasos.

RESUMEN

El aceite residual de frituras de pollo en restaurantes de comida rápida tiene un aspecto de color oscuro y un olor muy desagradable. Sin embargo, se han realizado estudios que comprueban la factibilidad del aprovechamiento de esta materia prima, antes llamado residuo, para la producción de biodiésel, un combustible con una capacidad calorífica muy similar al diésel de petróleo. El proceso de fabricación tiene muchas variantes, pero todas se desarrollan en torno al proceso reactivo de la transesterificación que consiste en la reacción de un alcohol de cadena corta, como el metanol o etanol, junto con los triglicéridos contenidos en el aceite residual y se obtienen como productos el biodiésel y glicerina. Ambos productos de la reacción son útiles para otras industrias, pero el biodiésel se destaca por su similitud al diésel que se usa en vehículos pesados y que además promueve el uso de una sustancia que de lo contrario es una gran fuente de contaminación para cuerpos de agua.

En ingeniería química se obtienen los conocimientos del diseño de procesos industriales desde nivel laboratorio o planta piloto y escalarlo a nivel industrial. El presente trabajo está orientado hacia la producción de biodiésel a escala planta piloto utilizando como materia prima aceite obtenido como residuo del proceso de frituras de pollo, realizando variaciones en la concentración de alcohol y en el tiempo de reacción de transesterificación. Los datos obtenidos serán de utilidad para el diseño de una planta piloto que permita mantener el mismo o mejorar el rendimiento de acuerdo con las pruebas realizadas.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos productivos en el sector alimenticio de frituras de pollo tienen una gran cantidad de residuos orgánicos, pero desafortunadamente en muchos casos no se persigue un estado de cero desechos en donde se obtenga provecho de éstos de forma interna en la empresa. Esto puede conllevar a graves problemas ambientales, tal es el caso de que 1 litro de aceite desechado contamina en promedio 1,000 litros de agua.

La propuesta de diseñar una planta piloto que fabrique biodiésel para una empresa del sector de frituras de pollo de modo que se pueda demostrar su viabilidad tanto económica como técnica es una solución que puede tener atractivos beneficios al problema de manejo de residuos contaminantes. Muchas veces se ve una inversión como una pérdida si no se sabe lo que se puede llegar a ganar haciéndola y por eso la importancia de hacer una investigación dirigida al aprovechamiento de aceite residual de frituras de pollo.

Como resultado del trabajo de investigación se obtendrá una propuesta de diseño de una planta piloto para producir biodiésel a partir de aceite residual de frituras de pollo de manera que un material sin valor se transforma en un biocombustible con un valor, ya sea si la empresa lo utiliza en procesos internos o para su venta. Un beneficio igual de importante es que presentará una contribución directa a la disminución en la producción de gases de efecto invernadero.

Para llevar a cabo la investigación se iniciará con la preparación de la información necesaria para decidir cómo se debe realizar la transformación del

aceite residual en biodiesel, ya que, según su contenido de triglicéridos, humedad y de ácidos grasos libres, se pueden hacer modificaciones al proceso con el objetivo de aumentar la productividad y de aumentar la selectividad de la reacción de transesterificación por sobre la de saponificación. La materia prima será sometida a un proceso de separación de impurezas ya que es un aceite residual, además de la deshidratación. Posteriormente se realizará la transesterificación de los glicéridos para la formación de biodiésel.

Con la información de la producción en la planta piloto se procederá a diseñar el proceso productivo detallando costos estimados de adquisición de equipo, servicios auxiliares del proceso y de operación. Con base en el diseño propuesto se realizará un análisis económico para determinar la viabilidad del proyecto.

En el capítulo 1, del trabajo de investigación, se presentarán los antecedentes más relevantes en un proyecto de diseño de una planta piloto para fabricar biodiésel. En el capítulo 2, se realizará una revisión bibliográfica de los principios científicos del tema de biodiésel con énfasis en el proceso productivo, parámetros de calidad y criterios de diseño de las operaciones comúnmente utilizadas en la producción de biocombustibles. En el capítulo 3, se desarrollará la fase experimental del trabajo, es decir, la fabricación de biodiésel a escala planta piloto y medición de propiedades del producto.

En el capítulo 4, se analizarán los datos recolectados y previamente estructurados para su posterior análisis. El capítulo 5 y 6, comprenderán la discusión y presentación de los resultados obtenidos de las pruebas con base en los análisis de laboratorio y en el diseño propuesto. Finalmente se concluirá acerca del trabajo de investigación y se plantearán recomendaciones para dar continuidad al estudio.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala se han realizado estudios acerca de la producción de biodiésel a partir de aceites residuales. Las publicaciones encontradas son de la Universidad de San Carlos y de la Universidad Rafael Landívar en donde se llevaron a cabo experimentos para determinar condiciones óptimas para la producción de biodiésel, así como del análisis del potencial de producción que se tiene en Guatemala.

En la Universidad Rafael Landívar de Guatemala se realizó el estudio *Producción de biodiésel a partir de desechos de aceite a nivel de laboratorio*, en el cual Contreras, López, Martínez y Villavicencio (2019) aplicaron los conocimientos en la producción de biodiésel a escala laboratorio con aceites usados de origen doméstico haciendo énfasis en las reacciones de esterificación y transesterificación que ocurren. Señalaron las aplicaciones del biodiésel, así como de la glicerina que es un subproducto de la reacción. Una parte muy importante de la investigación fue la caracterización del biodiésel obtenido pues propiedades como el punto de inflamación son vitales para cumplir con estándares internacionales.

Un estudio realizado en la Universidad de San Carlos de Guatemala titulado *Uso energético de residuos de cocinas industriales para la fabricación de biodiésel*, Ipiña y Cifuentes (2016) llevaron a cabo el análisis del uso del aceite utilizado en cocinas industriales y en hogares recopilando datos del Ministerio de Energía y Minas. Concluyeron que la producción de biodiésel es factible en Guatemala ya que se tiene fácil acceso a la tecnología para fabricarlo, sin embargo, plantean que es mucho más factible que las propias empresas, como

cadena de restaurantes, desarrollen proyectos para transformar sus aceites residuales en este biocombustible. Tomaron en cuenta que el aceite está sucio para realizar una metodología minuciosa que permite fabricar biodiésel.

Se encontraron publicaciones fuera de Guatemala con un gran valor para la presente investigación pues se realizaron estudios de optimización del proceso de transesterificación y caracterización de los aceites residuales utilizados para tales experimentos.

En la publicación *Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio*, Tacias, Rosales y Torrestiana (2016) desarrollaron la caracterización de las grasas y aceites de ocho tipos de restaurantes donde se obtuvo que producen un total de 174 t por año en las siguientes proporciones: 41 % restaurantes formales, 24 % comida rápida, 8 % taquerías, 7 % antojitos, 6 % cocinas económicas, 6 % bares, 4 % gorditas y 4 % rosticerías. Se evaluó la viscosidad, estabilidad oxidativa, contenido de ácidos grasos, índice de acidez, índice de saponificación, humedad y composición de ácidos grasos libres. Encontraron que todas las grasas y aceites cumplen con los niveles de acidez y ácidos grasos libres para la reacción de transesterificación alcalina. Además, plantean que en México se podrían producir 34.9 kt de biodiésel/año con lo que se evitarían 92 kt de dióxido de carbono/año.

Villadiego, Roa y Benítez (2015) publicaron el estudio *Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiésel*, en donde evaluaron el efecto de la relación aceite:ácido sulfúrico, aceite:metanol y de la concentración hidróxido de sodio sobre el rendimiento de la reacción para obtener biodiésel. Se encontró que la concentración de catalizador, al igual que la relación aceite:ácido no tuvo efectos significativos sobre el rendimiento, en el

rango evaluado, y que la relación aceite:metanol si tiene un efecto. Obtuvieron un rendimiento máximo de 93 % con una relación aceite:metanol de 6:1, es decir, a concentraciones bajas. Se fabricó biodiésel que cumple con características de acidez y bajo contenido de azufre. De manera general se caracterizó el biodiésel obtenido para compararlo con las normas internacionales.

En el trabajo de graduación *Diseño del proceso de producción del biodiésel a partir de aceites de fritura*, Bulla (2014) desarrolló el diseño del proceso de producción de biodiésel separándolo en una fase de esterificación con catálisis ácida y una segunda fase para la transesterificación con catálisis básica. Realizó la caracterización fisicoquímica y química del aceite para el proceso. Analizó las variables: temperatura de reacción, porcentaje en peso del catalizador, relación molar de 1:8 -Esterificación-, y 1:7 -Transesterificación-, a escala planta piloto de proceso discontinuo. Se obtuvo biodiésel que cumple con las características físicas y químicas según las normas ASTM D 6751 con un rendimiento de 93.52 %. Las calderas que emplean diésel para su funcionamiento se benefician de este estudio pues las condiciones óptimas encontradas hacen posible que el biodiésel obtenido sea utilizado en estos equipos industriales.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema que existe en muchas empresas que poseen un alto consumo de materiales e insumos, para producir un producto final, es que puede llegar a ser difícil establecer un estado de cero residuos. En algunas plantas de producción se generan residuos en la mayoría de las etapas productivas y procesos paralelos en donde el reto es que con algún tratamiento alternativo puedan ser reingresados al proceso de manera que sean reutilizados, reciclados o transformados. En Guatemala existe una gran cantidad de restaurantes de frituras de pollo que no cuentan con tratamiento para el aceite residual. El aceite usado luego tiene la posibilidad de ser vertido junto con otros líquidos cuyo destino son cuerpos de agua como ríos o lagos. Tan solo unas gotas de aceite usado contaminan mil litros de agua y esto causa problemas de salud a pobladores que se abastecen de estos recursos.

Actualmente este problema existe debido a que hay una falta de interés en la transformación de los aceites residuales porque probablemente dado que la empresa comercializa productos alimenticios puede ser considerado, un proyecto de este tipo, muy alejado del giro de la empresa. Sin embargo, al realizar una propuesta de proyecto a escala laboratorio, que no represente una gran inversión pueda demostrarse que los costos en cuanto a combustibles fósiles para los procesos de la empresa pueden disminuirse, lo que nos lleva a otro problema: los combustibles fósiles.

Los combustibles fósiles son fácilmente comprados ya que es la principal fuente utilizada para transporte pesado y procesos de combustión por aceptación general y que cumple las características de calidad. La migración hacia otro tipo

de combustible se vuelve difícil pues ya cuentan con uno que cumple estándares para sus procesos.

Uno de los problemas que conlleva el uso de combustibles fósiles para los procesos de la empresa es que se amarra directamente a tener únicamente este combustible y se genera una dependencia que puede representar un alto consumo debido al alcance que tiene la cadena de restaurantes de la empresa, además, esta dependencia aumenta la vulnerabilidad debido a las fluctuaciones en los precios de este carburante pues es un mercado internacional. La compra de este combustible con precios fluctuantes impacta a la empresa con una inestabilidad en el margen de ganancias ya que los precios de sus productos no son tan fácilmente modificables, de acuerdo con los costos de producción, una vez se han establecido en el mercado.

Actualmente es muy conocido que la combustión de diésel es altamente contaminante porque produce altos niveles de CO₂ que es un gas de efecto invernadero. Si dentro de la empresa se utiliza este combustible se está contribuyendo de manera directa al calentamiento global por la producción de este gas. Aparte de ello si la empresa no cuenta con algún sistema de gestión de este residuo probablemente pueda acabar en sistema de drenaje hacia cuerpos de agua como ríos y lagos.

Con base en todos los puntos discutidos en este apartado este estudio se plantea la siguiente pregunta: ¿es posible diseñar una planta piloto para producir biodiésel a partir del aceite residual de frituras de pollo, en Guatemala?

Para responder a la interrogante global del estudio será necesario contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuánto biodiésel se puede producir por kg de aceite residual?
- ¿Cuál es el diseño más apropiado para una planta piloto de producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo?
- ¿Será factible económicamente una planta piloto de producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo en Guatemala?
- ¿Cuál sería la estimación de la reducción en contaminación ambiental por la inclusión de biodiésel en los insumos de la empresa como sustituto parcial de combustibles fósiles?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de diseño y aplicación de proyectos de biomasa y biocombustibles en el Área de Gestión Energética de la Maestría en Energía y Ambiente.

La aplicación de proyectos de energías renovables es uno de los temas de mayor importancia en la actualidad pues se ha buscado la independencia de los combustibles fósiles ya que esto provoca que las industrias enfrenten problemas con regulaciones ambientales, relaciones sociales e incluso costos. Con proyectos de energías alternativas, específicamente de biocombustibles, se está aportando a que algunas de las industrias guatemaltecas tengan las herramientas para ser autosuficientes y aún más importante que puedan aportar a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles.

La presente investigación desarrollará el diseño de una planta piloto para la producción de biodiésel específicamente con aceite residual de frituras de pollo. Este biocombustible puede sustituir al diésel pues tiene un poder calorífico muy similar que puede ser utilizado para calentamiento, transporte o incluso para venta. La volatilidad de costos en combustibles fósiles, que en Guatemala son importados, da lugar al interés en los biocombustibles. Con este estudio se puede proveer una herramienta que sirva de base para otros proyectos para transformar aceites residuales de cocina en biodiésel.

De manera directa se beneficia a la industria de frituras de pollo, puesto que se les otorga una metodología que da una gestión a sus residuos de cocina, que

de otra forma podrían ser un importante contaminante en el ambiente. Este método puede ser también usado por otras industrias del ramo que emitan residuos aceitosos. Son de pertinencia social este tipo de estudios pues las empresas tienen una responsabilidad ante la comunidad, sobre el manejo de sus residuos y las fuentes energéticas que utilizan.

El estudio es pertinente, pues a pesar de que el método de síntesis del biodiésel es conocido, el escalamiento del proceso es poco conocido y en especial la posibilidad de hacerlo con recursos locales, como se demostrará.

5. OBJETIVOS

- General

Diseñar una planta piloto para producir biodiésel a partir del aceite residual de frituras de pollo.

- Específicos

- Calcular el rendimiento óptimo de biodiésel producido a escala planta piloto por transesterificación de aceite residual de frituras de pollo en función de la relación aceite a metanol.
- Especificar el diseño más apropiado de una planta piloto para la producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo.
- Evaluar la factibilidad económica de una planta piloto de producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo.
- Estimar la reducción en contaminación ambiental por la inclusión de biodiésel en los insumos de la empresa como sustituto parcial de combustibles fósiles.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

De acuerdo con la problemática que presenta la falta de propuestas de energías renovables para disminuir el uso de las fuentes de combustibles fósiles en las matrices energéticas, se propone una investigación dirigida al diseño de una planta piloto para producir biodiésel con aceites residuales de frituras de pollo con el propósito de aportar a la industria de frituras con una herramienta que contenga especificaciones de equipo, de proceso y de optimización para que pueda ser aplicada como base para futuros proyectos que permitan la transformación de éstos residuos en biocombustible. De otra manera muchos residuos aceitosos (oleaginosos) probablemente son vertidos hacia cuerpos de agua como ríos y lagos del país.

La falta de interés por parte de las industrias de manejar sus propios residuos es una mentalidad que debe cambiar pues cada empresa es responsable de los residuos de sus procesos. Esto puede deberse a que no se tiene el conocimiento acerca de metodologías de manejo de sus residuos o incluso se ignoran por ser ajeno al giro de la empresa, sin embargo, esta investigación puede servir al interesado en desarrollar un proyecto de transformación de residuos aceitosos.

Además, se tiene la facilidad de acceso de los combustibles fósiles que crean una alta dependencia hacia ellos ya que no se cuentan con alternativas más limpias que puedan sustituir a estos combustibles que son altos generadores de gases de efecto invernadero, pero que cumplen con estándares para todos los procesos. Con proyectos que puedan generar biocombustibles a partir de la industria de frituras de pollo se estaría apoyando directamente a la reducción de

emisiones de gases de efecto invernadero, incluso mejor si se hace con proyectos internos a la empresa y con residuos de sus propios procesos que al mismo tiempo puedan obtenerse beneficios económicos.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Combustibles

Un combustible es cualquier material con la capacidad de liberar energía potencial al ser sometido a una reacción de combustión en donde se oxida de forma violenta. En la vida cotidiana se busca aprovechar la energía producida y convertirla en otras formas de energía, como energía térmica, mecánica o eléctrica para cumplir funciones de calefacción, activación de maquinaria o electrificación.

Generalmente los combustibles son sustancias que queman fácilmente y por eso la principal característica de estos materiales es su capacidad para liberar calor por la combustión. El calor desprendido por unidad de masa del combustible se conoce como poder calorífico y en el sistema internacional se expresa en julios por kilogramo, que es el más utilizado. Los combustibles que han sido utilizados con mayor aceptación son los de origen orgánico que básicamente contienen carbono e hidrógeno por su facilidad de obtención. La importancia de estos materiales es que la energía que potencialmente pueden liberar se puede convertir en energía aprovechable (Orellana, 2012).

7.1.1. Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son sustancias orgánicas que se han formado a durante muchos siglos de manera natural por descomposición de restos animales y vegetales. Tienen la característica particular de ser altamente ricos en energía potencial y que queman con facilidad. Estos combustibles son la razón de la

evolución del planeta hacia la era industrial en la que vivimos actualmente, entre los combustibles fósiles se encuentran el petróleo, el carbón y el gas natural (Orellana, 2012).

Del petróleo se derivan subproductos básicos como nafta, keroseno, combustible para aviación, gasoil, fueloil, lubricantes, asfaltos, gas licuado de petróleo y productos básicos para la industria petroquímica. El gas natural es empleado sobre todo en la calefacción y el carbón es el combustible fósil más utilizado para la generación de energía eléctrica.

7.1.1.1. Diésel

El diésel de petróleo, también llamado petrodiesel, gasóleo, gasoil, o diésel fósil se produce a partir de la destilación fraccionada de petróleo crudo entre 200 °C y 350 °C con posterior purificación, lo que resulta en hidrocarburos compuestos por entre ocho y veintiún átomos de carbono. El diésel tiene un alto poder calorífico (48,81 MJ/kg), comparable con la gasolina (47,19 MJ/kg), y presenta poca volatilidad. La utilización de este combustible inició en los motores diésel, creados por el ingeniero alemán Rudolph Diesel en 1893. Se trata de motores de combustión interna en los cuales en donde el combustible se autoinflama cuando es inyectado en la cámara por la alta temperatura del aire comprimido (López, 2011).

El diésel se puede clasificar de tipo A, B y C según el uso que se les da de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla I. **Clasificación de tipos de diésel según el uso**

Tipo de diésel	Características
Diésel A	Es el diésel de alta calidad, adecuado para los automóviles por estar más refinado que el resto. Entre sus aditivos se encuentran sustancias que ayudan a disminuir el consumo, bajar las emisiones contaminantes, y proteger el sistema de inyección. En función al nivel de azufre puede ser hasta 10 veces más limpio desde un punto de vista ecológico, que el diésel convencional.
Diésel B	Este tipo de diésel se usa frecuentemente para maquinaria agrícola, embarcaciones y algunos vehículos. Contiene más cantidad de parafina que el anterior por lo que puede solidificarse a bajas temperaturas. Además, al estar menos filtrado, puede causar problemas de mantenimiento en los motores de automóviles y motocicletas.
Diésel C	Se trata del diésel más económico de los tres. Básicamente su función es generar calor ya que contiene muchas impurezas y un elevado nivel de parafina que aporte un alto nivel calorífico por lo que está destinado a usarse en calderas de calefacción.

Fuente: Red Operativa de Desguaces Españoles. (s.f.). *El diésel o gasoil: todo lo que deberías saber*. Consultado el 10 de octubre de 2020. Recuperado de <https://www.ro-des.com/mecanica/el-diesel-o-gasoil/>.

7.1.2. Biocombustibles

Los biocombustibles son aquellos combustibles como alcoholes, éteres, ésteres y otros productos químicos que son obtenidos a partir de biomasa, en otras palabras, cualquier tipo de materia orgánica que sea originada del proceso biológico de organismos vivos o incluso sus desechos digestivos y por ende la biomasa puede ser de origen animal o vegetal. En la actualidad toda materia orgánica originada por vía biológica que tenga un valor energético se considera como biomasa. Aunque hace muchos siglos los combustibles fósiles tuvieron su

origen de forma biológica y natural quedan excluidos de los biocombustibles, así como todos sus derivados (Callejas y Quezada, 2009).

La forma de agrupar que se ha aceptado comúnmente para los biocombustibles está en función del tipo de materia orgánica de donde proviene de manera que se clasifican como biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación. Los biocombustibles de primera generación están caracterizados como los que se producen a partir de aceites o azúcares originarios de plantas como caña de azúcar, maíz, o girasol. Si la planta de origen tiene alto contenido de azúcares, se opta por llevar a cabo una fermentación y convertirlas en alcoholes, como es el caso de la obtención del etanol a partir de caña de azúcar. En cambio, se aplica la transesterificación en el caso que la planta de origen sea rica en aceites o grasas en donde se hacen reaccionar químicamente dichos aceites con un alcohol (generalmente metanol) para generar ésteres grasos, como el biodiésel (Ramos, Díaz y Villar, 2016).

Los biocombustibles de segunda generación son definidos como los que se obtienen de fuentes orgánicas no aprovechables para alimentación humana. El aceite usado de cocina ya no puede utilizarse para consumo por lo que se puede considerar materia prima de biocombustibles de segunda generación. Los biocombustibles de segunda generación pueden ser producidos principalmente de forma termoquímica y bioquímica. Con el método termoquímico se puede obtener gas de síntesis (CO_2 , CO y H_2) o también se puede usar pirólisis para producir una mezcla de carbón y alquitrán (Ramos *et al.*, 2016).

Los biocombustibles de tercera generación se clasifican como los que se originan de organismos autótrofos, es decir, que pueden producir su propio alimento a partir de energía solar y CO_2 . Una forma muy conocida de obtener este tipo de biocombustibles es el cultivo de algas que al haberlas secado se

extrae el aceite contenido en sus células y se transforma en biocombustible utilizando un método apropiado para este aceite (Ramos et al., 2016).

Los biocombustibles de cuarta generación son obtenidos empleando organismos genéticamente modificados que cumplen la función de capturar dióxido de carbono con el propósito de producir más celulosa que se utiliza para producir biocombustibles. La ingeniería genética ha hecho posible desarrollar alteraciones a árboles para que almacenen más CO₂ que los normales. Utilizan este método para producir bioetanol de manera directa (Ramos et al., 2016).

Con estos métodos los biocombustibles se han pronunciado como una fuente de energía alterna que puede tener la función de respaldo para muchos países dependientes de la importación de combustibles fósiles o como medida de mitigación de la contaminación a largo plazo. Sin embargo, se ha generado mucha polémica social por estas tecnologías, así como en el caso de cultivos energéticos en donde se le da un propósito alterno al alimentario que no es bien aceptado (Callejas y Quezada, 2009).

Los biocombustibles también se pueden clasificar de acuerdo con su estado que puede ser sólido, líquido o gaseoso.

Tabla II. **Tipos de biocombustibles**

Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Paja	Alcoholes	
Leña sin procesar	Biohidrocarburos	Gasógeno
Astillas	Aceites vegetales	Biogás
Briquetas y pellets	Ésteres derivados de	Hidrógeno
Triturados finos	aceites vegetales	
Carbón vegetal	Aceites de pirólisis	

Fuente: Callejas y Quezada. (2009). *Los biocombustibles*.

Los biocombustibles de la tabla II pueden ser producidos por diferentes métodos según el origen de la biomasa.

Tabla III. **Procesos de obtención de biocombustibles**

Proceso	Técnicas	Productos	Aplicaciones
Mecánico	Astillado Trituración Compactación	Leñas Astillas Briquetas Aserrín	Calefacción Electricidad
Termoquímico	Pirolisis Gasificación	Carbón Aceites Gasógeno	Calefacción Electricidad Transporte Industria química
Bioteconológico	Fermentación Digestión anaeróbica	Etanol Biogás	Transporte Industria química Calefacción
Extractivo	Extracción fisicoquímica	Aceites Ésteres Hidrocarburos	Electricidad Transporte Industria química

Fuente: Callejas y Quezada. (2009). *Los biocombustibles*.

De manera análoga la biomasa también tiene su clasificación de acuerdo con su origen y propósito. La siguiente tabla proporciona las clasificaciones de acuerdo con Callejas y Quezada (2009): los biocombustibles.

Tabla IV. **Tipos de biomasa y sus características**

Tipo de biomasa	Características
Biomasa primaria	Es la materia orgánica formada directamente de los seres fotosintéticos. Este grupo comprende la biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas y forestales.
Biomasa secundaria	Es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria. La constituyen la materia fecal o la carne de los animales.

Continuación tabla IV.

Biomasa terciaria	Es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, por ejemplo, los restos y deyecciones de los animales carnívoros que se alimentan de animales herbívoros.
Biomasa natural	Es la que producen los ecosistemas silvestres; 40 % de la biomasa que se produce en la tierra proviene de los océanos.
Biomasa residual	La que se puede extraer de los residuos agrícolas y forestales, y de las actividades humanas.
Cultivos energéticos	Recibe esta denominación cualquier cultivo agrícola cuya finalidad sea suministrar la biomasa para producir biocombustibles.

Fuente: Callejas y Quezada. (2009). *Los biocombustibles*.

Los biocombustibles líquidos de primera generación son los más favorecidos y reconocidos a nivel mundial; los Estados Unidos son el mayor productor mundial de biocombustibles y han llegado a producir más de 4700 millones de litros de biodiésel y 54.300 millones de litros de bioetanol (Ramos *et al.*, 2016).

7.1.2.1. Bioalcoholes

La materia prima empleada para fabricar los alcoholes de origen orgánico (bioetanol y biometanol) es muy variada: cereales (maíz, trigo y cebada), tubérculos (yuca, camote, patata y malanga), celulosa (madera y residuos agrícolas), y sacarosa (remolacha, caña de azúcar, melaza y sorgo dulce). Estos componentes se transforman en azúcares, y a continuación se transforman en alcohol para ser aplicados en mezclas con gasolina como sustitución parcial, ya que esta le da a la mezcla estabilidad y resta volatilidad (Callejas y Quezada, 2009).

Las mezclas pueden ser de E5, E10, E20 y hasta E95, de modo que E5 implica un 5 % de etanol en la mezcla. Emplear etanol en la mezcla reduce la cantidad de dióxido de carbono emitido por lo que es determinante en la contaminación de la combustión, sin embargo, para poder utilizar estas mezclas es necesaria la modificación en algunos vehículos.

7.1.2.2. Bioaceites

Los bioaceites se obtienen de las plantas oleaginosas como girasol, soja, palma africana, colza, manía, entre otras) y de aceites vegetales fritos (aceite de cocina). A este tipo de aceite se le ha considerado como un combustible para motores desde que el inventor del motor diésel (Rudolph Diesel) lo mencionó como adecuado para su motor en el año 1,912. Esto permitiría bajar los costos de combustible, se duplica la vida útil de los vehículos y como adicional a estos beneficios se reducen las emisiones de monóxido de carbono, azufre, hidrocarburos aromáticos y partículas sólidas. El biodiésel es prácticamente una combinación de bioaceites con diésel (combustible fósil) por su similitud y con el propósito de obtener un combustible más limpio (Callejas y Quezada, 2009).

7.2. Biodiésel

El biodiésel, en términos científicos, es un éster que puede ser producido a partir de aceites animales o vegetales, así como de grasas, también de soja, colza, girasol o palmera, aplicando un proceso llamado transesterificación, en donde los triglicéridos contenidos se combinan con el alcohol (generalmente metanol) y a través de la reacción forman ésteres grasos, como etiléster (si se usa etanol) o metil éster (si se usa metanol). Estos ésteres grasos son

denominados biodiésel y pueden mezclarse con diésel de origen fósil (Amézquita 2005).

El biodiésel está definido por la ASTM (Sociedad americana para pruebas y materiales) como un combustible compuesto de monoalquil ésteres de ácidos grasos de cadena larga derivado de aceites vegetales o grasas animales designado B100. La materia prima de origen vegetal y animal para producir biodiésel son conocidos como triacilglicéridos, o más simplemente, triglicéridos. El biodiésel es producido por un proceso químico conocido como transesterificación, por el cual los triglicéridos son reaccionados con alcoholes en la presencia de un catalizador, para producir alquil ésteres. Un subproducto de la transesterificación es glicerina, además conocido como glicerol. Ya que el alcohol más común usado para producir biodiésel es metanol otro nombre para biodiésel es metil ésteres de ácido graso. A no ser que se indique de otra manera, el término "Biodiésel" se refiere a material puro, es decir, 100 % metil ésteres de ácidos grasos, a menudo designado como B100. Inferior concentraciones, tal como B10 son correctamente referido como "mezclas de biodiésel" no biodiésel por sí mismo (Hoekman, Broch, Robbins, Cenicerros y Natarajan, 2012).

Virtualmente el biodiésel puede producirse por transesterificación a partir de cualquier fuente de triglicéridos, más de 300 especies vegetales. En la literatura se encuentran cientos de referencias de producción de biodiésel a partir de una gran variedad de fuentes ácidos grasos. Sin embargo, en el presente las fuentes dominantes son el aceite de soja en Estados Unidos, aceite de colza en Europa y aceite de palma en el sureste de Asia. Las grasas animales (especialmente el sebo de vaca) y los aceites de cocina usados representan nichos de mercado para el biodiésel en muchas partes del mundo (Hoekman, et al., 2012).

7.2.1. Propiedades del biodiésel

Aunque el biodiésel producido por transesterificación de triglicéridos contiene numerosas especies individuales de metil ésteres de ácidos grasos, un combustible particular está generalmente compuesto principalmente por solo unas pocas especies.

Tabla V. Grupos de ácidos grasos típicos en el biodiésel

Nombre común	Nombre formal	Núm. CAS.	Abreviatura	Fórmula molecular	Peso molecular
Ácido láurico	Ácido dodecanoico	143-07-7	12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	200.32
Ácido mirístico	Ácido tetradecanoico	544-63-8	14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	228.38
Ácido miristoleico	Ácido <i>cis</i> -9-tetradecanoico	544-64-9	14:1	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	226.26
Ácido palmítico	Ácido hexadecanoico	57-10-3	16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	256.43
Ácido palmitoleico	Ácido <i>cis</i> -9-hexadecanoico	373-49-9	16:1	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	254.42
Ácido esteárico	Ácido octadecanoico	57-11-4	18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	284.48
Ácido oleico	Ácido <i>cis</i> -9-octadecanoico	112-80-1	18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	282.47
Ácido linoleico	Ácido <i>cis</i> -9,12-octadecadienoico	60-33-3	18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	280.46
Ácido araquídico	Ácido eicosenoico	506-30-9	20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	312.54
Ácido gondoico	Ácido <i>cis</i> -11-eicosenoico	5561-99-9	20:1	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	310.53

Fuente: Hoekman et al. (2012). *Review of biodiesel composition, properties, and specifications.*

En la tabla V los compuestos sombreados son los más comunes tales como los ácidos: palmítico, esteárico, oleico y linoleico.

7.2.1.1. Dependencia de las propiedades del biodiésel con la estructura de los alquil ésteres de ácidos grasos

Las propiedades del biodiésel que son determinadas por la estructura de los ésteres grasos incluyen calidad de ignición, calor de combustión, flujo en frío, estabilidad oxidativa, viscosidad y lubricidad (Knothe, 2005).

Como indicador de calidad el índice de cetanos (IC) es un indicador primario en el ámbito de motores diésel. El concepto es similar al octanaje usado en la gasolina con la diferencia de que un alto octanaje indica un bajo índice de cetanos y viceversa. El índice de cetanos de un diésel se relaciona con el retraso de ignición, es decir, el tiempo entre la inyección del combustible al cilindro y el punto de ignición. Un índice de cetanos alto indica poco retraso de ignición (Knothe, 2005).

Se han establecido estándares mundialmente para el índice de cetanos (IC) en donde una cadena recta y larga de hidrocarburos (hexadecano $C_{16}H_{34}$) es el estándar alto de calidad con un IC de 100 mientras que un compuesto muy ramificado como el 2,2,4,4,6,8,8,-heptametilnonano que también es $C_{16}H_{34}$ tendría baja calidad de ignición con un IC de 15 siendo el rango bajo en calidad (Knothe, 2005).

Tabla VI. **Propiedades de los ésteres de ácidos grasos más relevantes para el biodiésel**

Nombre común	Punto de ebullición (°C)	Índice de cetanos	Calor de combustión (kg cal/mol)
Éster metílico de ácido palmítico	415 – 8	74.5 (93.6 % pureza)	2550

Continuación tabla VI.

Éster etílico de ácido palmítico	191	85.9	2717
Éster metílico de ácido esteárico	442 - 3	86.9 (92.1 % pureza)	2859
Éster etílico de ácido esteárico	199	76.8	3012
Éster metílico de ácido oleico	218.5	59.3	2828
Éster etílico de ácido oleico	216 - 7	67.8	-
Éster metílico de ácido linoleico	218	42.2	-
Éster etílico de ácido linoleico	270 - 5	39.6	2794
Éster metílico de ácido linolénico	-	-	-
Éster etílico de ácido linolénico	109	22.7	2750

Fuente: Knothe. (2005). *Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters.*

7.2.1.2. Calor de combustión

El calor de combustión es una propiedad que indica la aplicabilidad de compuestos grasos como combustible diésel pues como en la tabla se puede observar esta propiedad oscila entre 2500 kg cal/mol a aproximadamente 3100 kg cal/mol para los ésteres grasos comunes.

7.2.1.3. Flujo en frío

Uno de los problemas que presenta el uso de biodiésel es la falta de fluidez a baja temperatura que está determinado por el punto de nube y punto de fluidez.

El punto de nube es la temperatura en que un material líquido graso se vuelve nuboso debido a la formación de cristales y solidificación de saturados, estos crecen y atascan las tuberías y filtros causando problemas de operación mayores. El biodiésel derivado de grasas o aceites con cantidades significantes de compuestos grasos saturados muestran puntos de nube y fluidez más altos que los insaturados (Knothe, 2005).

7.2.1.4. Estabilidad oxidativa

La siguiente propiedad del biodiésel que sirve de indicador para la calidad es la estabilidad oxidativa y ha sido un tema considerable de investigación. Esta característica afecta al biodiésel principalmente durante almacenamiento prolongado en donde la influencia del aire, calor, luz, trazas de metal, antioxidantes, peróxidos y material del contenedor son relevantes para afectar la estabilidad oxidativa del combustible (Knothe, 2005).

7.2.1.5. Viscosidad

La viscosidad del combustible afecta la atomización al momento de la inyección a la cámara de combustión y por ende puede llevar a la formación de depósitos en el motor. La alta viscosidad de los aceites vegetales puros ha causado que sean abandonados como alternativa de combustible. La viscosidad cinemática ha sido incluida en los estándares de biodiésel (1.9 – 6.0 mm²/s en ASTM D6751 y 3.5 – 5.0 mm²/s en EN 14214). Para calcularlo se utiliza la ASTM D445 o ISO 3104 (Knothe, 2005).

7.2.1.6. Lubricidad

Con el diésel derivado de petróleo el problema con la lubricación ha ido incrementando por el bajo contenido de azufre. La eliminación de azufre en estos combustibles junto con componentes polares durante la desulfuración provoca la pérdida de lubricidad. La adición de biodiésel en bajas cantidades (1 - 2 %) regenera la propiedad de lubricación en estos combustibles debido a las propiedades de los compuestos grasos. La caracterización de esta propiedad en muchos estudios no ha reportado cambios significativos entre los diferentes tipos de biodiésel de ácidos grasos, sin embargo, la variedad insaturada tiene mejor lubricidad que la contraparte saturada y los etil ésteres tienen una capacidad más alta de lubricación que los metil ésteres.

7.2.2. Métodos de producción de biodiésel

Los biocombustibles de segunda generación tienen una ventaja sobre los de primera generación a nivel de factibilidad económica porque se obtienen de vegetales que no tienen una función alimentaria que en el caso de los de primera generación si se utilizan para la producción de este biocombustible puede generar crisis alimentaria en el país. Otra ventaja que presentan es que se producen con innovaciones tecnológicas que están mejorando con el tiempo y permitirán ser más eficientes que los actuales. Debido a que se obtienen de materias primas no destinadas a la industria alimentaria, se pueden cultivar en tierras que no se emplean para el cultivo de alimentos (Callejas y Quezada, 2009).

Por esto las ventajas de la producción de biodiésel de segunda generación se pueden resumir en:

- Al disponer de una mayor variedad de materias primas y no ser comestible no compiten con la función alimentaria, de manera que no son alternativos a los alimentos, aunque puede que la generen con la industria que utiliza fibras vegetales o madera.
- Pueden plantarse en áreas no agrícolas ni ganaderas, particularmente pueden diversificar el uso de los bosques e incentivar la silvicultura y frenar la deforestación. En algunos casos podrán servir para recuperar terrenos erosionados en laderas o zonas desertificadas y fijar CO₂ a través de su sistema de raíces.
- El agua que consumen la generan los propios bosques por su función ecosistémica con la generación de lluvias.
- No requieren del uso masivo de agroquímicos (fertilizantes, pesticidas, agua, terrenos, entre otros)
- Pueden utilizar la biomasa procedente de la basura de desechos industriales o de consumo humano.
- Incentivan el desarrollo tecnológico con efectos de diversificación en el sector agroindustrial.
- Son altamente eficientes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente de CO y CO₂ del corto al mediano plazo.
- A largo plazo pueden abaratar los costos de producción respecto a los actuales biocarburantes.

- Algunas especies tienen mejores resultados en climas templados que en tropicales, por lo que pueden desarrollarse en Europa o EE. UU.

Actualmente existen muchos métodos de producción de biodiésel, entre los cuales se pueden mencionar: la producción por lotes, proceso supercrítico, reactor ultrasónico, método de microondas y enzimas lipasas.

7.2.2.1. Tecnologías para la producción de biodiésel

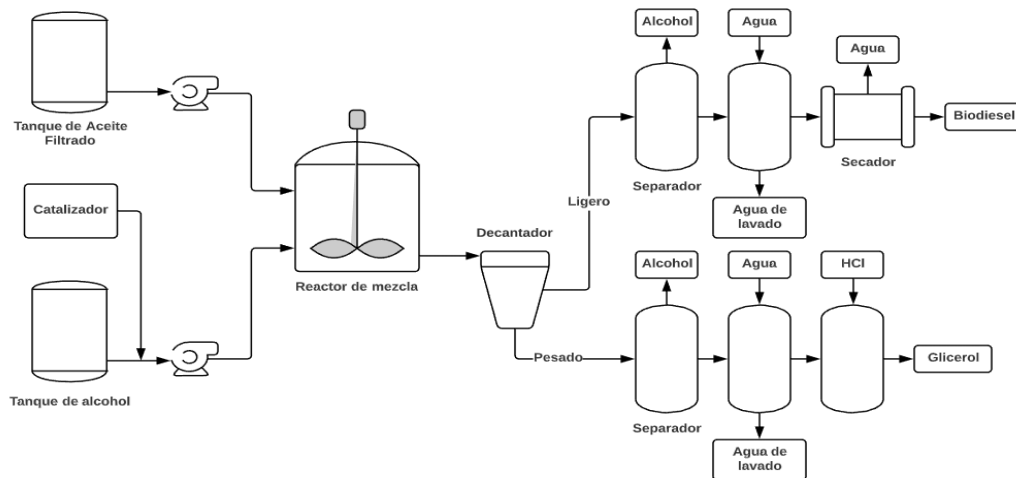
Generalmente los procesos a nivel industrial de producción de biodiésel se dividen en la transesterificación y esterificación que pueden llevarse a cabo de manera discontinua (*Batch*) o continua. El sistema discontinuo se emplea para capacidades de producción reducidas y con la cualidad de que se puede alimentar diferentes calidades de materia prima pues el proceso se puede adecuar de manera versátil a estas variaciones, por otro lado, el sistema continuo se aplica para capacidades de producción elevadas ya que el tiempo de reacción y separación son menores (Bulla, 2014).

El proceso discontinuo o *Batch* es el más simple pues se emplean un reactor grande con agitación integrada donde ocurren los tres pasos de la transesterificación comúnmente a temperaturas entre 25 °C y 85 °C, según el catalizador y proporciones de la materia prima. En cuanto al catalizador, normalmente se utiliza el hidróxido de sodio (NaOH) en un rango de concentración de 0,3 % a 1,5 %, aunque también se utiliza hidróxido de potasio (KOH) (López, 2011).

El tiempo de reacción en un proceso discontinuo tiene mucha variabilidad de acuerdo con las condiciones como temperatura, relación alcohol a aceite, concentración del catalizador y agitación, sin embargo, se han publicado estudios

con tiempos de reacción de 20 minutos a dos horas con rendimientos de 86 % a 94 %.

Figura 1. **Proceso de producción de biodiésel discontinuo**

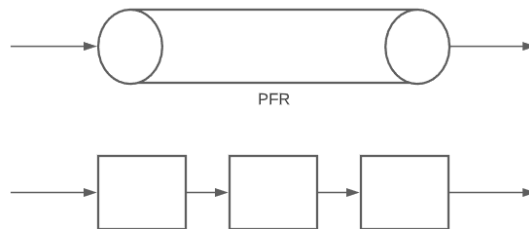


Fuente: Kemp. (2006). *Biodiesel: basics and beyond: a comprehensive guide to production and use for the home and farm.*

Para los procesos de producción de biodiésel continuos se recurre a los reactores llamados CSTR (*Continuous Stirred-Tank Reactor*). Cuentan con agitación suficiente para evitar la formación de un menisco y tienen la cualidad de que al ser de tipo continuo se puede modificar el flujo de materia prima para ajustar la velocidad de producción según la demanda y también modificar tiempo de reacción para aumentar rendimientos. Estos requieren de un suministro continuo de los insumos ya que el arranque de estos equipos requiere de un tiempo para estabilizar las condiciones del proceso y no es conveniente interrumpir el estado estacionario. La desventaja es que el reactor favorece la uniformidad de la composición y por lo tanto los subproductos como el glicerol están más concentrados en la fase éster, provocando un aumento en los tiempos de separación (López, 2011).

También existen los reactores PFR (*Plug Flow Reactor*) que es de tipo tubular y se le llama así porque la mezcla de componentes se efectúa de manera radial principalmente y poca mezcla axial (dirección del flujo) y por esta condición se dice que se comporta como varios reactores CSTR configurados en serie.

Figura 2. **Representación de un reactor PFR y su relación con los reactores CSTR**



Fuente: elaboración propia.

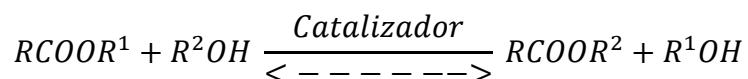
El resultado de emplear reactores de tipo PFR es un tiempo de residencia reducido aproximadamente de 6 a 10 minutos. Incluso el rendimiento se puede manipular hasta cierto grado a través de la temperatura y presión dentro del reactor. Incluso se puede configurar un sistema con reactores PFR en paralelo para aumentar la producción (López, 2011).

7.2.3. Transesterificación

La transesterificación, también llamada metanólisis o etanólisis dependiendo del alcohol seleccionado, consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido reacciona con el alcohol, comúnmente metanol,

transformándose en diglicérido, monoglicérido y además formando glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen las reacciones y en posteriores fases de separación, purificación y estabilización. Si se utiliza un catalizador se acelera la velocidad de la reacción, comúnmente se aplica catálisis básica (NaOH o KOH). En la figura 1 se ilustra la reacción química de la reacción de transesterificación (López, 2011).

Figura 3. **Ecuación química de la reacción de transesterificación**



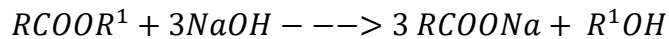
Fuente: elaboración propia.

Donde:

- RCOOR¹: triglicérido
- R²OH: alcohol
- RCOOR²: alquil éster
- R¹OH: glicerol

Si se utiliza un catalizador básico se deben cumplir que los triglicéridos tengan un bajo porcentaje de ácidos grasos libres, además de baja humedad, para evitar que se neutralicen con el catalizador y de lugar a la saponificación. La presencia de agua influye en que esta disuelve la base en sus iones siendo responsable de que los iones OH⁻ y Na⁺ reaccionen con los triglicéridos del material lípido irreversiblemente, por lo que se consumen recursos para la reacción deseada. Si este fuera el caso, el triglicérido reacciona con el catalizador álcali formando jabón y glicerol (Bulla, 2014).

Figura 4. **Ecuación química de la reacción de saponificación**



Fuente: elaboración propia.

Donde:

- $RCOOR^1$: triglicérido
- NaOH: hidróxido de sodio
- RCOONa: jabón
- R^1OH : glicerol

Por esta razón es importante que los alcoholes y los aceites sean anhidros para la reacción, es decir, libres de humedad.

7.2.3.1. Variables que afectan el proceso de transesterificación

La calidad y rendimiento de la producción de biodiésel se ven afectados por la calidad de los reactivos, la calidad del aceite, es decir, el contenido de ácidos grasos libres y humedad presente, tipo y concentración del catalizador, tiempo de la reacción, temperatura y agitación durante la reacción, también la relación aceite-alcohol. Esto permite definir las condiciones adecuadas de operación del proceso que impactarán en el aumento de la eficiencia y las características fisicoquímicas del biodiésel fabricado (Bulla, 2014).

Tabla VII. **Parámetros que influyen en el proceso de producción de biodiésel por transesterificación**

Parámetro	Descripción	Aceptabilidad
Calidad del aceite	La cantidad de ácidos grasos libres y de humedad son clave ya que promueven la formación indeseada de jabones en presencia del catalizador alcalino.	Concentración de ácidos grasos libres menor a 3 % p/p.
Concentración y tipo de catalizador	Los catalizadores alcalinos promueven la velocidad de reacción a menor temperatura, pero, da lugar a la reacción indeseada de saponificación.	Concentraciones de 0,4 % v/v a 2 % v/v de aceite.
	Los catalizadores ácidos también tienen resultados satisfactorios en especial con aceites de baja calidad.	Concentraciones mayores a 3 % p/p.
Temperatura y tiempo de reacción	La velocidad de reacción está altamente relacionada con la temperatura, si se aumenta la temperatura también lo hace la velocidad de reacción. A medida que pasa el tiempo la velocidad de reacción disminuye ya que los reactivos se están consumiendo y la reacción se dirige hacia el equilibrio entre reactivos y productos.	La temperatura debe ser cercana a la de evaporación del alcohol. Depende de la presión en el reactor. Se han reportado tiempos de reacción desde 5 minutos hasta 20 horas. Se prefiere la máxima conversión por lo que se recomienda un tiempo de contacto prolongado.

Continuación tabla VII.

Agitación	El aceite es inmiscible con el alcohol por lo que la agitación aumenta el contacto entre las partículas de alcohol que se dispersan entre el aceite aumentando así la velocidad de reacción.	Se han reportado agitaciones entre 150 RPM y 1200 RPM. Dependería de la geometría del reactor y de la configuración del/los agitadores.
-----------	--	---

Fuente: Bulla. (2014). *Diseño del proceso de producción del biodiésel a partir de aceites de fritura*. Consultado el 14 de octubre de 2020. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51747>.

7.3. Operaciones unitarias

La ingeniería química trata de procesos industriales en los que las materias primas se transforman o separan en productos útiles. El ingeniero químico tiene que desarrollar, diseñar y se encarga de la ingeniería del proceso completo, así como del equipo que se utiliza; selecciona las materias primas adecuadas; hace operar las plantas con eficiencia, seguridad y economía; y supervisa que los productos cumplan los requerimientos exigidos por los consumidores.

Un método conveniente para organizar el sistema en estudio es fragmentar los procesos individuales en una serie de etapas, llamadas operaciones, que se repiten en el transcurso de los diferentes procesos y también se basa en el hecho de que las técnicas y principios científicos son los mismos para diferentes procesos. De esta manera una operación unitaria tiene un nombre definido como secado, molienda, destilación, evaporación, entre otras.

Si la operación a realizar es estrictamente una reacción química entonces se estudia mediante la cinética de la reacción y conjuntamente se aplican operaciones unitarias que permiten el control de esa etapa química. Como ejemplo, se utilizan operaciones unitarias para preparar los reactantes, separar o purificar productos, recircular reactantes no consumidos y para el control de la transferencia de energía desde o hacia el reactor químico (McCabe, Smith y Harriott, 1998).

7.3.1. Filtración

La filtración es una operación unitaria en donde se separan los sólidos y fluidos de una mezcla a través de un medio poroso por el cual pasa la mayor parte del fluido y retiene la mayor parte de las partículas sólidas. También existe la filtración de gases, pero en el tema de estudio de los biocombustibles a partir de materias residuales es de vital importancia la filtración exclusiva de sólidos contenidos en líquidos. En el sistema de filtración la barrera que impide el paso de sólidos se le llama medio filtrante y puede ser una pantalla, tela, papel o un lecho de sólidos. El líquido que atraviesa dicho medio es el filtrado. Si los sólidos se acumulan en el medio filtrante incrementando su espesor a medida que pasa el tiempo se le llama filtración de torta y si los sólidos quedan retenidos dentro de los poros o cuerpo del medio filtrante al proceso se le llama filtración de profundidad o filtración clarificadora (Perry, Green y Maloney, 2001).

Tabla VIII. **Características de materiales de filtros**

Nombre	Resistencia					Peso específico	T máxima (°C)
	Desgaste	Ácidos	Álcalis	Oxidantes	Disolventes		
Acetato de celulosa	B	R	P	B	B	1.33	99

Continuación tabla VIII.

Acrílico: polímero sintético de cadena larga.	B	B	R	B	E	1.18	149
Vidrio: fibras de vidrio.	P	E	P	E	E	2.54	316
Modacrílico: 35 % es acrilonitrilo y menos de 85 % es polímero.	B	B	B	B	B	1.30	82
Nylon: poliamida sintética.	E	R-P	B	R-P	B	1.14	107
Poliéster: al menos 85 % es éster de alcohol dihidrico y ácido tereftáltico.	E-B	B	B-R	B	B	1.38	149
Polietileno: al menos 85 % es etileno	B	B	B	R	B	0.92	74
Polipropileno: al menos 85 % es propileno	B	E	E	B	B	0.90	122
Sarán: al menos 80 % es cloruro de vinidileno	B	B	B	R	B	1.70	72
Algodón: fibras naturales	B	P	R	B	E-B	1.55	99

Los símbolos significan: E: excelente, B: bueno, R: regular y P: pobre.

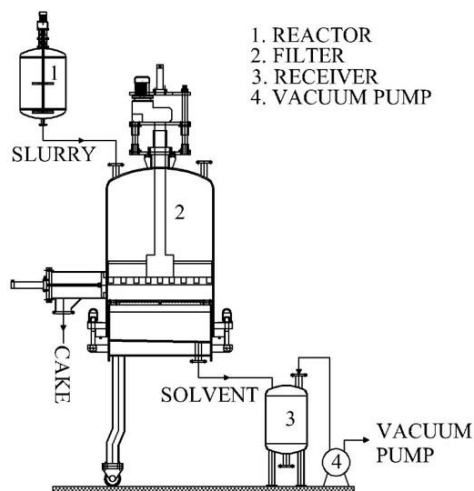
Fuente: Perry, et al. (2001). *Manual del ingeniero químico*.

7.3.1.1. Filtros de torta

En este tipo de filtros se acumulan los sólidos de forma visible sobre la superficie del medio filtrante y se usa un medio filtrante relativamente abierto ya que al formarse la torta se vuelve un medio más eficaz. Al iniciar la operación puede tenerse un filtrado inaceptable, pero se puede corregir con recirculación de filtrado o con un filtro de pulido aguas abajo. La capacidad del filtro para descargar la torta es un criterio para la selección de equipo. Estos filtros pueden ser intermitentes o continuos (Perry, et al., 2001).

El filtro de Nutsche es uno de los más simples y consiste en un tanque con fondo falso, perforado o poroso en donde se coloca el medio filtrante y la filtración ocurre por gravedad, presión o vacío. Lo común es que opere a vacío.

Figura 5. Filtro tipo Nutsche



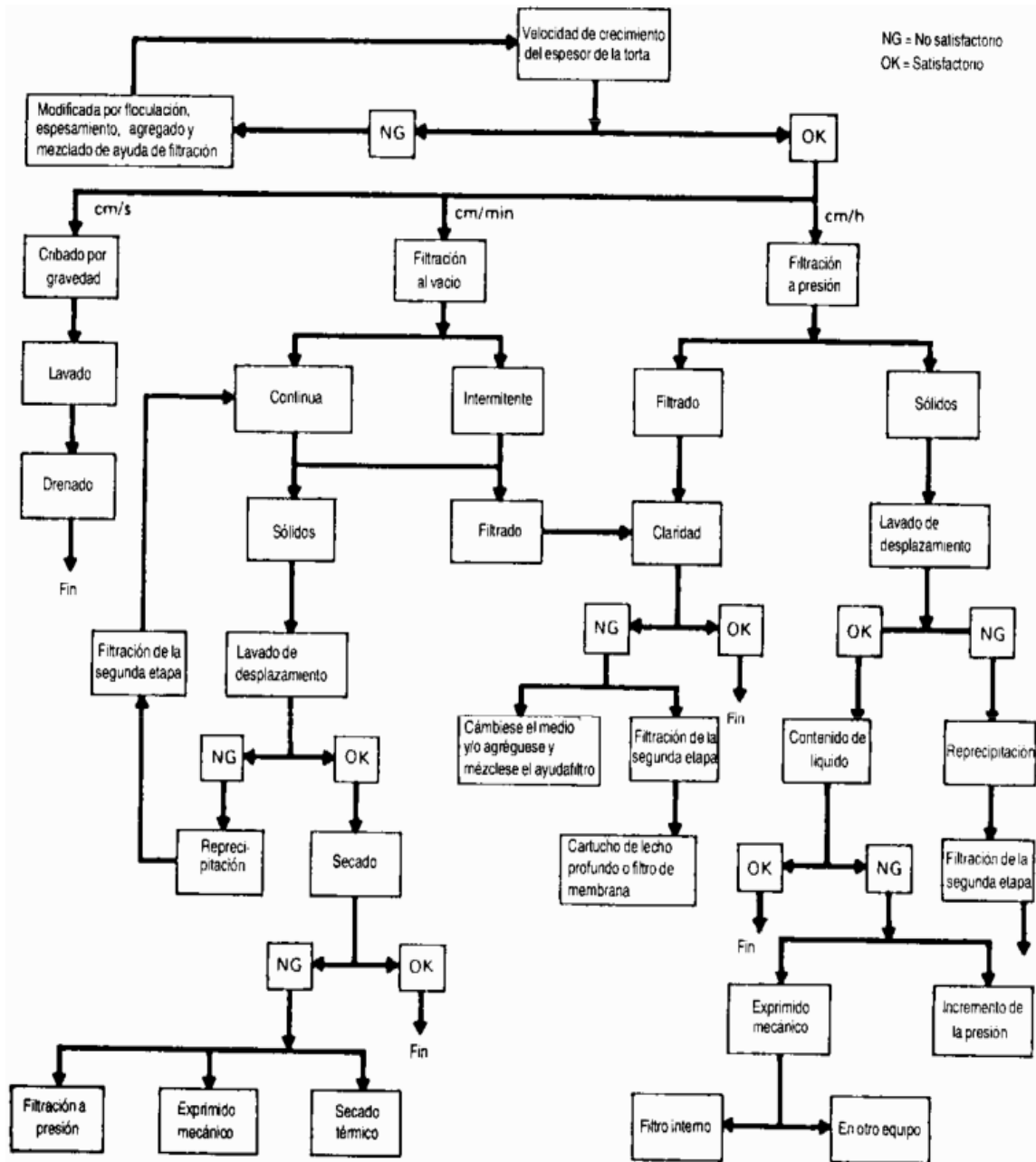
Fuente: India Drytech. (s.f.). *Industrial reaction, filtration and drying equipments*. Consultado el 15 de octubre de 2020. Recuperado de <http://indiadrytech.com/wp-content/uploads/2021/02/India-Dry-Tech.pdf>.

Estos filtros tienen área de filtrado desde 0.68 m² hasta 6.5 m² y contienen aspas que giran alrededor de un eje vertical con el propósito de mantener un nivel de torta que se descarga del equipo. En la figura 5 se aprecia la descarga de la torta o “*Cake*” y una bomba de vacío “*Vacuum pump*” que se encarga de crear la succión necesaria con lo que se economiza la operación de filtrado.

Otro tipo de filtros intermitentes son los filtros de placas horizontales que trabajan a presión con varias placas horizontales con drenado circular y guías, apiladas dentro de una cubierta cilíndrica. Comúnmente la presión se limita a 50 psi manométricas (Perry, et al., 2001).

Comercialmente existe una gran cantidad de filtros según las necesidades del producto a fabricar, sin embargo, la selección del equipo adecuado no aplica una técnica absoluta porque hay demasiados factores de los cuales la mayoría son difícilmente cuantificables. Para facilitar el trabajo de selección la figura 6 plantea un árbol de decisión mostrando los pasos a seguir en la solución de problemas de filtración y se basa en que el parámetro más importante es la velocidad de formación de la torta.

Figura 6. Modelo de decisión para resolver problemas de filtración



Fuente: Perry, et al. (2001). *Manual del ingeniero químico*.

7.3.2. Destilación

La destilación es una operación unitaria que puede llevarse a cabo de dos métodos distintos. En el primero se produce vapor a partir de la ebullición de una mezcla líquida cuyos componentes se desean separar seguido de la condensación de los vapores con la condición de que ese líquido no retorne a la columna de destilación. Es importante mencionar que para que haya separación solo una parte de la mezcla líquida debe evaporarse de modo que los componentes más volátiles se evaporan en mayor medida que los pesados. En el segundo método si existe reflujo (rectificación) de una parte del condensado hacia la columna con lo que se obtiene que ese líquido entra en contacto íntimo con los vapores que suben a través de la columna (McCabe, et al., 1998).

El estudio de la destilación en la producción de biodiésel requiere especial atención pues para la reacción de transesterificación se utiliza un alcohol como metanol o etanol cuyos puntos de ebullición son mucho más bajos que los demás componentes, pero el metanol y etanol son miscibles tanto con agua como con ésteres por lo que la purificación del biodiésel puede requerir de un proceso de separación como la destilación.

El diseño de una columna de destilación se puede dividir en los siguientes pasos:

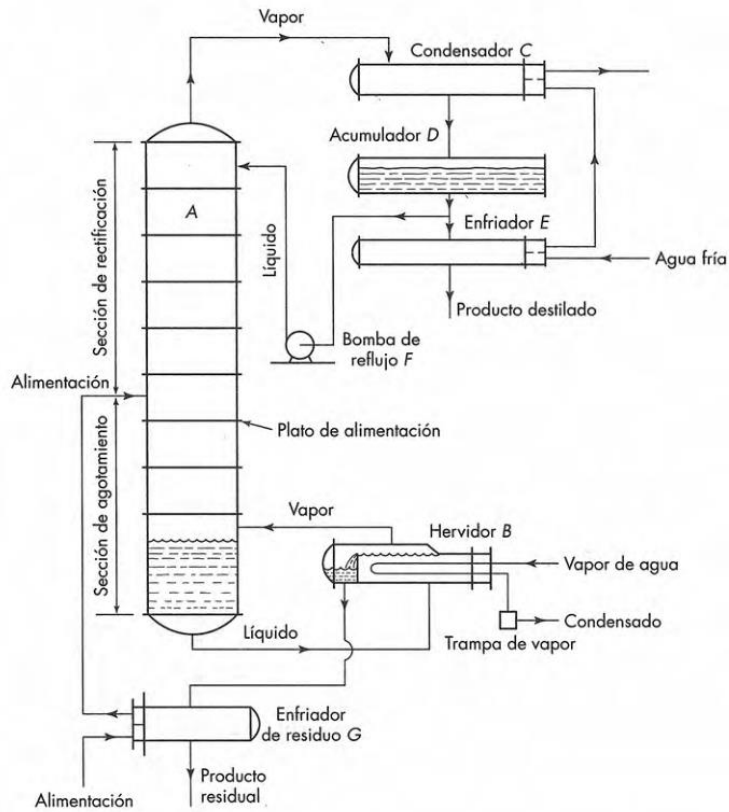
- Especificar el grado de separación requerido.
- Seleccionar condiciones de operación: continuo o por lotes; presión.
- Seleccionar el tipo de contacto: platos o relleno.

- Determinar los requerimientos de etapas y reflujo: número de etapas.
- Dimensionar la columna: diámetro, altura.
- Diseñar el interior de la columna: platos, distribuidores de flujo, soportes.
- Diseño mecánico: carcasa e instalaciones internas.

El paso más importante en muchos casos es el de determinar el número de etapas reales para la separación pues con ese dato ya se pueden encontrar torres comercialmente para el propósito requerido. Además, cuando la mezcla del líquido está compuesta por múltiples componentes es complicado determinar el número de etapas y se requiere el uso de programas para hacer los cálculos, a diferencia de cuando el sistema es binario (dos sustancias).

En el diseño de la columna de destilación es de suma importancia el buen contacto líquido vapor para que la transferencia de calor y masa sea de manera óptima. El plato de circulación cruzada es lo más común en donde el líquido fluye a lo largo del plato y desciende por canales verticales llamados bajantes mientras que el vapor asciende a través de perforaciones u otro tipo de método en el plato (Sinnott y Towler, 2005).

Figura 7. **Columna de fraccionamiento continuo con secciones de rectificación y agotamiento**



Fuente: McCabe, et al. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química*.

Los platos de circulación cruzada existen en cuatro tipos principales según la forma en que se hace entrar en contacto el vapor y el líquido.

- Platos perforados: el vapor asciende a través de perforaciones y el líquido es retenido por el flujo del vapor. Se debe diseñar la torre con un flujo mínimo de vapor que evite la caída del líquido por las perforaciones (lloriqueo) situación muy desfavorable para la eficacia del equipo.

- Platos de campana de borboteo: el vapor asciende por tuberías pequeñas, llamadas bandas, cubiertas por una campana con borde dentado o ranuras. Ya no se usa típicamente por los problemas que trae de incrustaciones y taponamiento.
- Platos de válvula flotante: las perforaciones son de mayor diámetro cubiertos con tapaderas móviles que se elevan o descenden según el flujo de vapor.

Figura 8. **Plato de circulación cruzada típico**

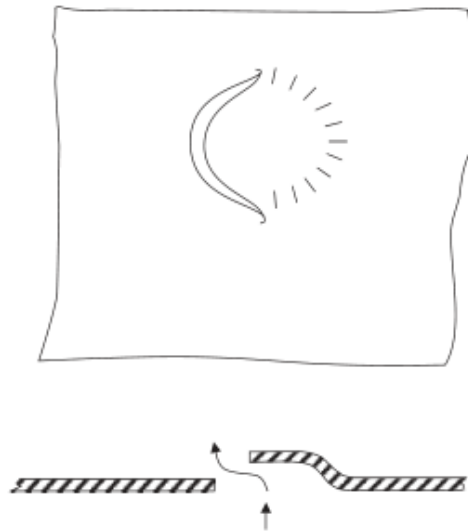


Fuente: Sinnott y Towler. (2019). *Diseño en Ingeniería Química*.

- Platos de válvula fija: es muy similar al plato perforado con la excepción de que los agujeros están parcialmente abiertos, con el propósito de que

permanezcan parcialmente cubiertos. Son casi igual de baratos que los platos perforados con eficiencia mejorada.

Figura 9. **Válvula fija**



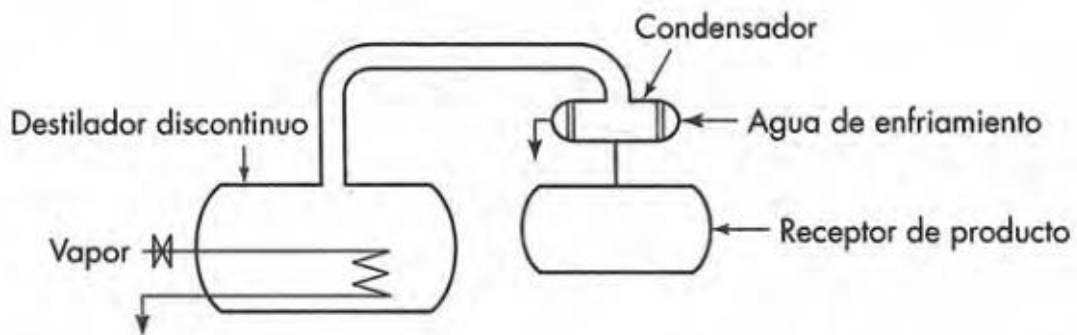
Fuente: Sinnott y Towler. (2005). *Chemical Engineering Design*.

7.3.2.1. **Destilación discontinua**

En plantas pequeñas es común que se aplique la destilación discontinua para recuperar líquidos volátiles. A la mezcla se le suministra calor por medio de un serpentín o desde afuera a través de las paredes del recipiente hasta que el líquido ebulle y entonces se vaporiza solo una parte de la carga. De manera simple los vapores luego se condensan obteniendo el producto con el líquido volátil más concentrado. El vapor y el líquido están en equilibrio dentro del destilador, pero como uno de los componentes es más volátil entonces el vapor

es más rico en esa sustancia y por eso la composición no es constante (McCabe, et al., 1998).

Figura 10. **Destilación simple en un destilador discontinuo**



Fuente: McCabe, et al. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química*.

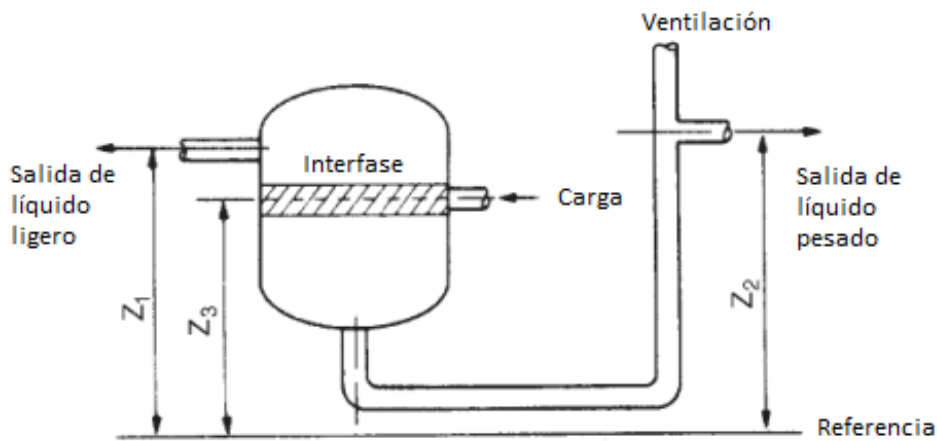
Cuando la volatilidad relativa entre los componentes no es muy alta un destilador discontinuo simple no conduce a una separación aceptable entonces se emplea una columna de rectificación con reflujo. Una forma alterna de operar un sistema así es dejar que trabaje con una razón de reflujo constante durante un tiempo hasta obtener la pureza deseada y detener la destilación.

7.3.3. Decantación

La separación de líquidos también puede hacerse cuando son inmiscibles o parcialmente inmiscibles entre sí, por ejemplo, cuando se desea eliminar agua residual de corrientes de proceso. La decantación es la forma más simple de separación por gravedad al utilizar un tanque de sedimentación en donde existe una diferencia significativa entre las densidades de líquidos y se da tiempo suficiente para que las gotas se asienten en el fondo (los más densos).

Decantadores los hay para trabajar en forma continua pero el principio es igual si se diseña para trabajar por lotes. Típicamente la forma del tanque es cilíndrica y es también la más barata (Sinnott y Towler, 2019).

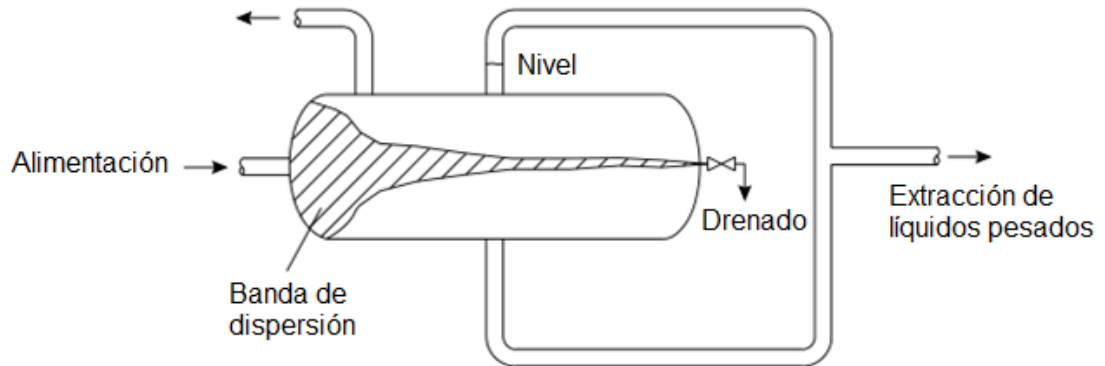
Figura 11. **Decantador vertical**



Fuente: Sinnott y Towler (2005). *Chemical Engineering Design*.

En el diseño del decantador se debe considerar el tiempo de retención que típicamente se encuentra entre 5 y 10 minutos. Se dimensiona con base en que la velocidad de la fase continua debe ser menor que la velocidad de asentamiento de las gotas de la fase dispersa.

Figura 12. **Decantador horizontal**



Fuente: Sinnott y Towler. (2005), *Chemical Engineering Design*.

7.4. Reactores

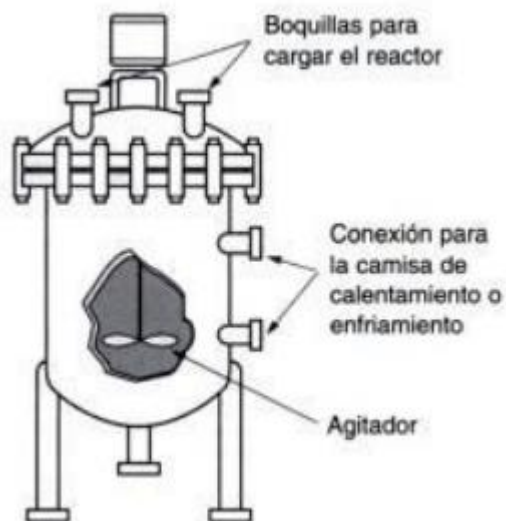
Un reactor es un equipo que está destinado a fijar las condiciones necesarias para que los reactivos formen productos de mayor valor optimizando los factores económicos. En las reacciones químicas no siempre se puede pensar en que solamente ocurre exclusivamente la reacción deseada, sino que en la realidad el buen diseño de un reactor es la clave para asegurar que las reacciones indeseadas no ocurran en gran medida y que sea favorecida la reacción deseada estableciendo los parámetros de operación del reactor. Estos parámetros pueden ser temperatura, velocidad de agitación, velocidad de las reacciones, tiempo de retención mecánica, presión, catalizadores, tamaño del reactor, entre otros.

7.4.1. Reactor por lotes

Un reactor por lotes no tiene flujos de entrada de reactivos ni flujo de salida de productos durante la reacción. Generalmente son reactores de volumen

definido con controles de temperatura, presión y un sistema de agitación mecánico como rotores de aspas o flujo inducido. En el diseño se debe promover la agitación de la mezcla para que la velocidad de reacción sea uniforme en todas partes del reactor y que no se forme espacios en donde los reactivos se aíslan unos de otros impidiendo la reacción (Fogler, 2001).

Figura 13. **Reactor homogéneo por lotes simple**



Fuente: Fogler. (2001). *Elementos de ingeniería en las reacciones químicas*.

Cuando existen reacciones múltiples se emplean los principios de la cinética de reacciones para manejar el parámetro de selectividad que básicamente es calcular las concentraciones óptimas de reactivos y condiciones del reactor para favorecer la reacción deseable y de esa manera lograr que el producto de interés sea producido en su mayoría.

7.4.2. Reactores de flujo continuo

Los reactores de flujo continuo son aquellos que trabajan de forma continua, es decir, en estado estacionario. Tienen características que los hacen muy útiles en un gran número de escenarios de procesamiento.

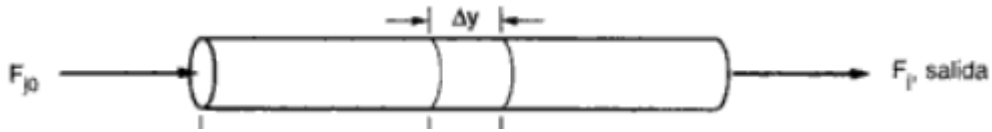
7.4.2.1. Reactor continuo de tanque agitado

Es un reactor muy común en procesos industriales que básicamente es un tanque con agitación en donde el flujo de reactivos y productos se mantiene continuamente, se conoce como CSTR (*Continuos-stirred tank reactor*). Es vital en este tipo de reactor que la agitación esté bien optimizada para que su operación sea aceptable (Fogler, 2001).

7.4.2.2. Reactor tubular

Es un reactor cilíndrico que opera normalmente en estado estacionario (flujo continuo) en donde se diseña para que el flujo sea altamente turbulento asegurando el mezclado de los reactivos. Para hacer el dimensionamiento de este tipo de reactor se asume que la mezcla solo ocurre de manera radial y no axial de manera que los reactivos se consumen mientras avanzan a lo largo del reactor, es decir, el flujo es de tipo taponado. Se le llama PFR (*Plug-flow reactor*). En estos reactores el grado de reacción que alcanzan solo depende de su volumen total (Fogler, 2001).

Figura 14. Reactor PFR



Fuente: Fogler. (2001). *Elementos de ingeniería en las reacciones químicas*.

7.4.2.3. Reactor de lecho empacado

También se les llama reactor catalítico de lecho empacado o por sus siglas en inglés PBR (*Packed-bed reactor*) y su diseño es análogo al reactor PFR con la diferencia de que se dimensiona de acuerdo con la masa de catalizador que se necesita para lograr el grado de reacción.

En la siguiente figura se resumen los reactores comúnmente utilizados en procesos industriales.

Figura 15. Reactores usados comúnmente

Reactor	Balace de moles	Comentario
Por lotes	$\frac{dN_j}{dt} = r_j V$	Sin variación espacial
CSTR	$v = \frac{F_p - F_j}{-r_j}$	Sin variación espacial, estado estacionario
PFR	$\frac{dF_j}{dV} = r_j$	Estado estacionario
PBR	$\frac{dF_j}{dW} = r_j'$	Estado estacionario

Fuente: Fogler. (2001). *Elementos de ingeniería en las reacciones químicas*.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Combustibles

1.1.1. Combustibles fósiles

1.1.1.1. Diésel

1.1.2. Biocombustibles

1.1.2.1. Bioalcoholes

1.1.2.2. Bioaceites

1.2. Biodiésel

1.2.1. Propiedades del biodiésel

1.2.1.1. Dependencia de las propiedades del biodiésel con la estructura de los alquil ésteres de ácidos grasos

1.2.1.2. Calor de combustión

1.2.1.3. Flujo en frío

1.2.1.4. Estabilidad oxidativa

- 1.2.1.5. Viscosidad
 - 1.2.1.6. Lubricidad
 - 1.2.2. Métodos de producción de biodiésel
 - 1.2.2.1. Tecnologías para la producción de biodiésel
 - 1.2.3. Transesterificación
 - 1.2.3.1. Variables que afectan el proceso de transesterificación
 - 1.3. Operaciones unitarias
 - 1.3.1. Filtración
 - 1.3.1.1. Dependencia de las propiedades del biodiésel con la estructura de los alquil ésteres de ácidos grasos
 - 1.3.2. Destilación
 - 1.3.2.1. Destilación continua
 - 1.3.3. Decantación
 - 1.4. Reactores
 - 1.4.1. Reactores por lotes
 - 1.4.2. Reactores de flujo continuo
 - 1.4.2.1. Reactor continuo de tanque agitado
 - 1.4.2.2. Reactor tubular
 - 1.4.2.3. Reactor de lecho empacado
- 2. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE RESIDUAL DE FRITURAS
- 3. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO PARA PRODUCIR BIODIÉSEL
- 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS
APÉNDICE

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. Se planteará una propuesta del diseño para la fabricación de biodiésel a partir de aceites residuales de frituras de pollo, a través de un ensayo a pequeña escala y la determinación de las propiedades de la materia prima y del producto final, así como de la especificación de equipos y variables involucradas en el proceso.

9.2. Definición de variables

A continuación, se describen las variables involucradas en el estudio.

Tabla IX. **Variables involucradas en el estudio**

Variable	Definición conceptual	Definición operacional
Rendimiento	La relación entre lo que se obtuvo de producto respecto a lo que se introdujo al proceso.	Se medirá como rendimiento másico. Kg de biodiésel por kg de aceite residual de frituras. %.
Relación aceite a metanol	Es la relación entre el aceite y el metanol para el proceso de producción de biodiésel.	La relación será volumétrica de manera que una relación 6:1 indica que por cada 6 litros de aceite se usará 1 litro de metanol. volumen:volumen.
Tiempo de reacción	Es el tiempo de retención dentro del reactor para que se desarrolle la reacción.	La producción de biodiésel se hará por lotes y el tiempo de reacción se medirá en minutos. Min.
Calor de combustión	Se entiende por la cantidad de energía desprendida por unidad de masa de combustible en donde altos poderes caloríficos, indican buenos combustibles.	Indica la capacidad energética del biodiésel y se determinará a través de análisis en laboratorio. (kJ/kg).

Continuación tabla IX.

Contenido de ésteres	Es el contenido de ésteres de ácidos grasos en el biocombustible.	El biodiésel debe contener más de 96,6 % de ésteres según la EN14214. A determinar por laboratorio. % (m/m).
Densidad	Cantidad de masa por unidad de volumen.	Según estándares europeos EN14214 debe ser de entre 860 a 900. Se medirá por métodos volumétricos y de pesaje. (kg/m ³).
Punto de inflamación	Es la temperatura a la cual el combustible se inflama.	Para biodiésel el punto de inflamación debe ser mayor a 130 °C según la ASTM D 6751. (°C).
Índice de cetanos	El índice de cetanos de un diésel se relaciona con el retraso de ignición, es decir, el tiempo entre la inyección del combustible al cilindro y el punto de ignición. Un índice de cetanos alto indica poco retraso de ignición (Knothe, 2005).	A determinar por laboratorio. Debe ser mayor a 47 según ASTM D 6751. (Adimensional).
Contenido de azufre	Es la composición de azufre en el biocombustible.	El contenido de azufre es un parámetro de calidad del biodiésel y según normas ASTM D6751 debe ser menor a 0,0015 %. % (m/m).
Contenido de humedad	Es la composición del agua en el biocombustible.	El contenido de agua debe ser muy bajo pues forma una fase inmiscible que perjudica la calidad del biodiésel y debe ser menor a 0,05 %. % (m/m).

Fuente: elaboración propia.

9.3. Fases del estudio

A continuación, se hace una descripción de las fases que se seguirán para poder llevar a cabo la investigación.

9.3.1. Fase 1: exploración bibliográfica

Se realizará una investigación rigurosa las especificaciones de proceso para la obtención de biodiésel teniendo en cuenta que el aceite residual de frituras como materia prima tiene otras propiedades que también serán descritas de acuerdo con la teoría para respaldar el tipo de transesterificación que se aplicará. Se detallará el método de elaboración de biodiésel y sus propiedades como combustible. Además, se investigará la metodología para poder estimar las reducciones en emisiones de dióxido de carbono por la adición del biodiésel obtenido a equipo de calentamiento o transporte según sus características de calidad finales. Esta información será la base para el diseño de una planta piloto para la fabricación de biodiésel con aceite residual de frituras.

9.3.2. Fase 2: recolección de materia prima

La recolección del aceite residual de frituras de pollo se realizará directamente en los restaurantes de pollo frito utilizando recipientes adecuados para manejar aceites. Se cuenta con transporte apto ya que se recolectará una cantidad de aproximadamente 150 litros de aceite.

9.3.3. Fase 3: producción de biodiésel a escala planta piloto

La fase experimental de la investigación se llevará a cabo en las siguientes instalaciones:

- Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), Sección de Química Industrial, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Laboratorios Técnicos en la Sección de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala.
- Laboratorio de Instrumentación Química Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala.

La producción de biodiésel se dividirá en dos transesterificaciones para poder alcanzar un mayor rendimiento. La primera se hará con 75 % del total de metóxido de sodio y se removerá la glicerina formada para luego hacer la segunda transesterificación con el 25 % de metóxido de sodio restante.

A continuación, se presenta la metodología que indica los pasos a seguir en la fabricación de biodiésel a partir de aceites residuales de frituras de pollo, la cual será desarrollada la planta piloto del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE).

Para la realización de la fase experimental del estudio se enlistan los materiales que se utilizarán a escala planta piloto:

Tabla X. **Equipo que se utilizará en la planta piloto del LIEXVE**

Descripción	Especificaciones
Marmita de agitación	Acero inoxidable con capacidad de 40 litros, marca LAUQIPAR
Caldera pirotubular	10 HP
Balanza analítica	Marca Adventur, Serie G123120204013
Planchas de calentamiento	Marca VWR Hotplace/stirrer F10A de 250 v
Cubetas de plástico	Capacidad de 10 y 20 litros.
Recipientes de HDPE	Capacidad de 50 litros
Soportes universales	De hierro
Potenciómetro	Digital 0 a 14,00 pH

Continuación tabla X.

Bomba para recirculación	Marca CRYSTAL POND DP80A, 120v, 60 Hz
Mascarilla para gases	Marca Truper
Guantes	De látex y térmicos
Bata de laboratorio	De algodón
Papel filtro	Pliegos
Espátula	De metal o de madera
Agitadores	Magnéticos

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Reactivos y materia prima**

Descripción	Especificaciones
Aceite residual	Obtenido como residuo en la industria de frituras de pollo
Metanol	Grado reactivo con 99.93 % de pureza
Hidróxido de sodio	Grado reactivo (ACS)
Agua desmineralizada	Se cuenta con varios proveedores

Fuente: elaboración propia.

9.3.3.1. Preparación de metóxido de sodio

- Llenar un recipiente con metanol de modo que por cada litro de aceite a procesar se tenga 0.166 L de metanol. (Relación 6:1).
- Pesar el hidróxido de sodio de modo que se tengan 45 g por cada litro de metanol o 7,5 g por litro de aceite.
- Agitar la mezcla durante al menos 20 minutos con cuidado y usando equipo de protección térmica pues la disolución es exotérmica.

9.3.3.2. Procedimiento de producción de biodiésel

- Medir la cantidad de aceite que será procesado.
- Filtrar el aceite por gravedad hacia el recipiente de pretratamientos.
- Calentar el aceite entre 80 °C y 90 °C durante 1 hora para deshidratar.
- Con la temperatura a 55 °C, trasvasar a un reactor.
- Agregar $\frac{3}{4}$ del metóxido de sodio al reactor manteniendo agitación constante y temperatura a 55 °C durante 1 hora con 30 minutos.
- Dejar reposar por 30 minutos para lograr la separación de las fases.
- Decantar la fase pesada, glicerina, en un recipiente adecuado.
- Agregar la cantidad restante de metóxido de sodio al reactor y dejar reaccionar 1 hora a 55 °C con agitación.
- Dejar reposar el contenido del reactor por 30 minutos y separar la fase pesada por gravedad a través de una llave de purga en el reactor.
- Trasvasar el biodiésel al tanque de lavado.
- Aplicar un flujo de agua en la superficie del biodiésel a través de un atomizador o nebulizador durante 1 hora para el lavado. (Se debe evitar un flujo de agua grande para minimizar la agitación en el biodiésel).

- Dejar reposar el biodiésel sin flujo de agua de lavado durante 15 minutos y extraer la fase acuosa por gravedad para eliminar jabón y otras impurezas.
- El proceso de lavado se repite hasta que el agua no se vea lechosa para lograr un producto altamente puro.
- Deshidratar el biodiésel a 85 °C durante 1 hora.
- Envasar el producto final en recipientes adecuados.
- Repetir el procedimiento modificando la relación aceite a metanol (6:1, 7:1 y 8:1) con la misma concentración de NaOH.

El rendimiento de la producción de biodiésel para cada lote con la relación aceite a metanol especificado se determinará con la siguiente ecuación:

$$\%E = \frac{\text{kg de biodiésel obtenido}}{\text{kg de aceite procesado}} * 100\% \quad \text{Ecuación 1}$$

9.3.4. Fase 4: caracterización del biodiésel obtenido

Al biodiésel obtenido se le harán análisis para determinar propiedades que indican la calidad de acuerdo con estándares internacionales. A continuación, se presentan los parámetros establecidos por los estándares americanos ASTM D6751 para biodiésel B100 y estándares europeos EN14214:

Tabla XII. **Estándar americano ASTM D6751 y estándar europeo EN14214 para biodiésel**

Propiedad	Unidades	Estándares de biodiésel	
		ASTM D6751	EN14214
Contenido de éster	% (m/m)	-	96,6 >
Densidad a 15 °C	Kg/m ³	-	800 - 900
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	1,9 - 6,0	3,5 - 5,0
Punto de inflamación	°C	130 <	120 <
Punto de nube	°C	Reporte	Reporte
Punto de fluidez	°C	-	-
Carbón residual (al 10 % del residuo de destilación)	% (m/m)	0,5 >	0,3 >
Índice de acidez	mg KOH/g	0,5 >	0,8 >
Índice de cetanos	-	47,0 <	51,0 <
Contenido de azufre	% (m/m)	0,0015 >	0,001 >
Contenido de cenizas sulfatadas	% (m/m)	0,20 >	0,20 >
Contenido de agua	mg/kg	0,05 >	0,05 >
Lámina de cobre a la corrosión (3h a 50 °C)	Clasificación	3 ^a	1 ^a
Valor de yodo	-	-	120,0 >
Éster metil de ácido linolénico	% (m/m)	-	12,0 >
Ésteres metílicos poliinsaturados (≥ 4 dobles enlaces)	% (m/m)	-	1,0 >
Contenido de metanol	% (m/m)	-	0,2 >
Contenido de monoglicéridos	% (m/m)	-	0,8 >
Contenido de diglicéridos	% (m/m)	-	0,2 >
Contenido de triglicéridos	% (m/m)	-	0,2 >
Glicerol libre	% (m/m)	0,02 >	0,02 >

Continuación tabla XII.

Glicerol total	% (m/m)	0,024 >	0,025 >
Contenido de fósforo	mg/kg	10,0 >	10,0 >
Temperatura de destilación Temperatura atmosférica equivalente (90 % recuperado)	°C	360,0 >	-

Fuentes: Knothe, (2010). *Calidad del combustible biodiésel y la norma ASTM*.

Los análisis del biodiésel se realizarán en los laboratorios técnicos del Ministerio de Energía y Minas del área de hidrocarburos. Con esta caracterización será posible la determinación de los usos que pueden darse al producto obtenido, así como para aplicarse como base para desarrollar criterios en el diseño de la planta piloto.

9.3.5. Fase 5: diseño de la planta piloto

- Selección de variables

El diseño de la planta piloto incluirá la selección de parámetros de la materia prima (aceites o grasas, catalizador y alcohol) y la definición de variables que afectan al proceso en calidad y rendimiento (calidad del aceite o grasa, relación aceite a metanol, concentración del catalizador, tiempo, temperatura y velocidad de agitación en el reactor).

- Equipo

El equipo de la planta piloto se diseñará con base en la capacidad de producción que se proyectará de acuerdo con la cantidad de aceite que

potencialmente puede ser suministrado por la cadena de restaurantes de frituras y otros aspectos socioeconómicos que se investigarán.

Se tomará en cuenta cualquier fenómeno que se pueda observar durante las pruebas experimentales a escala planta piloto de pequeña capacidad para poder determinar procesos adicionales necesarios a los que se realizarán.

- Control de calidad

El diseño del equipo para la planta de producción depende de la calidad que se obtenga de las pruebas en la planta del laboratorio de extractos vegetales (LIEXVE) y serán tomados como base para que la planta diseñada cumpla estos requisitos.

9.3.6. Fase 6: análisis económico

Para llevar a cabo el análisis económico de la planta piloto se partirá de la definición de los equipos y capacidad de producción de la planta con lo que se definirá la inversión inicial necesaria y los costos fijos de producción según un promedio de producción mensual, mantenimiento de equipo y otros aspectos económicos. Con los costos fijos y variables establecidos se procederá a realizar una comparación económica de los beneficios que se obtendrían de acuerdo con dos posibles alternativas para el biodiésel obtenido: 1) utilizarlo dentro de los procesos de la empresa o 2) comercializarlo.

Para llevar a cabo el análisis económico de las dos alternativas se utilizará el valor presente neto, tasa interna de retorno y el tiempo de recuperación de la inversión para cada caso con lo que se podrá decidir cuál es la mejor opción.

9.3.7. Fase 7: estimación de reducción en la contaminación

Para la estimación de la reducción en la contaminación se realizará el cálculo de las toneladas equivalentes de CO₂ que se producirían con las cantidades equivalentes de diésel derivado de petróleo que se estarían sustituyendo por biodiésel de acuerdo con factores de emisión. Para el diésel el factor es de 10,30 (kg CO₂ eq)/gal y el factor de emisión del biodiésel se estimará de acuerdo con los parámetros que se obtengan a partir del reporte de laboratorio.

9.3.8. Fase 8: presentación y discusión de resultados

Al finalizar las pruebas de combustión del biodiésel y desarrollar el diseño de una planta piloto para la producción del biocombustible con aceites residuales de frituras de pollo se presentará de forma detallada y concreta la viabilidad de poder implementar una planta con este propósito para la cadena de restaurantes de frituras de pollo, para la reducción de consumo de diésel derivado de petróleo o para su venta. Los resultados serán presentados en forma de gráficos, tablas e ilustraciones obtenidas durante el proceso del presente trabajo de investigación.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La caracterización del aceite residual de frituras de pollo será proporcionada por Laboratorios Técnicos en la Sección de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas de Guatemala con lo que se podrá iniciar la fase de pruebas a escala planta piloto.

Las pruebas a escala planta piloto proveerá datos de rendimiento de producción de biodiésel de acuerdo con la variación de la relación aceite a metanol.

De acuerdo con los resultados se procederá a diseñar la planta piloto que permitiría la optimización de la producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo.

Las herramientas que se utilizarán se detallan a continuación:

- Tablas de parámetros del aceite residual.
- Tabla de datos de masa obtenida de biodiésel por lote de producción y por cada variación de la relación aceite a metanol.
- Tabla de datos de consumo de combustible de caldera.
- Tabla de datos de rendimiento másico (kg de biodiésel por kg de aceite residual).

- Curva de comportamiento del rendimiento en función de la relación aceite a metanol.
- Tabla para el análisis de varianza.
- Tabla para el análisis de normalidad.
- Tabla para el análisis de independencia.
- Tabla para el análisis de homocedasticidad.
- Tabla para el análisis de homogeneidad.
- Tabla resumen del modelo obtenido para rendimiento en función de la relación aceite a metanol.
- Tabla de costos y capacidades con opciones para tanque de pretratamientos, reactor, tanque de lavado.
- Tabla de costos para equipos e instrumentos auxiliares.
- Tabla de costos de bombas, tuberías y accesorios.
- Tabla de costos de producción por lote de biodiésel. (Quetzales por kg de biodiésel).
- Tabla de costos de inversión para la planta piloto.

- Tabla con datos para estimación del tiempo de retorno de inversión y parámetros económicos.
- Tabla resumen de costos para el diseño propuesto de la planta piloto.

Los análisis estadísticos y manejo de datos se llevarán a cabo con el paquete de Office 365 (Excel y Word).

Como software auxiliar se utilizará DWSim para la simulación del proceso de producción de biodiésel.

11. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla XIII. Cronograma de actividades

Actividad	2021																									
	Enero		Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio							
Fase 1: exploración bibliográfica.	■	■																								
Fase 2: recolección de datos y materia prima.			■	■	■																					
Fase 3: producción de biodiésel a escala laboratorio.					■	■	■	■																		
Fase 4: caracterización del biodiésel obtenido.								■	■	■																
Fase 5: diseño de la planta piloto.									■	■	■	■														
Fase 6: análisis económico.													■	■	■	■										
Fase 7: análisis ambiental.																		■	■							
Fase 8: discusión y presentación de resultados.																								■	■	■

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

- Recursos humanos
 - Investigador: Pablo Alejandro Sazo Magaña
 - Asesora: Inga. Adela Marroquín
- Recursos materiales

Los materiales, recursos, equipos y reactivos a utilizar para el desarrollo de cada una de las fases del estudio se detallan a continuación.

Tabla XIV. **Materiales y equipo para utilizar**

Descripción	Especificaciones
Beaker	100, 250 y 500 mL
Pipeta volumétrica	1, 2, 5 y 10 mL
Varilla de agitación	
Erlenmeyer	250 y 1000 mL
Balón aforado	250 y 1000 mL
Probetas	10, 50, 250 y 1000 mL
Vidrio de reloj	
Ampolla de decantación	500 y 1000 mL
Bureta	25 y 50 mL
Reactor de tres bocas	1000 mL
Recipiente de polietileno de alta densidad con tapa	4 de 50 Litros
Balanza analítica	Con precisión de 0.05 g
Cubeta	2 de 20 Litros
Filtro	De tela o de uso en café
Embudo	Diferentes diámetros

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Equipo de seguridad**

Descripción	Especificaciones
Mascarilla	Con filtro para gases
Guantes	De nitrilo y térmicos
Bata de laboratorio	De algodón
Botas industriales	Impermeables con suela antideslizante

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Reactivos y materia prima**

Descripción	Especificaciones
Aceite residual	Obtenido como residuo de restaurantes de frituras de pollo
Metanol	Grado reactivo con 99,93 % pureza
Hidróxido de sodio	Grado reactivo
Agua desmineralizada	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resumen de costos**

Descripción	Costo (Q)
Materiales y equipo	200.00
Equipo de seguridad	0.00
Reactivos y materia prima	200.00
Análisis de biodiésel	650.00
Transporte	500.00
Asesor de tesis	2500.00
Total	4,050.00

Fuente: elaboración propia.

Los recursos y costos detallados son los necesarios para llevar a cabo el proyecto por lo que se asegura que es factible su realización.

13. REFERENCIAS

1. Amézquita, D. (2005). *Potencial que tiene Guatemala para producir Biodiésel* (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0933_Q.pdf.0
2. Anaya, A., y Pedroza, H. (2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), 31-39.
3. Benjumea, P., Agudelo, J., y Cano, G. (2004). Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiésel. *Scientia et Technica*, 1(24).
4. Bulla, E. (2014). *Diseño del proceso de producción del biodiésel a partir de aceites de fritura* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51747>.
5. Callejas, E., y Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El cotidiano*, (157), 75-82.
6. Contreras, L., López, M., Martínez, E., y Villavicencio, S. (2019). Producción de biodiésel a partir de desechos de aceites a nivel de

laboratorio. *Revista científica Ingeniería y Ciencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar*, 1(17).

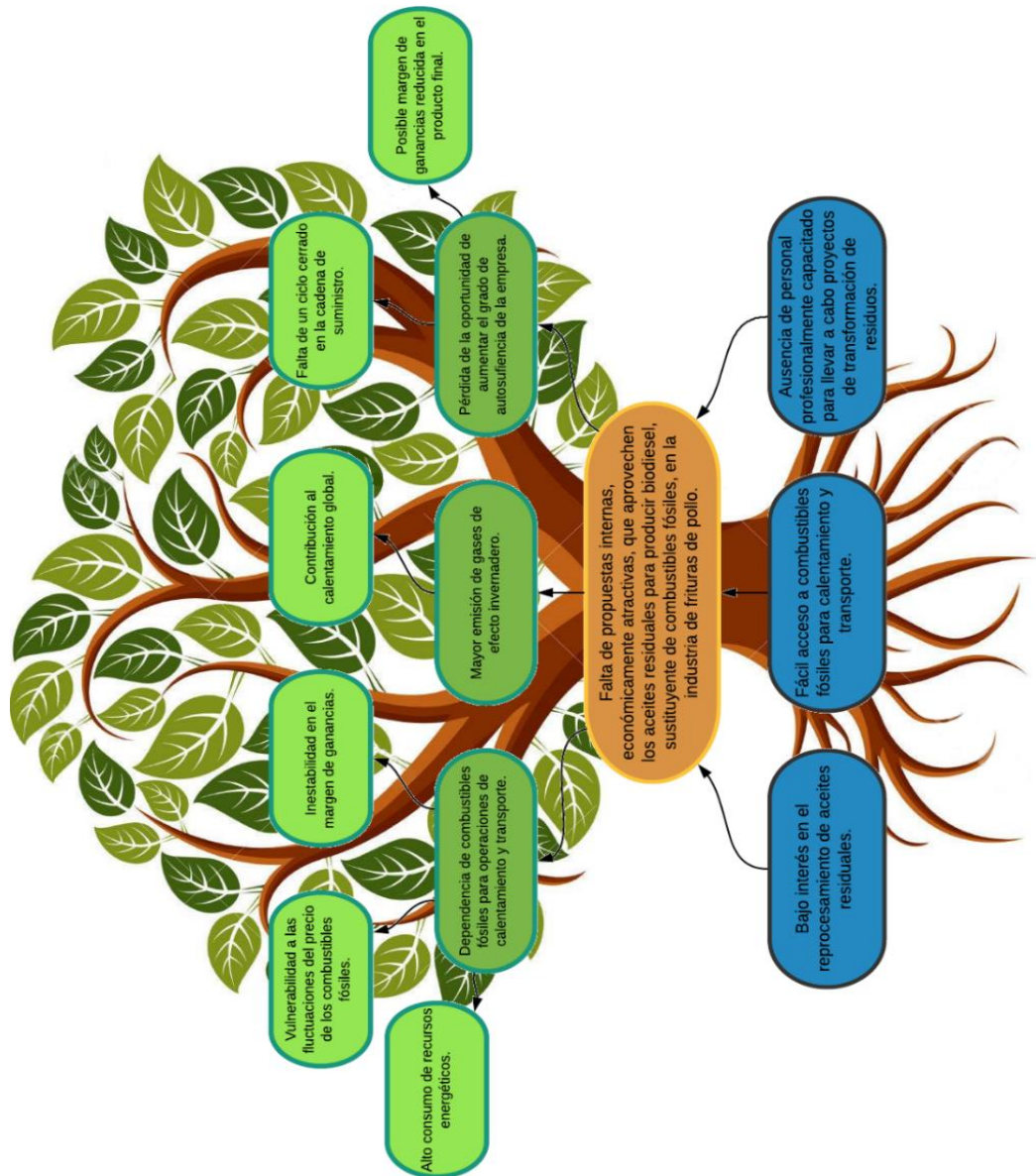
7. Evangelista, A., Alcántar, F., de Arellano, N., Barki, A., Robledo, J., y Cruz, M. (2014). Diseño de un proceso continuo de producción de biodiésel. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(2), 483-491.
8. Fernández, J. (2007). *Estudio bibliográfico y experimental de las emisiones y prestaciones de un motor trabajando con biodiésel* (Tesis doctoral). Universidad de Castilla - La Mancha, España. Recuperado de <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/977>.
9. Fogler, H. (2001). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. México: Pearson Educación. 1000p.
10. Hoekman, S., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., y Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(1), 143-169.
11. India Drytech. (s.f.). *Industrial reaction, filtration and drying equipments*. Recuperado de <http://indiadrytech.com/wp-content/uploads/2021/02/India-Dry-Tech.pdf>
12. Ipiña, C., y Cifuentes, J. (2016). Uso energético de residuos de cocinas industriales para la fabricación de biodiésel. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

13. Kemp, W. (2006). *Biodiesel: basics and beyond: a comprehensive guide to production and use for the home and farm*. Tamworth, Ont.: Aztext Press.
14. Knothe, G. (2010). Calidad del combustible biodiésel y la norma astm. *Revista Palmas*, 31(especial,), 162-171.
15. Knothe, G. (2005). Dependence of biodiésel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel processing technology*, 86(10), 1059-1070.
16. López, B. (2011). *Plan estratégico de producción de biodiésel para consumo propio en una industria azucarera guatemalteca* (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
17. McCabe, W., Smith, J. y Harriott, P. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 1199p.
18. Orellana, É. (2012). *Producción de biodiésel a escala planta piloto a partir de aceite obtenido como subproducto en el proceso de producción de harinas provenientes del aprovechamiento de los desechos del beneficiado del pollo* (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
19. Perry, R., Green, D. y Maloney, J. (2001). *Manual del ingeniero químico* (Vol. 2). Madrid: McGraw-Hill.
20. Ramos, F., Díaz, M., y Villar, M. (2016). *Biocombustibles*.

21. Red Operativa de Desguaces Españoles (RODES). (s.f.). El diésel o gasoil: todo lo que deberías saber. Recuperado de <https://www.rodes.com/mecanica/el-diesel-o-gasoil/>.
22. Sánchez, N. (2015). *Obtención de biodiésel mediante transesterificación de aceite de ricino y grasas animales: Aprovechamiento energético de la glicerina como subproducto del proceso* (Tesis doctoral). Universidad de Extremadura, España. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=46173>.
23. Sinnott, R. y Towler, G. (2005). *Chemical Engineering Design*. Oxford, Reino Unido: Elsevier Butterworth-Heinemann.
24. Sinnott, R. y Towler, G. (2019). *Diseño en Ingeniería Química*. Barcelona, España: Reverté.
25. Tacias, V., Rosales, A. y Torrestiana, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 303-313.
26. Villadiego, M., Roa, Y. y Benítez, L. (2015). Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiésel. *Revista Luna Azul (On Line)*, (40), 25-34.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Matriz de consistencia**

Planteamiento del problema	Objetivos	Variables	Metodología	Plan de acción
<p>Pregunta general</p> <p>¿Es posible diseñar una planta piloto para producir biodiésel a partir de aceite residual de frituras de pollo, en Guatemala?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Diseñar una planta piloto para producir biodiésel a partir de aceite residual de frituras de pollo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de proceso (continuo, discontinuo, semicontinuo). - Selección de materiales para diseño de equipo. - Capacidad de producción (kg de biodiésel). 	<ul style="list-style-type: none"> - Ingeniería de procesos. - Diseño de equipo. 	<p>Desarrollar el diseño de una planta piloto para producir biodiésel a partir de aceite residual de frituras de pollo.</p>
<p>Preguntas específicas</p> <p>¿Cuánto biodiésel se puede producir por kg de aceite residual?</p>	<p>Objetivos específicos</p> <p>1. Calcular el rendimiento de biodiésel producido a escala planta piloto por transesterificación de aceite residual de frituras de pollo en función de la relación aceite:metanol.</p>	<p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Relación aceite:metanol. - Concentración de NaOH (kg/kg). - Tiempo de permanencia en reactor (minutos). <p>Variables dependientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rendimiento de producción de biodiésel (kg biodiésel/kg aceite). 	<ul style="list-style-type: none"> - Obtención de materia prima (aceite residual, reactivos). - Producción de biodiésel con aceite residual de frituras a escala planta piloto. - Cálculo de rendimiento másico (kg de biodiésel por kg de aceite residual). 	<ul style="list-style-type: none"> - Obtención de la materia prima (5 días). - Producción de biodiésel en planta piloto (2 días). - Cálculos (1 día). - Organizar y estructurar datos obtenidos (2 días).

Continuación apéndice 2.

<p>¿Cuál es el diseño más apropiado para una planta piloto de producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo?</p>	<p>2. Especificar el diseño más apropiado de una planta piloto para la producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo.</p>	<p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de proceso (continuo, discontinuo, semicontinuo) - Capacidad de producción. (kg de biodiésel) <p>Variables dependientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Selección de materiales para diseño de equipo. - Diseño del proceso productivo a escala planta piloto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisiones bibliográficas acerca de diseño de procesos. - Aplicación de escalamiento de procesos. - Ingeniería de procesos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión bibliográfica de proyectos de diseño (1 día). - Realizar diagramas del proceso especificando materia prima y componentes (3 días). - Determinar las dimensiones del equipo con base en las especificaciones de capacidad de producción y la experimentación en planta piloto (5 días). - Ordenamiento y estructura de todas las especificaciones del diseño (2 días).
<p>¿Será factible económicamente una planta piloto de producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo en Guatemala?</p>	<p>3. Evaluar la factibilidad económica de una planta piloto de producción de biodiésel con aceite residual de frituras de pollo.</p>	<p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de proceso (continuo, discontinuo, semicontinuo) - Selección de materiales para diseño de equipo. - Capacidad de producción. (kg de biodiésel) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ingeniería económica para determinar la factibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de costos fijos (inversión) (1 día). - Definición de costos variables (1 día). - Realización de cálculos para obtener el costo de producción por kg de biodiésel (1 día).

Continuación apéndice 2.

		<p>Variables dependientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Costo de inversión de la planta piloto. (Quetzales) - Costos de operación de la planta piloto. (Quetzales) - Tiempo de recuperación de la inversión. (días) 		<ul style="list-style-type: none"> - Determinación del ahorro en combustible por sustitución (1 día). - Cálculo del tiempo de recuperación de la inversión con base en el ahorro (1 día). - Ordenamiento de los datos obtenidos (1 día).
<p>¿Cuál sería la estimación de la reducción de contaminación ambiental por la inclusión de biodiésel en los insumos de la empresa como sustituto parcial de combustibles fósiles?</p>	<p>4. Estimar la reducción en contaminación ambiental por la inclusión de biodiésel en los insumos de la empresa como sustituto parcial de combustibles fósiles.</p>	<p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Porcentaje de sustitución de combustibles fósiles por biodiésel. <p>Variables dependientes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reducción de la contaminación ambiental por sustitución parcial de combustibles fósiles con biodiésel. (ton CO₂) 	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculos para estimar la reducción en la contaminación. 	<ul style="list-style-type: none"> -Revisiones bibliográficas para definir el impacto de los combustibles fósiles (2 días). - Estimación de la reducción en la contaminación ambiental en función de la sustitución de combustibles fósiles por biodiésel (3 días). -Ordenamiento de dato (1 día).

Fuente: elaboración propia.