



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

**EVALUACIÓN DEL USO DE UNA RESINA DE ADSORCIÓN COMERCIAL EN EL PROCESO
DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE *JATROPHA*
CURCAS A NIVEL DE LABORATORIO**

Rosa María Lemus Fuentes

Asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, enero de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL USO DE UNA RESINA DE ADSORCIÓN COMERCIAL EN EL PROCESO
DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE *JATROPHA*
CURCAS A NIVEL DE LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROSA MARÍA LEMUS FUENTES

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paíz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Hilda Palma de Martin
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	M.Sc. Renato Ponciano Sandoval
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:

EVALUACIÓN DEL USO DE UNA RESINA DE ADSORCIÓN COMERCIAL EN EL PROCESO DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE *JATROPHA CURCAS* A NIVEL DE LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha de 10 de octubre de 2011.

A handwritten signature in blue ink, enclosed within a large, hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to read 'Rosa María Lemus Fuentes'.

Rosa María Lemus Fuentes



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 26 de Octubre de 2011
Ref.EIQ.TG. 230.2011

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el TG- 104-2010-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria, **Rosa María Lemus Fuentes**, identificada con carné No. 200516270, titulado: "EVALUACIÓN DEL USO DE UNA RESINA DE ADSORCIÓN COMERCIAL EN EL PROCESO DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE *JATROPHA CURCAS*- A NIVEL DE LABORATORIO", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico César Alfonso García Guerra

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **LEMUS FUENTES**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Inga. Teresa Lixely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



Guatemala, julio de 2011

Ingeniero

Williams Guillermo Álvarez Mejía

Director de la escuela de Ingeniería Química

Universidad de San Carlos

Ingeniero Álvarez:

El motivo de la presente es hacer de su conocimiento que habiendo completado la asesoría del trabajo de graduación de la estudiante Rosa María Lemus fuentes titulado "**EVALUACIÓN DEL USO DE RESINAS DE ADSORCIÓN COMERCIAL EN EL PROCESO DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS -A NIVEL LABORATORIO-**" considero satisfactorio el informe final que se adjunta a la presente. No habiendo inconvenientes al mismo proyecto de graduación solicito de usted autorizar la continuación de los trámites respectivos.

Sin nada más que agregar me suscribo de usted con las muestras de consideración y respeto.

Atentamente



ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA
Coordinador Área de Química

ÁREA DE QUÍMICA
ESC. INGENIERÍA QUÍMICA
FAC. INGENIERÍA - USAC -



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **ROSA MARÍA LEMUS FUENTES** titulado: "**EVALUACIÓN DEL USO DE UNA RESINA DE ADSORCIÓN COMERCIAL EN EL PROCESO DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS A NIVEL DE LABORATORIO**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejia; C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, enero de 2012

Cc: Archivo
WGAM/ale



El Decano 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: **EVALUACIÓN DEL USO DE UNA RESINA DE ADSORCIÓN COMERCIAL EN EL PROCESO DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS A NIVEL DE LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria **Rosa María Lemus Fuentes**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy

DECANO



Guatemala, enero de 2012

/cc

ACTO QUE DEDICO A

- Dios** Por que sin Él nada de esto sería posible. Por ser mi amigo fiel e incondicional y mi refugio en todo momento de mi vida.
- La Virgen María** Quien ha intercedido por mi siempre. Y ser el mejor ejemplo de mujer a seguir.
- Mis padres** Guillermo y Victoria. Quienes son los pilares de mi vida, a ustedes les debo la vida y todo lo que soy. Este logro no es de nadie más que suyo. Los amo.
- Mi hermano** José Guillermo, por haberme enseñado el verdadero significado de lo que es luchar en esta vida.
- Mi abuela** María del Carmen, por toda tu ternura y sabios consejos compartidos. Te quiero mucho Ata.
- Mi familia** Aunque no los mencione por nombre. Saben que los quiero mucho y que estoy segura que esta es una alegría que todos compartimos.
- Mis amigos** Por todo su apoyo y cariño a en todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS A

- Dios** Porque no hay amor más grande que el tuyo hacia mi. Por permitirme llegar hasta donde lo he hecho. Por estar fielmente a mi lado en todo momento.
- Virgen María** Por enseñarme que en esta vida no se debe perder ni la Fe, ni la esperanza ni la caridad. Que únicamente con estas virtudes se tiene una vida de bien.
- Mi madre** Victoria, por ser mi ejemplo a seguir, por tu apoyo, tu amor y sacrificios que has hecho por mi. No tengo palabras para agradecerte absolutamente todo lo que me has dado. Por simplemente ser la mejor mamá.
- Mi padre** Guillermo, por todo tu esfuerzo y amor brindado. Por amarme desde que me conociste y por acompañarme en todo momento. Gracias por creer en mí.
- Mis hermanos** José Guillermo, por llenar mi vida de alegría y enseñarme tantas cosas. Por demostrarme tu cariño y estar a mi lado siempre. Charlie y Lester por todo su amor y por ser unas personas tan importantes en mi vida. Los quiero mucho.

- Mi abuela** María del Carmen, por tu compañía y darme ánimos cuando más lo necesité, gracias por todas tus oraciones.
- Mi familia** Por estar siempre pendientes de mi y compartir conmigo mis penas y alegrías.
- Mis amigos** Diego, Jeimy, Milena porque ustedes fueron mi apoyo en todo momento, por todo su cariño demostrado. Por estar conmigo en las buenas y en las malas y por ser los mejores amigos. Juan José, Oscar, Aldo, Mario por compartir tantas cosas de mi vida y llenar de alegría innumerables momentos. Marcela por compartir conmigo miles de cosas a lo largo de tantos años de amistad.
- Ingeniero César Alfonso García** Por asesorar este trabajo de graduación. Por ser un mentor impecable. Por compartir sus conocimientos desinteresadamente y por todo el apoyo que me brindó en muchas ocasiones.
- Universidad San Carlos de Guatemala** En especial a la escuela de Ingeniería química por todo lo que aprendí acá y por formarme como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Elaboración de biodiesel a partir del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	1
1.1.1. India.....	1
1.1.2. Brasil.....	1
1.2. Países que desarrollan proyectos con el piñón.....	2
1.3. Antecedentes de refinación del biodiesel con resinas.....	3
1.3.1. Latinoamérica.....	3
1.3.2. Europa.....	3
1.4. Aceite a partir de <i>Jatropha curcas</i>	4
1.4.1. Extracción del aceite.....	5
1.4.2. Características del <i>Jatropha curcas</i>	6
1.4.3. Producción de aceite por hectárea.....	7
1.5. Lewatit GF 202®.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Proceso general de producción del biodiesel.....	9
2.1.1. Transesterificación.....	9
2.1.2. Alcohol en la transesterificación.....	11

2.1.3.	Refinación de ésteres .....	.11
2.1.4.	Decantación o separación de fases.....	.12
2.1.5.	Lavado del biodiesel.....	.14
2.1.6.	Métodos de lavado .....	.14
2.1.7.	Secado .....	.17
2.1.8.	Filtrado.....	.17
2.1.9.	Recuperación del alcohol .....	.18
2.1.10.	Parámetros de calidad del biodiesel.....	.18
2.2.	Adsorción.....	.21
2.2.1.	Quimisorción.....	.22
2.2.2.	Características de la quimisorción .....	.23
2.2.3.	Fisorción .....	.23
2.2.4.	Resinas de adsorción .....	.25
2.2.5.	Regeneración de las resinas de adsorción.....	.26
2.2.6.	Vida útil de las resinas de adsorción .....	.27
2.2.7.	Ventajas de la refinación con resinas de adsorción.....	.28
2.2.8.	Aplicaciones especiales del uso de resinas.....	.28
2.2.9.	Purificación de biodiesel con resinas de adsorción Lewatit GF 202® .....	.29
2.3.	Refractometría.....	.32
2.3.1.	Teoría básica.....	.32
2.4.	Densidad .....	.33
2.5.	pH.....	.34
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	.37
3.1.	Variables.....	.37
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	.38
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	.38
3.4.	Materiales .....	.39

3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa.....	40
3.6.	Metodología experimental.....	40
3.6.1.	Preparación de la muestra.....	40
3.6.2.	Mecanismo de adsorción de Lewatit GF 202®	41
4.	RESULTADOS	45
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	49
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	APÉNDICE.....	59
	ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Columnas en serie empacadas con resinas de adsorción	4
2.	Planta de <i>Jatropha curcas</i>	5
3.	Semillas de <i>Jatropha curcas</i>	6
4.	Reacción química de transesterificación	9
5.	Elaboración de biodiesel, etapa de transesterificación	10
6.	Elaboración de biodiesel, etapa de decantación	13
7.	Elaboración de biodiesel, etapa de lavado.....	16
8.	Proceso de refinado convencional del biodiesel	20
9.	Microporos en una muestra de carbón activo vista al microscopio electrónico.....	21
10.	Distintas resinas de adsorción	26
11.	Purificación de biodiesel por medio de resinas de adsorción.....	30
12.	Mecanismo de adsorción de glicerina	30
13.	Estructura de Lewatit GF 202® microscópica	31
14.	Estructura de Lewatit GF 202®.....	31
15.	Índice de refracción.....	33
16.	Picnómetro	34
17.	Diagrama No.4 columna prototipo para la refinación de Biodiesel producido a partir del aceite de piñón a nivel laboratorio.....	42
18.	Columna de adsorción de la fase experimental	44

19.	Evaluación de la densidad de biodiesel en el curso de su refinación en un lecho de resina de adsorción	46
20.	Evaluación del pH de biodiesel en el curso de su refinación en un lecho de resina de adsorción	47
21.	Evaluación del índice de refracción de biodiesel en el curso de su refinación en un lecho de resina de adsorción	48

TABLAS

I.	Especificaciones del biodiesel RTCA	19
II.	Clasificación de los tamaños de los poros de resinas	26
III.	Definición operacional de las variables de refinación de biodiesel por resinas de adsorción	37
IV.	Cristalería utilizada en la etapa experimental del Trabajo de graduación.....	39
V.	Reactivos a utilizar en la etapa experimental del Trabajo de graduación.....	40
VI.	Parámetros del biodiesel a partir del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	45
VII.	Parámetros de refinado de biodiesel producido a partir Del aceite de <i>Jatropha curcas</i> mediante resinas De adsorción	45

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ω	Ancho
cm ³	centímetro cúbico
CO ₂	Dióxido de carbono
°C	Grado Celsius
Ir	Índice de refracción
®	Marca registrada
<	Menor que
mmHg	Milímetro de mercurio
%	Porcentaje
% Vol	Porcentaje en volumen
pH	Potencial de hidrógeno

GLOSARIO

Ácido	Cualquier sustancia que en disolución acuosa aporta iones H ⁺ al medio.
Adsorción	Se utiliza para eliminar de forma individual los componentes de una mezcla gaseosa o líquida. El componente a separar se liga de forma física o química a una superficie sólida.
Álcali	Compuesto alcalino que tiene características básicas.
Alcohol	Son compuestos orgánicos formados por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno.
Aspersión	Esparcimiento de agua u otro líquido en forma de pequeñas gotas.
Biodiesel	Biocombustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo del petróleo.

Catalizador	Sustancia que está presente en una reacción química en contacto físico con los reactivos y acelera, induce o propicia dicha reacción sin actuar en la misma.
Centrifugación	Método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una fuerza rotativa, provocando la sedimentación de los sólidos o de las partículas de mayor densidad.
Ciclo	Período en que se verifican una serie de acontecimientos o fenómenos hasta llegar a uno a partir del cual vuelven a producirse en el mismo orden.
Decantación	Proceso físico de separación de mezclas, pudiendo ser estas de tipo líquido-líquido o sólido-líquido. Técnica que se basa en la diferencia de densidades de los dos componentes.
Densidad	Cantidad de masa contenida en un determinado volumen (g/ml).
Disolvente	Componente mayoritario de una disolución habitualmente líquido.

Efecto invernadero	Término empleado para designar el hecho de que la radiación solar de ondas cortas puede pasar fácilmente a través de la atmósfera hasta la superficie terrestre mientras que una parte del calor resultante es retenido en la atmósfera porque las ondas largas reflejadas hacia el exterior no pueden penetrar tan fácilmente en la atmósfera.
Emulsión	Mezcla de líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante).
Éster	Compuestos orgánicos en los cuales un grupo orgánico alquilo (simbolizado por R') reemplaza a un átomo de hidrógeno (o más de uno) de un ácido oxigenado.
Filtrado	Proceso de separación de sólidos en suspensión en un líquido mediante un medio poroso, que retiene los sólidos y permite el pasaje del líquido.
Glicerina	Es un alcohol con tres grupos hidroxilos (–OH), su fórmula es la siguiente: (C ₃ H ₈ O ₃).
Higroscópico	Compuestos que atraen agua en forma de vapor o de líquido de su ambiente, por eso a menudo son utilizados como desecantes.

- Índice de refracción** Medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo. De forma más precisa, el índice de refracción es el cambio de la fase por unidad de longitud.
- Intercambio iónico** Intercambio de iones entre dos electrolitos o entre una disolución de electrolitos y un complejo. En la mayoría de los casos se utiliza el término para referirse a procesos de purificación, separación y descontaminación de disoluciones que contienen dichos iones, empleando para ello sólidos poliméricos o minerales dentro de dispositivos llamados intercambiadores de iones.
- Ión** Partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra.
- Jatropha curcas*** Es una *Euphorbiacea* que tiene propiedades medicinales. Las semillas contienen un aceite no comestible, que se puede utilizar directamente para aprovisionar de combustible o se puede transformar en biodiesel, mediante un proceso de transesterificación.
- Lavado** Remover impurezas de una sustancia por medio de un disolvente.
- Nucleófilo** Especie que reacciona cediendo un par de electrones libres a otra especie combinándose y enlazándose covalentemente con ella.

pH	Medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H ₃ O ⁺] presentes en determinadas sustancias.
Porosidad	Capacidad de un material de absorber líquidos o gases.
Refinación	Proceso de purificación de una sustancia química, obtenida muchas veces a partir de un recurso natural.
Refractometría	Método para calcular el índice de refracción (una propiedad física fundamental de cualquier sustancia) de una muestra para, conocer su composición o pureza.
Regeneración	Capacidad de un material para reconstruir por medio de agentes externos sus partes dañadas o perdidas.
Resina	Adsorbente sintético, basado en polímeros. Posee porosidades características y en algunas ocasiones son intercambiadores de iones.
Saturación	Punto en que un componente no puede adsorber más cantidad de adsorbato de otro compuesto.
Secado	Proceso para separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo.

Transesterificación Proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.

Triglicéridos Lípidos formados por una molécula de glicerol, que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo por tres ácidos grasos, saturados o insaturados.

RESUMEN

Este estudio consistió en refinar biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* por medio de resinas de adsorción. Para realizar dicho estudio se procedió a empacar una columna de vidrio con resinas y se hizo circular el biodiesel sin refinar a través de ella a un determinado flujo.

El objetivo principal de esta metodología era el de determinar por medio de otra alternativa el refinamiento del biodiesel y para poder comprobarlo se monitorearon tres parámetros importantes en la caracterización del biodiesel tales como la densidad, el pH del agua de extracción y el índice de refracción del agua de extracción. Estos valores iban siendo comparados con los valores estándar del refino convencional y con base en el comportamiento de los mismos se definió si era posible refinar el biodiesel por medio de resinas de adsorción.

Luego de una serie de análisis en el proceso se obtuvieron como resultados una densidad de $0,85\text{g/ml} \pm 0,0072$, un pH del agua de extracción de $7,38 \pm 0,18$ y un índice de refracción del agua de extracción de $1,3350 \pm 0,0024$. Valores con los que es posible determinar que si es posible refinar biodiesel elaborado a partir de un aceite crudo por medio de resinas de adsorción. A su vez se logró determinar el número de ciclos máximos necesarios para este proceso de refino el cual es de 5.

OBJETIVOS

General

Evaluar el proceso de refinado del biodiesel producido a partir del Aceite de Piñón (*Jatropha curcas*) utilizando una resina de adsorción comercial en proporción al volumen de biodiesel/resina, comparado con relación al refinado convencional de tres etapas.

Específicos

1. Ajustar una columna para el refinado de biodiesel a todas las especificaciones necesarias, para llevar a cabo el proceso de refinación de biodiesel elaborado a partir del aceite de *Jatropha curcas* por medio de resinas de adsorción a nivel laboratorio.
2. Determinar el número de ciclos de refinado de un volumen de biodiesel a través de la columna de resinas de adsorción a un pH, densidad e índice de refracción estándar, con una relación 2/1 (biodiesel/resina) a temperatura ambiente.
3. Determinar los ciclos de refinado de refinado al punto de saturación en la columna de resinas de adsorción para establecer el punto de corte.

HIPÓTESIS

1. Es posible refinar el biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* mediante el uso de resinas de adsorción.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de elaboración de biodiesel se llevan a cabo varias etapas, de las cuales tres son de mucha importancia en el proyecto a realizar. Estas etapas son las de lavado, secado y filtrado, las cuales hacen que el proceso de refinado se lleve a cabo en un tiempo muy prolongado. Por tales motivos resulta indispensable investigar otro tipo de proceso que sea más eficiente.

Para simplificar este proceso se planteó la alternativa de refinar el biodiesel con la ayuda de resinas de adsorción y de esta manera comprobar si lo que se conoce como adsorción sólido-líquido funcionaría para este caso en particular.

Para llevar a cabo este proceso de refinado se definió una metodología la cual es detallada más adelante. Las variables claves a controlar en el proceso fueron el flujo del biodiesel a través de la columna y la temperatura de operación.

Con este proceso lo que se buscaba era obtener valores de densidad, pH e índice de refracción iguales o menores a los parámetros que presenta el biodiesel refinado convencionalmente. Y por último, para fines de este estudio, con base en los resultados obtenidos de los parámetros mencionados anteriormente se midió la capacidad de las resinas en cuanto al número de ciclos realizados a través de ellas en el proceso de refinamiento.

1. ANTECEDENTES

1.1. Elaboración de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas*

1.1.1. India

La India es el país que ha trabajado más con esta planta oleaginosa y a la vez con la utilización del aceite en los vehículos de motor. Los grandes empresarios agropecuarios hindúes, destinan para la siembra de éste cultivo todas las tierras improductivas de sus propiedades, con la finalidad de cosechar sus semillas y obtener su aceite. Toda la producción de aceite es almacenada y utilizada durante todo el año como combustible para la maquinaria agrícola y de transporte.

1.1.2. Brasil

Los brasileños durante décadas han estado investigando con etanol obtenido de la caña de azúcar, para sustituir la gasolina o utilizarlo en la mezcla con éste carburante. Últimamente han desarrollado grandes plantaciones en el nordeste del país con higuera, del cual extraen su aceite para utilizarlo como biodiesel. En estos momentos están prestando toda su atención al piñón de leche, por la excelente calidad del aceite que se obtiene de ésta planta y por la mínima exigencia que presenta en cuanto a suelo y necesidad de agua. Se ha comprobado que tiene más resistencia a la sequía, así como también a la pobreza de los suelos que la higuera, por lo cual se está utilizando en muchos países para enfrentar la desertificación.

Investigadores de este país actualmente están recorriendo varios países de América Latina, con la finalidad de obtener semillas de ésta planta en todas sus variedades, para realizar ensayos en su país sobre rendimientos de aceite, mayor adaptabilidad a suelos pobres o marginales, mayor resistencia a sequía y otras características adicionales.

Los brasileños siguen en la delantera de las investigaciones, con la finalidad de obtener sustitutos a los carburantes fósiles, altamente contaminantes del medio ambiente, de destrucción de la capa de ozono y de agudización del efecto invernadero. Está comprobado que la contaminación del biodiesel es mínima y la emisión de CO₂ que produce, la pueden reciclar en las extensas plantaciones de piñón, sin incrementar su contenido en el ambiente, como es el caso de los carburante fósiles.

1.2. Países que desarrollan proyectos con el piñón

- a) América Latina: México, Nicaragua, Belice, Brasil y Guatemala.
- b) África: Etiopía, Egipto, Burkina Faso, Mozambique, Tanzania, Sudán y prácticamente todos los países de ese continente.
- c) Asia: Nepal, La India, China, Camboya, Indonesia, Laos, Madagascar y otros países.

1.3. Antecedentes de refinación del biodiesel con resinas de adsorción

1.3.1. Latinoamérica

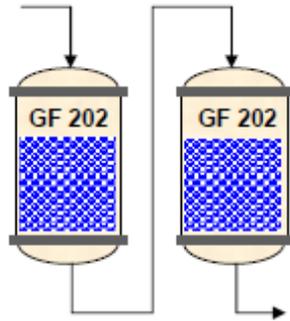
En 2008 una empresa argentina exportó una empresa llave en mano a Uruguay, que incluye tanto los procesos de extracción y refinación del aceite así como también su posterior conversión a biodiesel. Esta será una de las primeras empresas en Sudamérica en contar con tecnología de purificación de biodiesel por lavado seco.

1.3.2. Europa

Actualmente España es otro de los países que se dedica a suministrar plantas llave en mano, las cuales traen ya la tecnología de resinas de adsorción. En la etapa del lavado el biodiesel ya separado de la glicerina mediante centrifugación, es bombeado a través de 2 columnas situadas en serie. Estas columnas contienen resinas de adsorción que adsorberán las trazas restantes de agua, metanol y glicerina contenidas en el biodiesel.

El lavado mediante resinas no sólo es más económico que el lavado por agua sino que además es respetuoso con el medio ambiente y evita problemas de transporte de las aguas contaminadas a una EDAR (estación depuradora de aguas residuales).

Figura 1. **Columnas conectadas en serie empacadas con resinas de adsorción (LEWATIT GF 202 ®GF-202)**



Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

1.4. **Aceite a partir de *Jatropha curcas***

Jatropha curcas Del griego iatrós = médico, y trophé = alimento, el *Jatropha curcas* (*Jatropha Curcas L.*) es una oleaginosa de porte arbustivo, perteneciente a la familia de las Euforbiáceas, que tiene más de 3 mil 500 especies agrupadas en 210 géneros. Hasta hace poco tiempo el *Jatropha curcas* era considerado un árbol aparentemente inútil y no muy atractivo. Este arbusto sobrevive y crece en las tierras marginales y erosionadas, en las tierras que ya no sirven para la actividad agrícola. En pocas palabras, el *Jatropha curcas* crece donde no crece casi nada y se puede adaptar a la inundación y a la sequía. En cuanto a la productividad, empieza a producir de manera rentable al cabo de un año de sembrado, su producción se incrementa año con año durante los primeros 5 años y a partir de ahí se estabiliza en los 30-50 años que le quedan de vida.

Figura 2. **Planta de *Jatropha Curcas***



Fuente: <http://www.scribd.com/doc/7196527/ITDG-Opciones-Para-El-Biodiesel-en-El-Peru>.

Fecha de consulta enero 2010

1.4.1. **Extracción del aceite**

El fruto del *Jatropha curcas* es comparable con una esfera de color café claro en cuyo interior se encuentran varias semillas del tamaño, forma y apariencia de una almendra. El fruto se pela y las peladuras se almacenan en un tanque especial donde, mediante un proceso natural, se transforman en biogás y fertilizante líquido. En el primer paso, se obtienen las almendras, para ello se secan las semillas en un horno especial. Del horno, la semilla pasa a un molino, donde se separa la almendra de la cascarilla.

La almendra continúa su proceso y la cascarilla regresa al horno de secado, donde sirve también como combustible. Mientras tanto la semilla es prensada y en este paso, se obtienen dos productos: **a)** El jugo de la semilla, que es un aceite vegetal que puede ser utilizado en la alimentación humana y **b)** una torta prensada, que es lo que queda de la almendra después de exprimirla. Esta torta, que contiene algunos componentes tóxicos, también es muy útil. Una vez eliminados los elementos peligrosos, se transforma en un excelente alimento balanceado para el ganado, con un contenido proteínico superior al 50%.

Figura 3. **Semillas de *Jatropha curcas***



Fuente: <http://www.scribd.com/doc/7196527/ITDG-Opciones-Para-El-Biodiesel-en-El-Peru>.

Fecha de consulta enero 2010

1.4.2. Características del *Jatropha curcas*

El piñón (piñón de leche) es una planta originaria de América Latina, de la familia de las Euphorbiaceae de nombre científico *Jatropha curcas*. De este arbusto se obtiene el mejor aceite y en algunos aspectos, superior al aceite de higuera para ser usado como combustible, en sustitución del gasoil o diesel.

El piñón de leche es un pequeño árbol que alcanza una altura de 3 a 5 metros, con la ventaja que se desarrolla y produce bien en suelos marginales, donde prácticamente ningún otro cultivo podría desarrollarse. Resiste a la falta de agua, desarrollándose en zona de muy baja pluviometría (menos de 400 mm de lluvia por año).

Se puede sembrar por semilla o por vía vegetativa (estacas), cuando la planta es obtenida por semilla tarda 2 años para producir la primera cosecha. Sembrado por estacas la primera producción se obtiene al año. La poda es importante como todo árbol o arbusto, que produce frutos y semillas que requiere generar muchas ramas laterales, para aprovechar bien la luz solar y a la vez producir abundante floración y luego la obtención de frutos semillas.

1.4.3. Producción de aceite por hectárea

El contenido de aceite de cada semilla está entre 35% y 37%. Esto significa que tiene menor porcentaje de aceite que la palma africana, la higuera, el árbol de tung y otras plantas oleaginosas. Sin embargo su resistencia a condiciones inapropiadas para cualquier cultivo, como por ejemplo: su adaptabilidad a terrenos salinos, desérticos, pobres o marginales, de pH extremos, hace de ésta planta la ideal para obtener el biodiesel de zonas improductivas.

Una hectárea de terreno puede producir de 6-8 toneladas métricas de semillas de piñón. La misma extensión sembrada de higuera produce de 3-5 toneladas métricas de semillas. Traducida estas cifras a litros de aceite, se tendrían de 2 100 a 2 800 en el caso del piñón de leche, la higuera tendría una producción de 1 200 a 2 000 litros por hectárea. Ambos cultivos son prometedores en cuanto a la producción de biodiesel y sobre todo que permite obtenerlo, sin desmedro de la disminución de la extensión de terrenos agrícolas productoras de alimentos, porque ambos cultivos son adaptables a terrenos marginales, totalmente improductivos.

1.5. Lewatit GF 202 ®

Lewatit GF 202 ® se ha utilizado en la purificación del biodiesel a escala industrial desde 1996.

Numerosas compañías utilizan Lewatit GF 202 ® para purificar biodiesel en Europa sin embargo se puede mencionar como pioneras las plantas situadas en Milano, Italia. El primer *batch* de resinas Lewatit GF 202 ® fue utilizado por siete años.

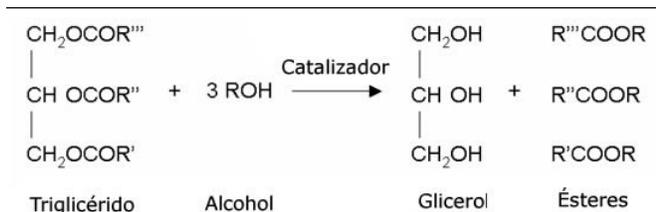
2. MARCO TEÓRICO

2.1. Proceso general de producción del biodiesel

2.1.1 Transesterificación

“Los triglicéridos en presencia de un alcohol más base, promueven una reacción denominada transesterificación. De modo general, la transesterificación es la reacción de un lípido con un alcohol, produciéndose un éster y un subproducto, o glicerol (fig. 4). Si la reacción es incompleta, habrá tri, di y monoglicéridos mezclados.”¹ Cada uno de estos componentes todavía contiene una molécula de glicerol que puede ser liberada.

Figura 4. **Reacción química de transesterificación**



Fuente: Modificado de Larosa, 2001.

¹ HERNÁNDEZ CASTELLANOS, María Gabriela. *Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a os temperaturas y 640 mmHg , para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida.* p. 37.

En esta reacción, son necesarios 3 moles de alcohol por cada mol de triglicérido. El desplazamiento de equilibrio favorece la producción de éster pudiendo ser obtenido a través de grandes excesos de alcohol o simplemente retirando el glicerol (subproducto formado), siendo este último el modo más atractivo desde el punto de vista económico.

Figura 5. Elaboración de biodiesel, etapa de transesterificación



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

2.1.2. Alcohol en la transesterificación

La elección del alcohol está generalmente relacionada con factores económicos y aspectos técnicos del proceso de producción, como la facilidad de separación de ésteres y de glicerina. Los más utilizados son el metanol y el etanol. El metanol presenta ventajas sobre el etanol, destacando: a) requiere menor cantidad de alcohol en exceso; b) posee mayor eficiencia de conversión de aceites; c) requiere menores temperaturas de reacción; d) posee menor tiempo de reacción; e) separación de fases más fácil y f) recuperación más fácil.

En tanto, la utilización de etanol puede ser atractiva desde el punto de vista ambiental, dado que puede ser producido a partir de fuentes renovables y, al contrario del metanol, no posee grandes problemas de toxicidad. El principal parámetro a ser observado en la elección del alcohol es el contenido de humedad y su forma de reaccionar ante ella.

2.1.3. Refinación de ésteres

En la mayoría de los casos la reacción de transesterificación no consigue ser completa, por lo que los productos obtenidos de la reacción se encuentran contaminados con otros compuestos. Estos compuestos pueden ser los triglicéridos que no reaccionaron, alcohol, catalizador, mono y diglicéridos, jabones y glicerol. Por esta razón, después de la transesterificación es necesario realizar una o más etapas de purificación. Convencionalmente se llevan a cabo tres etapas para la refinación de los ésteres las cuales se explican brevemente a continuación.

2.1.4. Decantación o separación de fases

Después de la reacción existen dos productos principales: glicerina y ésteres. Estos dos productos tienen densidades diferentes. Los ésteres tienen densidad del orden de $0,83 \text{ g/cm}^3$, mientras que el glicerol tiene una densidad de orden de $1,05 \text{ g/cm}^3$ o más. La densidad de la fase de glicerol depende de la cantidad de alcohol, agua y nucleófilo que contenga. Debido a la baja solubilidad del glicerol en el biodiesel, 12% máximo². Y la diferencia de densidad es posible que las fases puedan ser separadas por gravedad en un decantador.

La glicerina arrastra consigo la mayor parte del jabón, catalizador y alcohol. Aún con esto, la tasa de separación es afectada por diversos factores. La mayoría de los procesos utilizan una agitación intensa durante la reacción, al menos en su inicio para la incorporación del alcohol en exceso en la fase de aceite. Si este grado de agitación se prolonga durante todo el tiempo de reacción, el glicerol se dispersará en el medio en partículas más pequeñas. Esta dispersión conlleva un mayor tiempo de decantación de las partículas en la fase de glicerol.

² HERNÁNDEZ CASTELLANOS, María Gabriela. *Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mmHg , para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida*. P. 53.

Otro factor importante es el pH del medio de reacción. Cuanto más cerca al neutro, más rápida será la separación de fases. Ésta es una de las razones por las cuales se debe minimizar la cantidad de catalizador utilizado. La presencia de alcohol en una o ambas fases también afectaría el proceso de separación. Esto se debe al hecho de que el alcohol es miscible en ambas fases, tornando el éster soluble en glicerol y viceversa.

Figura 6. **Elaboración de biodiesel, etapa de decantación**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

2.1.5. Lavado del biodiesel

“Los ésteres deben ser lavados para remover restos de nucleófilo de jabón y de glicerol libre y ligado”³. El lavado también tiene otras dos ventajas: detiene el resto de la reacción lenta que algunas veces ocurre (en el biodiesel no lavado a veces puede observarse la glicerina asentándose durante un período de meses o semanas, lo cual puede detenerse lavando el combustible y removiendo el metanol o el catalizador) y provee información para el control de calidad.

2.1.6. Métodos de lavado

Entre los métodos más utilizados para lavar el biodiesel se encuentran: a) lavado con burbujas, b) lavado mediante atomización c) lavado con agitación y d) lavado estático. A continuación se explica brevemente de que se trata cada uno de ellos.

a) Lavado con burbujas: consiste en añadir agua delicadamente al biodiesel, agregar una piedra de aire de acuario y colocar una bomba de aire en la porción de agua (localizada bajo una capa flotante de biodiesel) que burbujee el aire a través del agua. Las burbujas de aire recogen una diminuta cantidad de agua y la transportan a través del

³ HERNÁNDEZ CASTELLANOS, María Gabriela. *Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mmHg , para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida p. 43.*

biodiesel, creando una agitación indirecta de los dos líquidos y recogiendo jabones y otros contaminantes en el camino.

Cuando la burbuja explota en la superficie, deja caer el agua recogida, la cual absorbe más jabones y otros contaminantes a medida que se hunde. El tiempo de saturación dependerá de la cantidad de agua que se utilice, de cuántos lavados se han hecho y del sistema de burbujeo.

- b) Lavado mediante atomización o aspersion: este sistema utiliza más agua y un equipo más complicado. Se usa un atomizador suspendido sobre un recipiente de biodiesel. Las minúsculas gotas de agua que rocía el atomizador caen y pasan lentamente por el biodiesel, agitando el combustible menos que el lavado con burbujas y removiendo los contaminantes gradualmente. El lavado se realiza por aspersion de agua caliente (50 a 60 °C). La aspersion debe ser tal, que no promueva la agitación para prevenir la formación de emulsión. La separación de fases entre el éster y el agua ocurre rápidamente y de forma bien definida.

Figura 7. **Elaboración de biodiesel, etapa de lavado**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

- c) Lavado estático: el lavado estático es la forma de lavado más sencilla, no requiere equipo y necesita muy poco trabajo. Consiste en verter agua (preferiblemente caliente) en un tanque de biodiesel y dejar que los líquidos reposen juntos. El contacto entre la capa de agua en la base y la capa de biodiesel arriba crea un efecto de limpieza lento y delicado debido a la polaridad del agua y a las suaves corrientes de convección creadas a medida que la temperatura se equilibra. Por ello, el lavado estático es un lavado inicial excelente. El tiempo que tomará para que el agua se sature depende principalmente de su temperatura, la cantidad de agua y el tipo de tanque de lavado que se utilice. El inconveniente con este tipo de lavado es que requiere de mucho tiempo.
- d) Lavado con agitación: este es el lavado más efectivo, aunque al mezclar mecánicamente el biodiesel con agua se formará una emulsión si se

intenta lavar combustible que no ha terminado de reaccionar. El tiempo de agitación necesario variará dependiendo del clima y la estrategia de mezclar. Además, entre más elevada y mayor sea el período de la agitación, es más probable que genere una emulsificación.

2.1.7. Secado

El biodiesel debido a la cantidad de agua utilizada durante la etapa de lavado pasa por un proceso de secado antes de ser enviado para almacenamiento. El biodiesel luego de ser lavado se transfiere a un secador en el cual se lleva a una temperatura de 120°C, posterior ha esto es transferido a otro reactor en donde se baja la temperatura hasta la temperatura ambiente.

2.1.8. Filtrado

Como etapa final del refinado el biodiesel ya lavado y secado se pasa a través de un filtro (mesh de 5 y 10 micras aprox.) para que en el queden aquellos sólidos insolubles que no pudieron ser eliminados en las otras etapas de refinación.

2.1.9. Recuperación del alcohol

En las reacciones de transesterificación se utiliza un exceso de alcohol de 100%. La razón para utilizar este exceso es que conduce la reacción a elevados niveles de rendimientos. Este exceso puede ser recuperado para su posterior utilización por medio de destilación.

2.1.10. Parámetros de calidad del biodiesel

Como cualquier producto en el mercado, este debe de cumplir ciertos parámetros de calidad. Tomando en cuenta que las materias primas con las que se elabora el biodiesel no siempre provienen de la misma fuente, es necesario tratar el biodiesel hasta que cumpla con las características adecuadas para su uso en motores diesel.

Los principales estándares de calidad están basados en las normas ASTM D6751-03 empleada en los Estados Unidos y la norma EN 14214 usada en la Unión Europea.

A continuación se detallan algunas especificaciones acerca de las características exigidas por la norma ASTM de biodiesel (B100) en el reglamento Técnico Centro Americano.

Tabla I. Especificaciones de biodiesel del RTCA

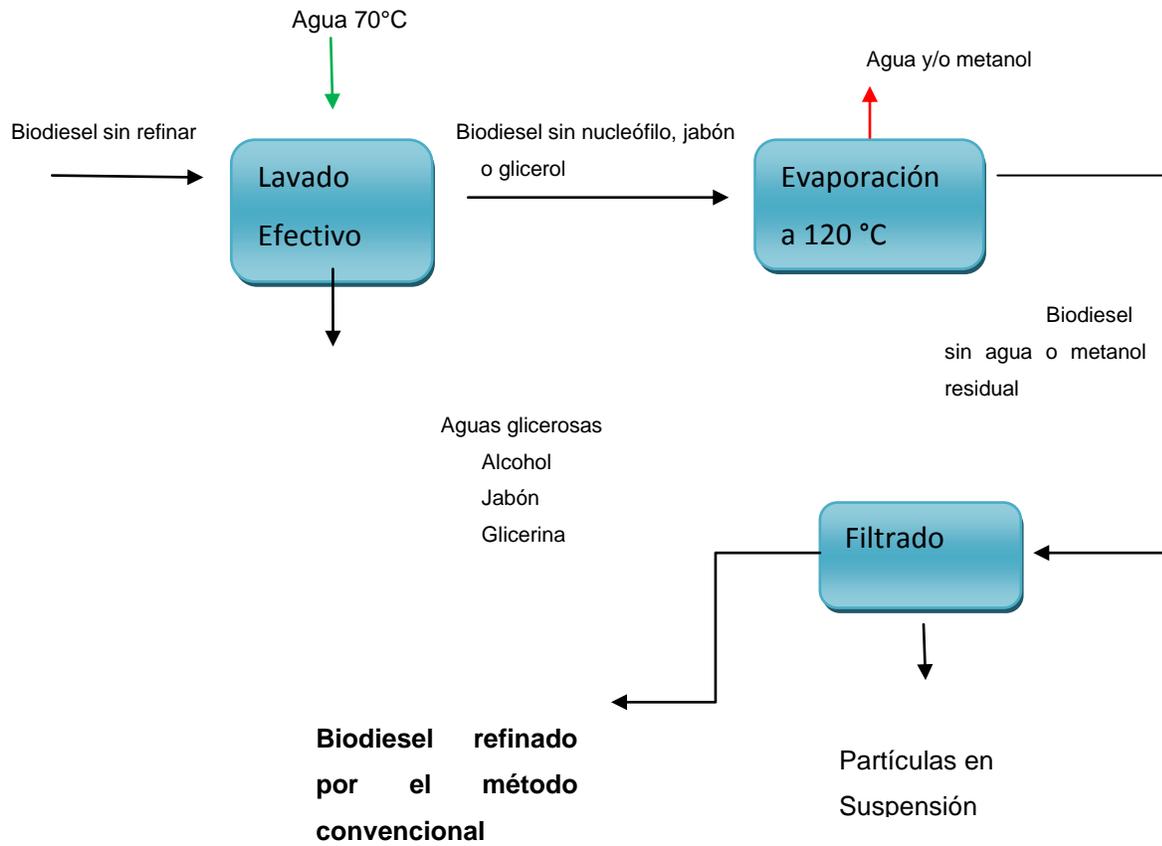
Características	Unidades	Método de análisis	Valores
Aditivos	-----	-----	Reportar
Contenido de ésteres	*(% masa)	EN1413	96,5 mín
Contenido de metanol o etanol	*(% masa)	EN14110	0,20 máx.
Gravedad API a 15,56 °C (60°F) o densidad a 15 °C	°API kg/m3	ASTM D-287 ASTM D-1298	Reportar
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	H	EN 14112	6,0 mín.
Punto de inflamación ("Flashpoint")	°C	ASTM D 93	130,0 mín.
Agua y sedimentos	** (% Vol.)	ASTM D 2709	0,050 máx.
Viscosidad cinemática a 40°C.	mm ² /s	ASTMD 445	1,9 – 6,5
Contenido de azufre total	mg/kg	ASTM D 5453	15 máx.
Corrosión tira de cobre, 3h, 50 °C	-----	ASTM D 130	N° 3 máx.
Número de cetano	-----	ASTM D 613	47 mín.
Punto de enturbiamiento	°C	ASTM D 2500	Reportar
Residuo de carbón	*(% masa)	ASTM D 4530	0,050 máx.
Número ácido	mg KOH /g	ASTM D 664	0,50 máx.
Glicerina libre	*(% masa)	ASTM D 6584	0,020 máx.
Glicerina total	*(% masa)	ASTM D 6584	0,240 máx.
Contenido de fósforo	*(% masa)	ASTM D 4951	0,001 máx.
Temperatura de destilación, temperatura equivalente atmosférica, 90% recuperado	°C	ASTM D 1160	360 máx.
Sodio (Na) y potasio (K) combinados	mg/kg	UOP 391	5 máx.
Calcio (Ca) y magnesio (Mg) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máx.

*fracción de masa (% masa)

**fracción de volumen (% volumen)

Fuente: Reglamento Técnico Centro Americano RTCA 75.02.43:06.

Figura 8. **Proceso del refino convencional del biodiesel**

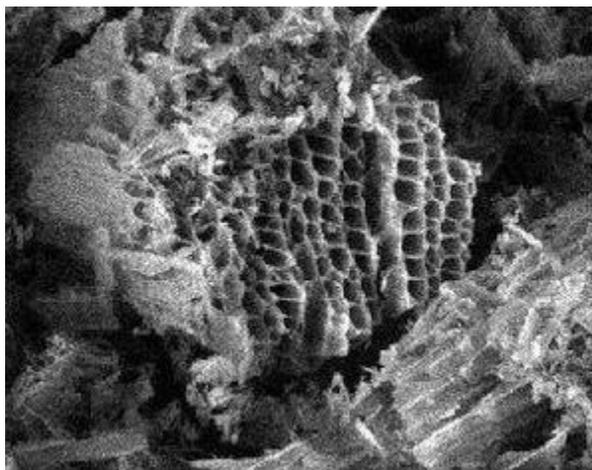


Fuente: elaboración propia.

2.2. Adsorción

“La adsorción es el proceso mediante el cual un sólido poroso (a nivel microscópico) es capaz de retener partículas ya sean líquidas o gaseosas en su superficie tras entrar en contacto con éste”⁴.

Figura 9. **Microporos en una muestra de carbón activo vista al microscopio electrónico**



Fuente: [http://www.cnyn.unam.mx/~wencel/Cursos/Fenomenos%20de%20superficies/ADS ORCION_Tatiana.pdf](http://www.cnyn.unam.mx/~wencel/Cursos/Fenomenos%20de%20superficies/ADS%20ORCION_Tatiana.pdf). Fecha de consulta junio 2010.

⁴ROHM and HASS (Amberlite). Dow Chemical, Bayer (Lewatit) *Folleto Técnico de resinas de adsorción*. Purolite, Sybron (Ionac). 2008. p. 4.

El adsorbente dispone de microporos lo que se conoce como centros activos, en los que las fuerzas de enlace entre los átomos no están saturadas. Estos centros activos admiten que se instalen moléculas de naturaleza distinta a la suya, procedentes de un gas o un líquido en contacto con su superficie. La adsorción es un proceso exotérmico y se produce por tanto de manera espontánea si el adsorbente no se encuentra saturado.

2.2.1. Quimisorción

“La quimisorción ocurre cuando un enlace químico, definido en este caso como un intercambio de electrones, se forma. El grado de intercambio y lo simétrico que sea dependen de los materiales involucrados. A menudo hay un paralelismo con las situaciones encontradas en química de coordinación”⁵. La quimisorción es particularmente importante en la catálisis heterogénea, la forma más común en la industria, donde un catalizador sólido interacciona con un flujo gaseoso, el reactivo o los reactivos, en lo que se denomina reacción en lecho fluido.

La adsorción del reactivo por la superficie del catalizador crea un enlace químico, alterando la densidad electrónica alrededor de la molécula reactiva y permitiendo reacciones que normalmente no se producirían en otras circunstancias. La corrosión es un ejemplo de ello.

⁵ CHALÉ, Fabio. *Adsorción* [en línea] México. Fecha de consulta 6 de enero del 2010. Disponible en http://www.cnyn.unam.mx/~wencel/Cursos/Fenomenos%20de%20superficies/ADSORCION_Tatiana.pdf

2.2.2. Características de la quimisorción

- a) Hay especificidad, sólo algunos sitios superficiales adsorben ciertas moléculas.
- b) Hay una interacción de los estados electrónicos del adsorbato (gas) y del adsorbente (sólido), lo que se traduce en la formación de un verdadero enlace químico.
- c) Como consecuencia de la reacción química superficial (rompimiento y formación de enlace) se desprende una cantidad elevada de calor.
- d) La quimisorción requiere del suministro de una cierta cantidad de energía para iniciar el proceso (energía de activación). Proceso activado no espontáneo.

2.2.3. Fisorción

“La fisorción es la forma más simple de adsorción y es debida a débiles fuerzas atractivas, generalmente fuerzas de Van der Waals. Dado que estas fuerzas son omnipresentes, resulta que rápidamente cualquier superficie limpia expuesta al ambiente acumula una capa de material fisorbido”⁶.

⁶ CHALÉ, Fabio. *Adsorción* [en línea] México. Fecha de consulta 6 de enero del 2010. Disponible en http://www.cnyn.unam.mx/~wencel/Cursos/Fenomenos%20de%20superficies/ADSORCION_Tatiana.pdf

Características de la Fisisorción

- a) El fenómeno es general y se produce en cualquier sólido o de sistemas de fluidos, a pesar que ciertas interacciones moleculares específicas pueden ocurrir, especialmente derivadas de las propiedades geométricas o electrónica del adsorbente y / o adsorción.
- b) Evidencia de la perturbación de los estados electrónicos del adsorbente y adsorbato es mínima.
- c) Las especies adsorbidas son químicamente idénticas a las de la fase fluida, por lo que la naturaleza química de los fluidos no se ve alterada por la adsorción y desorción posterior.
- d) La energía de interacción entre las moléculas de adsorbato y adsorbente es del mismo orden de magnitud, pero suele ser mayor que la energía de la condensación de la adsorción.
- e) La etapa primaria en la adsorción de una fase gaseosa no implica una energía de activación lenta, la temperatura de equilibrio puede resultar determinante para la velocidad de los procesos de transporte.
- f) En la adsorción física, el equilibrio se establece entre el adsorbato y la fase fluida. En los sistemas sólido / gas a presiones no muy altas el grado de adsorción aumenta con el incremento de la presión del gas y por lo general disminuye con el aumento de la temperatura.
- g) En condiciones apropiadas de presión y temperatura, las moléculas de la fase gaseosa pueden ser adsorbidas por encima de quienes están en contacto directo con la superficie.

2.2.4. Resinas de adsorción

Los adsorbentes sintéticos, basados en polímeros, conocidos como resinas se encuentran disponibles comercialmente en formas tipo gel o verdaderamente porosas. Para fines de este estudio se estudiarán únicamente las resinas verdaderamente porosas. “La porosidad interna de estas resinas, varía en proporción inversa con el grado de entrecruzamiento con el hinchamiento y, por tanto la porosidad, es normalmente más pronunciada en disolventes con una constante dieléctrica alta. El ión mantenido por el adsorbente influye también en el hinchamiento de la resina”⁷. Así el tamaño de las partículas de resina cambia durante el proceso de adsorción cuando la resina cambia de una forma a otra y este efecto es más intenso para las resinas con un grado de entrecruzamiento más bajo.

Al producirse la adsorción, la capacidad de la resina comienza a decrecer, debido a que posee una capacidad limitada para la remoción de adsorbatos de las soluciones y debido a esto, en un momento dado habrá llegado a su punto de saturación y se producirá un cierto pase de adsorbatos no deseados en el fluido procesado. Por este motivo, cuando se diseña una columna de adsorción, se establece a priori la concentración máxima admisible de iones y/o adsorbatos indeseables en la salida del proceso. Cuando se llega a la concentración pre establecida, se debe proceder a regenerar la resina, para poderla utilizar en un nuevo ciclo.

⁷PERRY, Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. p. 2.

Figura 10. **Distintas resinas de adsorción**



Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

Tabla II. **Clasificación de los tamaños de los poros de resinas**

Tipo	Diámetro del poro	Características
Microporo	$\omega < 2\text{nm}$	Potenciales de pared superimpuestos
Mesoporo	$2\text{nm} < \omega < 50\text{nm}$	Condensación capilar
Macroporo	$\omega > 50\text{nm}$	Efectividad de la pared plana hasta p

Fuente: Tabla No. II Manual del Ing. Qco. Sección 16-11.

2.2.5. **Regeneración de las resinas de adsorción**

La regeneración de las resinas de adsorción es el proceso inverso del proceso de adsorción (desorción) y tiene por finalidad devolverle a la resina de adsorción su capacidad inicial adsorbente. Esto se realiza haciendo pasar soluciones que contengan el ión móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

Para la regeneración de las resinas de adsorción se utiliza:

- a) Sal común (cloruro de sodio) para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes.
- b) Ácido clorhídrico o ácido sulfúrico (depende del costo y de la eficiencia): para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes y resinas catiónicas de ácidos débiles.
- c) Hidróxido de sodio o hidróxido de amonio: para regenerar resinas aniónicas de bases fuertes y resinas aniónicas de bases débiles. Una vez regenerada la resina está lista para un nuevo ciclo de adsorción.
- d) Metanol anhidro: Circula a través de la resina para desplazar el compuesto de interés (glicerina).

2.2.6. Vida útil de las resinas de adsorción

Luego de una serie de ciclos las resinas de adsorción sufren la pérdida de sitios de intercambio activo o sufren la rotura de los enlaces transversales de la resina, disminuyendo su capacidad adsorbente.

Las resinas catiónicas fuertes, primero pierden su capacidad de intercambio para captar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas aniónicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como los carbonatos y silicatos.

La mayoría de autores de la especialidad asignan una vida útil esperada de las resinas de adsorción entre los 5 y los 10 años.

La utilidad de poder determinar la capacidad de adsorción reside en poder comparar las capacidades de varias resinas cuando se necesita escoger una resina adecuada a las necesidades de operación; así mismo sirve para saber el estado de la vida útil de una resina que está en uso y determinar en qué momento necesita ser cambiada.

2.2.7. Ventajas de la refinación con resinas de adsorción

- a) Mayor rendimiento de conversión
- b) Procedimiento más ecológico (no se trabaja con ácido)
- c) Se puede trabajar con aceites crudos, con cualquier valor de acidez
- d) Mejor proceso de transesterificación
- e) Glicerina de mejor calidad
- f) Menor inversión inicial
- g) Tratamiento de secado menos intenso

2.2.8. Aplicaciones especiales del uso de resinas

Se han hecho múltiples experimentos acerca del uso que se le puede dar a las resinas de adsorción y las más recomendadas por los proveedores son las siguientes:

- a) Purificación de agua de desechos
- b) Purificación de agua potable
- c) Purificación ácida

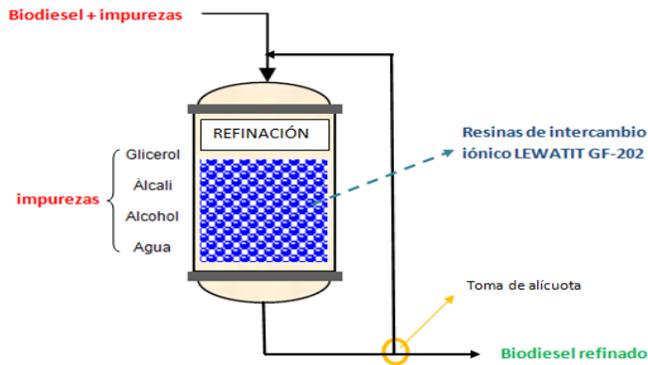
2.2.9. Purificación de biodiesel con resinas de adsorción Lewatit GF 202®

Lewatit GF 202 ® remueve glicerina, jabones, sales, agua y metanol. Puede reemplazar el agua de lavado convencional, eliminar el costo y agotamiento de agua y reduce la inversión y gastos de funcionamiento.

Características de Lewatit GF 202 ® en la purificación del biodiesel

- a) Cumple con los requisitos de las especificaciones estrictas de la industria del combustible.
- b) Un litro de Lewatit GF 202 ® puede purificar hasta 10 toneladas/ año de biodiesel.
- c) Son regenerables y poseen una vida útil prolongada.
- d) Se puede adaptar en las plantas existentes que utilizan lavado con agua.
- e) Todas las cualidades del biodiesel, independientemente de la fuente de triglicéridos puede ser tratada.
- f) Es aplicable en las plantas que van desde 100 a 1 000 000 toneladas/año.

Figura 11. **Purificación de biodiesel a partir de resinas de adsorción**

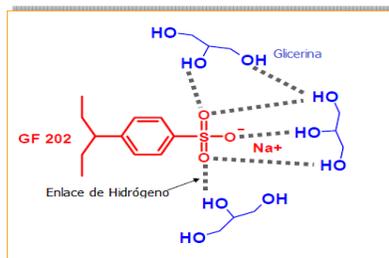


Fuente: elaboración propia.

2.2.10. Mecanismo de adsorción de Lewatit GF 202 ®

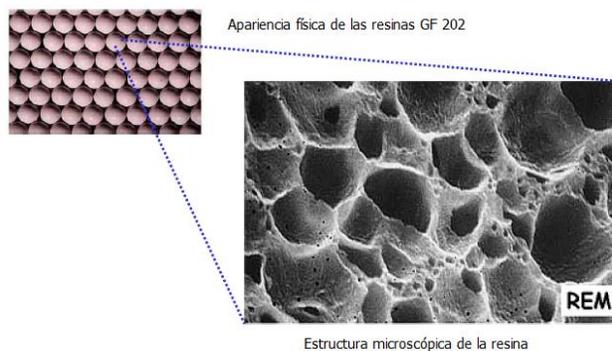
El Lewatit GF 202 ® higroscópico y además forma fuertes enlaces de hidrógeno con alcoholes y agua. La glicerina es un polihol y es posible removerla eficientemente debido a la baja afinidad de los ésteres de biodiesel por la glicerina.

Figura 12. **Mecanismo de adsorción de glicerina**



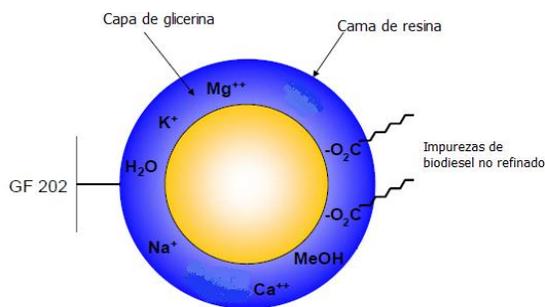
Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

Figura 13. **Estructura microscópica de Lewatit GF 202 [®]**



Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

Figura 14. **Estructura de Lewatit GF 202 [®] Mecanismo de adsorción de sales y jabones⁸**



Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

⁸ROHM and HASS (Amberlite). Dow Chemical, Bayer (Lewatit) *Folleto Técnico de resinas de adsorción*. Purolite, Sybron (Ionac). p. 4.

2.3. Refractometría

“Es una técnica analítica que consiste en la medida del índice de refracción de un líquido con objeto de investigar su composición si se trata de una disolución o de su pureza si es un compuesto único”⁹.

2.3.1. Teoría básica

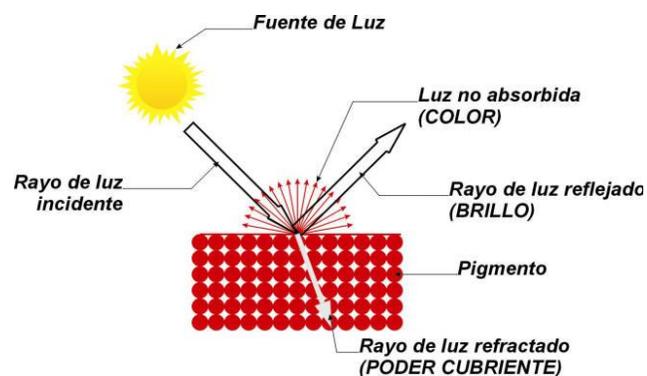
La refracción es la desviación que experimentan los rayos luminosos al pasar de un medio transparente de densidad determinada a otro cuya densidad es distinta de la del anterior. Si bien este fenómeno se presenta generalmente al paso de un medio a otro, existe un caso en el que dicho paso no implica refracción, que es cuando la incidencia se produce perpendicularmente a la superficie de separación de ambos medios.

La refracción es fundamental para la explicación de los procesos que experimenta la luz en prismas y lentes de todo tipo. Mientras que la luz se propaga con velocidades diferentes dependiendo de la densidad del medio por el que lo hace, la intensidad del fenómeno de la refracción depende del grado de la variación de la velocidad de propagación.

⁹HERNÁNDEZ CASTELLANOS, María Gabriela. *Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mmHg , para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida.* p.57.

El fenómeno de la refracción está basado en el cambio de velocidad que experimenta la radiación electromagnética al pasar de un medio a otro, como consecuencia de su interacción con los átomos y moléculas del otro medio. Dicho cambio de velocidad se manifiesta en una variación en la dirección de propagación.

Figura 15. Índice de refracción



Fuente: <http://www.buscagro.com/www.buscagro.com/biblioteca/Alberto-Gonzalez/Que-es-el-biodiesel.ppt#268,7,Especificaciones del biodiesel B=100 de Uso Puro. 3 de enero del 2010>.

2.4. Densidad

“La densidad o densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. Su unidad en el Sistema Internacional es el kilogramo por metro cúbico (kg/m^3), aunque frecuentemente se expresa en g/cm^3 . La densidad es una magnitud intensiva”¹⁰.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

¹⁰ CARPI, Anthony. DAY, Martha Marie. *Densidad*, p.23.

Donde ρ es la densidad, m es la masa y V es el volumen del determinado cuerpo.

Figura 16. **Picnómetro, instrumento de medición de la densidad**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

2.5. pH

El pH (potencial de hidrógeno) es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. El pH ha sido definido como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. Esto es:

$$pH = -\log_{10} [a_{H_3O^+}]$$

Desde entonces, el término "pH" se ha utilizado universalmente por lo práctico que resulta para evitar el manejo de cifras largas y complejas. En disoluciones diluidas, en lugar de utilizar la actividad del ion hidrógeno, se le puede aproximar empleando la concentración molar del ion hidrógeno.

El pH típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7 (el valor del exponente de la concentración es mayor, porque hay más protones en la disolución) , y alcalinas las que tienen pH mayores a 7. El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución (donde el disolvente es agua).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Tabla III. Definición operacional de las variables Refinación de biodiesel por medio de resinas de adsorción

No.	Variable	Tipo de Variable	Dimensionales
1	Número de muestras a refinar	Independiente	
2	No. ciclos en cada proceso de refino	Dependiente	
3	Densidad del biodiesel	Respuesta	g/ml
4	Índice de refracción del agua de extracción	Respuesta	
5	pH del agua de extracción	Respuesta	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

- a) Industria: productora de biodiesel
- b) Proceso: refinación de biodiesel elaborado únicamente a partir de aceite de *Jatropha curcas*
- c) Etapa: adsorción de impurezas y neutralización de pH.
- d) Equipo: nivel laboratorio
- e) Alternativa evaluada:
- f) Variación del número de ciclos en el proceso de refinación de biodiesel.

3.3. Recursos humanos disponibles

- a) Investigador: Rosa María Lemus Fuentes
- b) Asesor: Ingeniero Químico César Alfonso García.
- c) Coasesor: Ingeniero Agrónomo Marino Barrientos.

3.4. Materiales

Tabla IV. **Cristalería utilizada en la etapa experimental del trabajo de graduación**

Cristalería	
Nombre	Especificaciones
Erlenmeyer	100 ml
Pisetas	de polietileno 200 ml
Pipetas	Serológicas 1, 5 y 10 ml
Buretas	25, 10 ml
Beaker	pyrex 25, 50, 100, 200, 250, 1000 ml
Probeta	1, 5, 10, 25 ml
Picnómetro	10, 25 ml
Ampolla de decantación	250 ml
Pinzas	Metálicas para soportar columnas
Soporte universal	No aplica
Vástagos	No aplica
Anillo de soporte	No aplica

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Reactivos a utilizar en la etapa experimental del trabajo de graduación**

Reactivos	
Descripción	Especificaciones
Biodiesel	Obtenido a partir de aceite de <i>Jatropha curcas</i>
Metanol	Grado industrial Brenntag
Resinas	Lewatit GF 202 ®
Agua destilada	Grado industrial

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se llevaron a cabo técnicas cuantitativas para realizar las curvas de rompimiento de las resinas. Tales técnicas son:

- a) Medición de densidades
- b) Medición del índice de refracción del agua de extracción
- c) Medición del pH del agua de extracción

3.6. Metodología experimental

3.6.1. Preparación de la muestra

- a) La transesterificación del biodiesel se llevó a cabo a una temperatura no menor de 60°C.

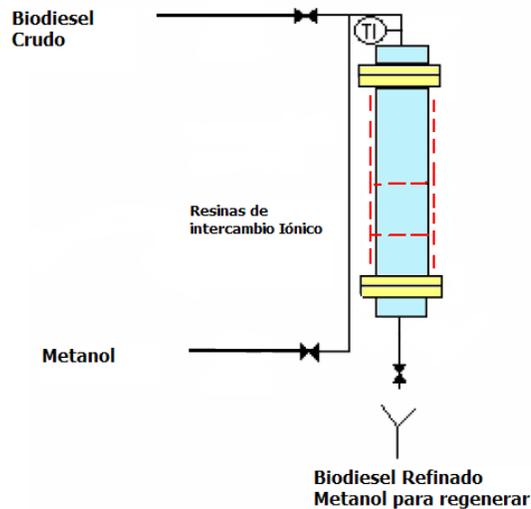
- b) Se decantó correctamente la glicerina del biodiesel en un tiempo no menor de 2 horas.
- c) La temperatura a la que circuló el biodiesel por la columna de adsorción es de 23°C aproximadamente

3.6.2. Método experimental para la refinación de biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* por medio de resinas de adsorción en proporción al volumen de biodiesel

Este método resultó ser una adsorción sólido-líquido en la cual las resinas de adsorción (fase sólida) adsorbieron compuestos tales como glicerina, metanol o bien otros compuestos insolubles que se encuentren suspendidos en el biodiesel. Se empacó la columna con un lecho de resinas de adsorción y se hizo pasar a través de ella dos volúmenes de biodiesel. El flujo de biodiesel iba en dirección descendente, la toma de muestras se hizo en los tiempos estipulados y estas se analizaron fisicoquímicamente dependiendo de los parámetros establecidos para el refinado.

Los resultados obtenidos se compararon con las propiedades fisicoquímicas que presenta el biodiesel refinado por el método convencional. Se hizo circular el biodiesel a través de la columna con resinas hasta que las propiedades fisicoquímicas se igualaban o acercaban a las del proceso convencional y a partir de este punto se volvía a circular el biodiesel a través de la columna hasta encontrar el punto de corte del experimento.

Figura 17. **Columna prototipo para la refinación de biodiesel producido a partir del aceite de Piñón (*Jatropha curcas*) a nivel laboratorio**



Fuente: Experimental Protocol Lanxess.

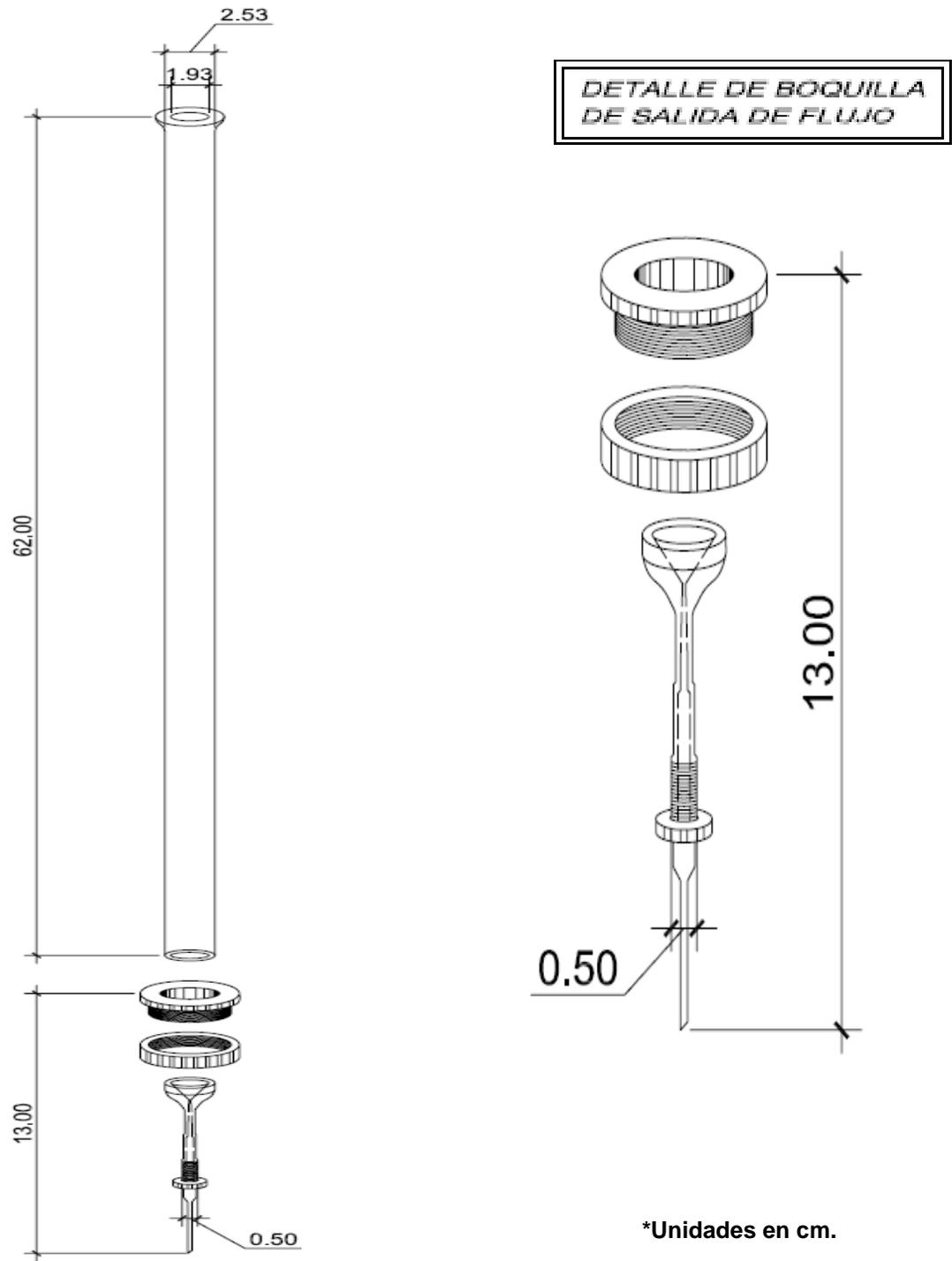
3.6.3. **Ajuste de la columna prototipo para el proceso de refinación de biodiesel elaborado a partir del aceite de *Jatropha curcas***

De acuerdo a las especificaciones requeridas por el proveedor de resinas de adsorción, la columna prototipo para llevar a cabo la refinación del biodiesel fue diseñada de la siguiente manera:

- Material de la columna, vidrio
- Altura no menor de 3 pies
- Diámetro interno de columna 2,2 cm.

- d) La temperatura de operación no debe ser mayor de 40 °C
- e) Entrada de flujo de biodiesel de arriba hacia debajo de la columna
- f) En la parte inferior de la columna antes de donde se encuentra la válvula de salida del fluido se encuentra una trampa, que funciona como filtro para evitar la salida de las resinas

Figura 18. **Columna de adsorción para la etapa experimental**



Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

Tabla VI. **Parámetros del Biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas***

Parámetro	Biodiesel sin refinar	Refino convencional
Densidad (g/ml)	0,8786	0,8622
pH	8,13	6,97
Índice de Refracción	1,3425	1,335

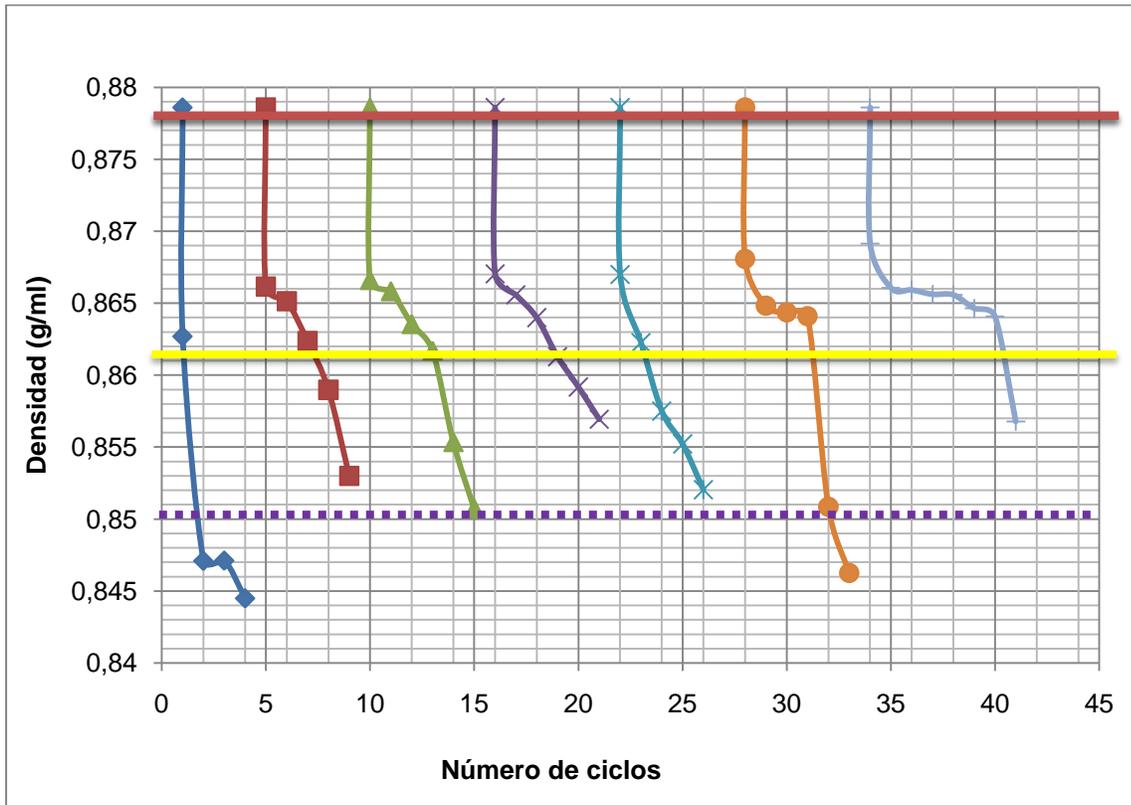
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Parámetros de refinado de biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* mediante resinas de adsorción**

Descripción	Especificación
Relación biodiesel: resina	2:1
Volumen de resina por ciclo	100 ml
Temperatura de refino	23 C
Caudal biodiesel	3,13 ml/s
Altura de lecho de resina	24 cm.
Medición de pH e índice de refracción en extracto acuoso	1:1

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Evaluación de la densidad de biodiesel en el curso de su refinación en un lecho de resina de adsorción según condiciones especificadas en tabla VII

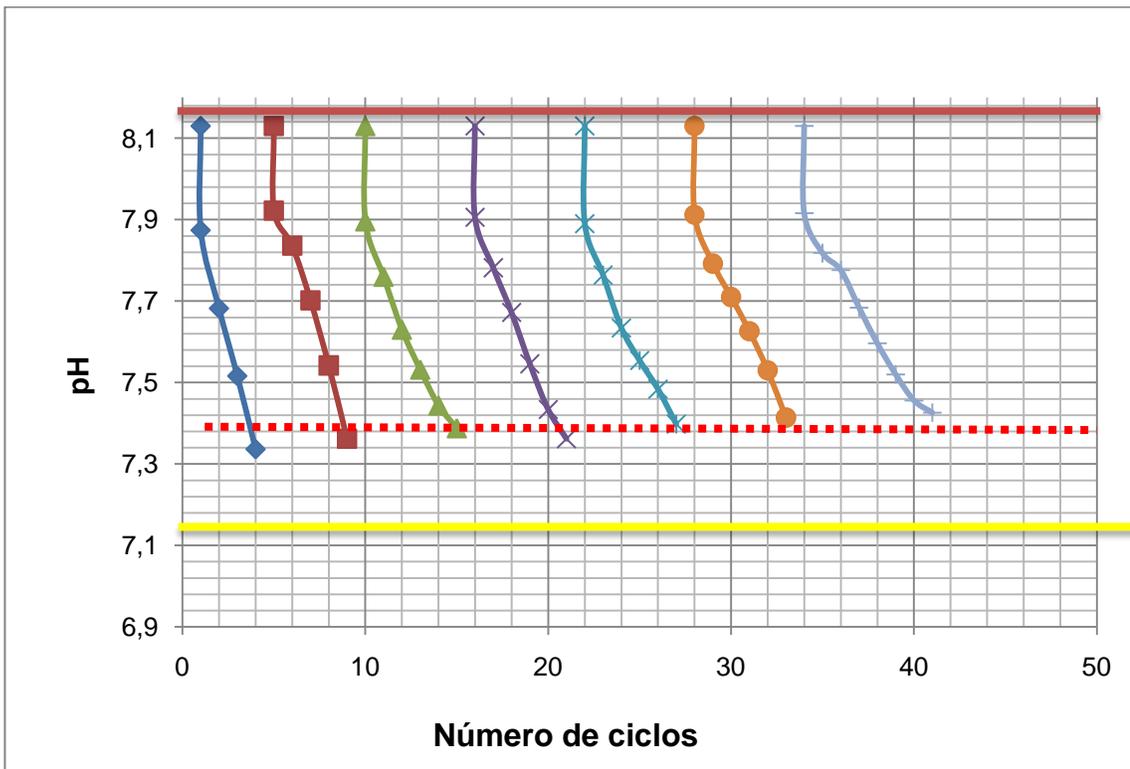


Especificaciones del biodiesel		
	Densidad sin refinar	0,8786
	Densidad refino convencional	0,8622
	Densidad refino con resinas	0,8522 ± 0,0072

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Evaluación del pH de biodiesel en el curso de su refinación en un lecho de resina de adsorción según condiciones especificadas en tabla

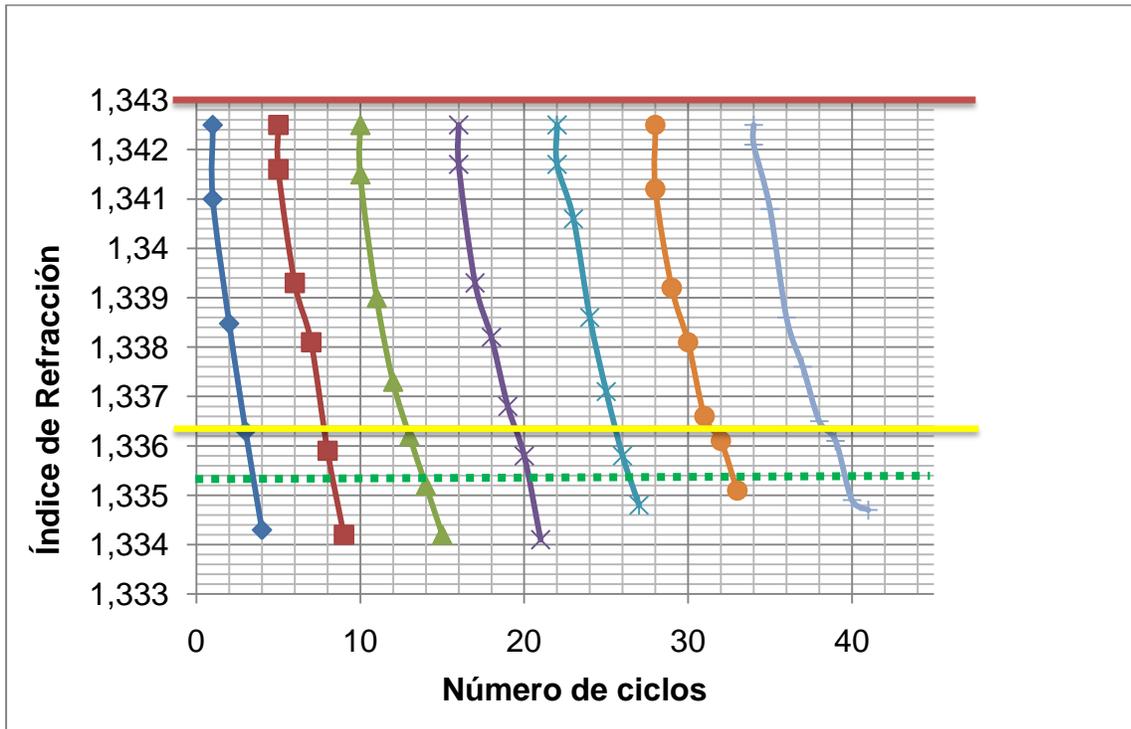
VII



Especificaciones del Biodiesel		
	pH sin refinar	8,13
	pH refino convencional	6,97
	Ph refino con resinas	7,38 ± 0,18

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Evaluación del índice de refracción de biodiesel en el curso de su refinación en un lecho de resina de adsorción según condiciones especificadas en tabla VII



Especificaciones del Biodiesel		
	Índice de refracción sin refinar	1,3425
	Índice de refracción refino convencional	1,3350
	Índice de refracción refino con resinas	1,3344 ± 0,0024

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En relación al objetivo general en el cual se planteó evaluar el proceso de refinado de biodiesel en un lecho de resina de adsorción se observó que el lecho permitió realizar los ciclos de refinado sin ninguna restricción. El único factor que influyó en ajustes fue el hinchamiento de resinas para lo cual se tuvo que corregir el caudal nominal controlando la válvula de descarga en la boquilla final.

Además se pudo observar que el caudal de biodiesel al ser refinado a través del lecho de resina de adsorción, este variaba en forma tal que por el grado de compactación de la resina no podría darnos una respuesta lineal en la medición si no que estaría influido por las resistencias que se incrementarían de la parte superior de la resina hasta la parte inferior, por lo que se optó de realizar la evaluación del caudal cuando estaba totalmente cubierta la resina y cuando se llevaba 100 ml de biodiesel ya drenado. Con estos datos obtenidos se estableció el modelo matemático con mayor correlatividad y correspondió a un modelo potencial de la forma: $\text{Vol. Biodiesel} = 2,9061t^{1,0824}$ lo que nos da un caudal promedio de 3,13ml/s

En relación a las especificaciones de BAYER en el cual el parámetro crítico es el caudal, si fue posible mantenerlo y ajustarlo para cuando se observaba que el hinchamiento de la resina reducía el caudal, como se observa en la gráfica de densidad a partir de la cuarta muestra en donde se puede observar que el avance en la refinación estaba influido por el drenaje de la columna al caudal referido. Al ajustar dicho caudal nuevamente la

resina operaba en condición de refinado como en los primeros ciclos alcanzó valores más bajos que la especificación establecida según tabla XVIII.

En relación del objetivo No.1 y No.2 en donde se evalúan la efectividad de la resina en función de la reducción de densidad. La masa promedio de impurezas en biodiesel que se adsorbió por el lecho por mL fue de 0,0117 gramos y que en relación a los 200 ml de muestra que se utilizaba por ciclo nos da un valor de 2,34 gramos por muestra refinada (Ref. Muestra de cálculo, Apéndice 3. Ec.1). Si ahora se evalúa el rendimiento de la resina refinando 7 muestras nos resulta que la resina adsorbe 16,38 gramos lo que nos permitió observar la evolución de la oclusión de la resina y que requirió la corrección del caudal a mayor apertura de la llave de la columna.

De igual manera si evaluamos el comportamiento del refinado en función del pH podemos realizar el mismo razonamiento. El valor promedio de pH al inicio de cada muestra es de 8,13 y el pH final promedio para el conjunto de muestras es de 7,4, por lo que el cambio de pH que es equivalente a 0,746. La diferencia entre ambos valores nos da la cantidad de mmol OH adsorbidos por mL por ciclo. Este valor multiplicado por 200 mL de cada muestra nos da un valor $2,72E-0.8$ total de iones OH adsorbidos por muestra (Ref. Muestra de cálculo Apéndice 3). Y como realizamos un refinado de 7 muestras de 200 mL. $1,90E-7$ entonces este valor nos indica la cantidad total de iones OH que adsorbió el lecho en total

En relación al índice de refracción monitoreado durante la refinación del biodiesel estudiado no se encontró variaciones notables en este parámetro medido ya que la variación del índice de refracción promedio fue de 7 milésimas lo cual nos da una variación insignificante de manera que

evaluar el objetivo 2 en función de este parámetro no redundaría en interpretaciones importantes.

En relación al objetivo No.3 podemos observar de la gráfica de densidad en función de los ciclos de cada muestra, que cuando se observa la proyección de la séptima muestra refinada se presenta una zona de no variación de la densidad reflejo de la saturación que sufre el lecho de la resina de adsorción por lo que se puede interpretar que la resina de adsorción ya menguó su capacidad y que por lo tanto el número de ciclos que pudieran ser eficientemente utilizados para refinación estarían entre 5 y 6 ciclos únicamente.

En referencia a la hipótesis propuesta si podemos concluir que el refinamiento de biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas* puede refinarse utilizando la resina de adsorción comercial utilizada y puede utilizarse para realizarse refinamientos consecutivos hasta 27 ciclos de refinación.

CONCLUSIONES

1. Es posible refinar biodiesel producido a partir del aceite de *Jatropha Curcas* por medio de resinas de adsorción a una temperatura de 23°C, un caudal de biodiesel de 3,13 ml/s y un volumen de 200 ml de muestra.
2. Las resinas de adsorción son capaces de adsorber los jabones e impurezas existentes adsorbiendo así $2,34 \pm 0,0072$ gramos de impurezas por cada 200ml de biodiesel.
3. Las resinas de adsorción pueden de igual manera hacer un intercambio iónico para neutralizar el biodiesel y obtener un pH del agua extracción de aproximadamente 7,4 sin embargo nunca se alcanza el 6,97 del refino convencional.
4. El índice de refracción del agua de extracción no es parámetro de medición que ayude a monitorear el refino de biodiesel debido a que presenta una mínima sensibilidad entre la variación de sus datos.
5. El número de ciclos de refino que dio mejores resultados en cuanto a adsorción de jabones e impurezas e intercambio de iones hidroxilo fue el número 5.
6. El número máximo de volúmenes de biodiesel que pudo la resina refinar fue de 7.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar el uso de una bomba peristáltica en el sistema para tener un control total en cuanto al caudal del biodiesel a través de la columna empacada.
2. Variar el tiempo de residencia hidráulica del biodiesel en la columna de resinas de adsorción para analizar si en vez del número de ciclos óptimo se puede encontrar el tiempo óptimo para refinar biodiesel.
3. Al momento de activar las resinas de adsorción, dejar de pasar metanol a través de la columna hasta que el metanol salga incoloro en la boquilla final.
4. Nunca dejar cargada la columna con biodiesel semi refinado, ya que al variar demasiado el tiempo de residencia hidráulica crea variaciones en las características a analizar.
5. Crear un procedimiento que al ir drenando biodiesel a través de la columna de resinas de adsorción se elimine la presencia de burbujas de aire lo que desciende la eficiencia del proceso.
6. Luego de realizar la extracción líquido-líquido medir inmediatamente el pH de la alícuota.
7. Asegurarse que los equipos con los que se realizarán los análisis estén debidamente calibrados (balanzas, potenciómetro, refractómetro).

BIBLIOGRAFÍA

1. CALLE, José Luis. *Opciones para el biodiesel en Perú* [en línea] Perú, 2007. Disponible en web <http://www.scribd.com/doc/7196527/ITDGOpcionesParaElBiodieselEnElPeru>. Consulta 7 de enero de 2010
2. CARPI, Anthony; DAY, Martha Marie *Densidad, "Visionlearning"*. 2a ed. 2002 vol. SCI-1 (4s).
3. CHALE, Fabio. *Adsorción [en línea] México* Disponible en web http://www.cnyn.unam.mx/~wencel/Cursos/Fenomenos%20de%20superficies/ADSORCION_Tatiana.pdf. Consulta 6 de enero del 2010.
4. GONZALÉZ, Alberto. *Que es el biodiesel* [en línea] Disponible en web <http://www.buscagro.com/www.buscagro.com/biblioteca/AlbertoGonzalez/Que-es-el-biodiesel.ppt#268,7,Especificaciones> del biodiesel B=100 de Uso Puro. Consulta 3 de enero de 2010.
5. GONZALÉZ FERNÁNDEZ, Rodrigo *Jatropha curcas* [en línea] Chile 2007. Disponible en web. <http://jatrophachile.blogspot.com/2007/05/que-es-la-jatropha.html> Consulta 10 de enero de 2010.

6. HERNÁNDEZ CASTELLANOS, María Gabriela. *Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol -biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mmHg , para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida.* Trabajo de graduación Ing. de Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. 143 p.
7. LINAZA, Diego. *Antecedentes del biodiesel* [en línea] Disponible en web http://www.ecodesarrollo.cl/descargas/Antecedentes_Biodiesel_D.pdf. Consulta 9 de enero de 2010.
8. PERRY, Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. 7a ed. España: McGraw Hill, 2001. 2 p. Volumen III, sección 16-8 a 16-10.40 p. ISBN: 0-07-049841-5.
9. ROHM; HASS. Dow Chemical, Bayer (Lewatit) *Folletos Técnicos de resinas de adsorción*. Purolite, Sybron (Ionac). 2008. 4 p.
10. Tebbot *Principles of waters Quality Control*. 2a ed. Inglaterra: Universidad de Birmingham, 2007. 34. p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos Originales

Tabla I. **Corrida No.1. Refinación de biodiesel por medio de resinas de adsorción**

Muestra	No. Ciclos	Densidad (g/ml)	pH	Ir	Compactación (cm)
M1	1	0,8507	7,85	1,3400	24
M1	2	0,8486	7,63	1,3380	24
M1	3	0,8477	7,51	1,3360	24
M1	4	0,8457	7,34	1,3340	24
M2	1	0,8663	7,91	1,3415	24
M2	2	0,8635	7,86	1,3390	24
M2	3	0,8598	7,68	1,3375	24
M2	4	0,8576	7,50	1,3360	24
M2	5	0,8464	7,38	1,3340	24
M3	1	0,8667	7,87	1,3410	24
M3	2	0,8661	7,73	1,3385	24
M3	3	0,8658	7,65	1,3360	24
M3	4	0,8639	7,52	1,3355	24
M3	5	0,8538	7,46	1,3350	24
M3	6	0,8472	7,40	1,3345	24
M4	1	0,8673	7,89	1,3410	24
M4	2	0,8641	7,78	1,3395	24
M4	3	0,8609	7,70	1,3385	24
M4	4	0,8558	7,59	1,3360	24
M4	5	0,8503	7,50	1,3350	24
M4	6	0,8461	7,38	1,3345	24
M5	1	0,8650	7,88	1,3415	24
M5	2	0,8505	7,74	1,3395	24
M5	3	0,8500	7,65	1,3380	24
M5	4	0,8458	7,53	1,3370	24
M5	5	0,8456	7,45	1,3350	24
M5	6	0,8455	7,40	1,3345	24
M6	1	0,8680	7,90	1,3415	24
M6	2	0,8647	7,81	1,3390	24
M6	3	0,8646	7,74	1,3380	24
M6	4	0,8641	7,62	1,3365	24
M6	5	0,8462	7,49	1,3355	24
M6	6	0,8455	7,41	1,3350	24
M7	1	0,8696	7,92	1,3415	24
M7	2	0,8666	7,83	1,3395	24
M7	3	0,8666	7,76	1,3380	24
M7	4	0,8660	7,65	1,3365	24
M7	5	0,8659	7,58	1,3360	24
M7	6	0,8647	7,51	1,3360	24
M7	7	0,8641	7,44	1,3350	24
M7	8	0,8566	7,44	1,3350	24

Fuente: datos originales, elaboración propia.

Tabla II. **Corrida No.2. Refinación de biodiesel por medio de resinas de adsorción**

Muestra	No. Ciclos	Densidad (g/ml)	pH	Ir	Compactación (cm)
M1	1	0,8662	7,89	1,3400	24
M1	2	0,8446	7,65	1,3385	24
M1	3	0,8465	7,54	1,3360	24
M1	4	0,8433	7,35	1,3340	24
M2	1	0,8663	7,90	1,3415	24
M2	2	0,8650	7,85	1,3395	24
M2	3	0,8600	7,70	1,3375	24
M2	4	0,8543	7,53	1,3355	24
M2	5	0,8470	7,39	1,3340	24
M3	1	0,8665	7,90	1,3410	24
M3	2	0,8655	7,75	1,3390	24
M3	3	0,8606	7,63	1,3375	24
M3	4	0,8604	7,50	1,3360	24
M3	5	0,8548	7,42	1,3355	24
M3	6	0,8477	7,39	1,3345	24
M4	1	0,8667	7,92	1,3410	24
M4	2	0,8644	7,79	1,3390	24
M4	3	0,8618	7,68	1,3380	24
M4	4	0,8550	7,56	1,3370	24
M4	5	0,8509	7,44	1,3355	24
M4	6	0,8465	7,37	1,3345	24
M5	1	0,8675	7,90	1,3415	24
M5	2	0,8653	7,77	1,3410	24
M5	3	0,8598	7,64	1,3385	24
M5	4	0,8578	7,55	1,3370	24
M5	5	0,8540	7,49	1,3355	24
M5	6	0,8431	7,41	1,3345	24
M6	1	0,8683	7,92	1,3415	24
M6	2	0,8647	7,79	1,3395	24
M6	3	0,8645	7,71	1,3380	24
M6	4	0,8643	7,65	1,3365	24
M6	5	0,8499	7,54	1,3360	24
M6	6	0,8469	7,42	1,3350	24
M7	1	0,8690	7,93	1,3415	24
M7	2	0,8658	7,83	1,3410	24
M7	3	0,8655	7,79	1,3385	24
M7	4	0,8652	7,70	1,3375	24
M7	5	0,8656	7,61	1,3365	24
M7	6	0,8646	7,52	1,3360	24
M7	7	0,8639	7,46	1,3350	24
M7	8	0,8568	7,46	1,3350	24

Fuente: datos originales, elaboración propia.

Tabla III. **Corrida No.3. Refinación de biodiesel por medio de resinas de adsorción**

Muestra	No. Ciclos	Densidad (g/ml)	pH	Ir	Compactación (cm)
M1	1	0,8657	7,88	1,3400	24
M1	2	0,8473	7,67	1,3385	24
M1	3	0,8469	7,52	1,3365	24
M1	4	0,8446	7,36	1,3340	24
M2	1	0,8658	7,93	1,3410	24
M2	2	0,8643	7,82	1,3395	24
M2	3	0,8597	7,71	1,3375	24
M2	4	0,8558	7,52	1,3355	24
M2	5	0,8471	7,37	1,3345	24
M3	1	0,8667	7,89	1,3415	24
M3	2	0,8656	7,77	1,3395	24
M3	3	0,8633	7,61	1,3375	24
M3	4	0,8579	7,55	1,3365	24
M3	5	0,8519	7,44	1,3355	24
M3	6	0,8477	7,38	1,3345	24
M4	1	0,8670	7,90	1,3415	24
M4	2	0,8661	7,77	1,3390	24
M4	3	0,8658	7,65	1,3385	24
M4	4	0,8652	7,53	1,3365	24
M4	5	0,8650	7,41	1,3355	24
M4	6	0,8640	7,36	1,3340	24
M5	1	0,8675	7,89	1,3410	24
M5	2	0,8654	7,75	1,3410	24
M5	3	0,8596	7,63	1,3385	24
M5	4	0,8570	7,58	1,3365	24
M5	5	0,8538	7,50	1,3365	24
M5	6	0,8428	7,38	1,3350	24
M6	1	0,8681	7,90	1,3410	24
M6	2	0,8646	7,77	1,3395	24
M6	3	0,8644	7,69	1,3385	24
M6	4	0,8642	7,61	1,3360	24
M6	5	0,8493	7,51	1,3360	24
M6	6	0,8462	7,40	1,3355	24
M7	1	0,8692	7,91	1,3415	24
M7	2	0,8662	7,81	1,3410	24
M7	3	0,8660	7,77	1,3385	24
M7	4	0,8659	7,69	1,3375	24
M7	5	0,8658	7,59	1,3365	24
M7	6	0,8648	7,52	1,3360	24
M7	7	0,8640	7,45	1,3350	24
M7	8	0,8565	7,46	1,3355	24

Fuente: datos originales, elaboración propia.

Tabla IV. **Corrida No.4. Refinación de biodiesel por medio de resinas de adsorción**

Muestra	No. Ciclos	Densidad (g/ml)	pH	Ir	Compactación (cm)
M1	1	0,8650	7,88	1,3400	24
M1	2	0,8475	7,69	1,3384	24
M1	3	0,8472	7,51	1,3365	24
M1	4	0,8444	7,32	1,3345	24
M2	1	0,8656	7,89	1,3420	24
M2	2	0,8665	7,84	1,3390	24
M2	3	0,8663	7,72	1,3380	24
M2	4	0,8630	7,54	1,3365	24
M2	5	0,8625	7,36	1,3340	24
M3	1	0,8663	7,91	1,3415	24
M3	2	0,8660	7,77	1,3390	24
M3	3	0,8639	7,64	1,3370	24
M3	4	0,8625	7,53	1,3360	24
M3	5	0,8585	7,42	1,3350	24
M3	6	0,8560	7,41	1,3340	24
M4	1	0,8670	7,90	1,3420	24
M4	2	0,8668	7,77	1,3395	24
M4	3	0,8660	7,65	1,3380	24
M4	4	0,8654	7,55	1,3375	24
M4	5	0,8648	7,43	1,3365	24
M4	6	0,8642	7,37	1,3340	24
M5	1	0,8673	7,90	1,3425	24
M5	2	0,8650	7,77	1,3410	24
M5	3	0,8591	7,65	1,3390	24
M5	4	0,8573	7,56	1,3375	24
M5	5	0,8535	7,47	1,3360	24
M5	6	0,8437	7,40	1,3355	24
M6	1	0,8678	7,93	1,3400	24
M6	2	0,8645	7,78	1,3390	24
M6	3	0,8641	7,70	1,3380	24
M6	4	0,8639	7,62	1,3365	24
M6	5	0,8599	7,51	1,3360	24
M6	6	0,8467	7,42	1,3350	24
M7	1	0,8689	7,90	1,3410	24
M7	2	0,8657	7,79	1,3405	24
M7	3	0,8658	7,78	1,3390	24
M7	4	0,8655	7,67	1,3385	24
M7	5	0,8653	7,60	1,3370	24
M7	6	0,8644	7,51	1,3360	24
M7	7	0,8643	7,47	1,3355	24
M7	8	0,8565	7,45	1,3350	24

Fuente: datos originales, elaboración propia.

Tabla V. **Corrida No. 5. Refinación de biodiesel por medio de resinas de adsorción**

Muestra	No. Ciclos	Densidad (g/ml)	pH	Ir	Compactación (cm)
M1	1	0,8659	7,87	1,3450	24
M1	2	0,8475	7,77	1,3390	24
M1	3	0,8473	7,50	1,3365	24
M1	4	0,8445	7,31	1,3350	24
M2	1	0,8668	7,98	1,3420	24
M2	2	0,8664	7,81	1,3395	24
M2	3	0,8660	7,70	1,3400	24
M2	4	0,8642	7,62	1,3360	24
M2	5	0,8620	7,31	1,3345	24
M3	1	0,8669	7,91	1,3425	24
M3	2	0,8660	7,78	1,3390	24
M3	3	0,8642	7,62	1,3385	24
M3	4	0,8638	7,56	1,3370	24
M3	5	0,8578	7,48	1,3350	24
M3	6	0,8550	7,36	1,3335	24
M4	1	0,8672	7,92	1,3430	24
M4	2	0,8665	7,80	1,3395	24
M4	3	0,8655	7,68	1,3380	24
M4	4	0,8650	7,50	1,3370	24
M4	5	0,8649	7,39	1,3365	24
M4	6	0,8639	7,33	1,3335	24
M5	1	0,8677	7,88	1,3420	24
M5	2	0,8651	7,79	1,3405	24
M5	3	0,8590	7,60	1,3390	24
M5	4	0,8582	7,55	1,3375	24
M5	5	0,8533	7,51	1,3360	24
M5	6	0,8422	7,40	1,3345	24
M6	1	0,8682	7,91	1,3420	24
M6	2	0,8656	7,81	1,3390	24
M6	3	0,8642	7,71	1,3380	24
M6	4	0,8640	7,63	1,3375	24
M6	5	0,8490	7,60	1,3370	24
M6	6	0,8460	7,42	1,3350	24
M7	1	0,8690	7,92	1,3450	24
M7	2	0,8660	7,83	1,3420	24
M7	3	0,8657	7,78	1,3390	24
M7	4	0,8655	7,71	1,3380	24
M7	5	0,8653	7,60	1,3365	24
M7	6	0,8647	7,54	1,3365	24
M7	7	0,8641	7,46	1,3340	24
M7	8	0,8575	7,32	1,3330	24

Fuente: datos originales, elaboración propia.

Apéndice 2. Datos Calculados

Tabla VI. Promedio de Parámetros de refinación de biodiesel en el proceso de refinación

Muestra	No. Ciclos	Promedio Densidad (g/ml)	Promedio pH	Promedio IR
Muestra 1	1	0,8786	8,13	1,3425
Muestra 1	1	0,8627	7,874	1,341
Muestra 1	2	0,8471	7,682	1,33848
Muestra 1	3	0,84712	7,516	1,3363
Muestra 1	4	0,8445	7,336	1,3343
Muestra 2	5	0,8786	8,13	1,3425
Muestra 2	5	0,86616	7,922	1,3416
Muestra 2	6	0,86514	7,836	1,3393
Muestra 2	7	0,86236	7,702	1,3381
Muestra 2	8	0,85898	7,542	1,3359
Muestra 2	9	0,853	7,362	1,3342
Muestra 3	10	0,8786	8,13	1,3425
Muestra 3	10	0,86662	7,896	1,3415
Muestra 3	11	0,86584	7,76	1,339
Muestra 3	12	0,86356	7,63	1,3373
Muestra 3	13	0,8617	7,532	1,3362
Muestra 3	14	0,85536	7,444	1,3352
Muestra 3	15	0,850726	7,388	1,3342
Muestra 4	16	0,8786	8,13	1,3425
Muestra 4	16	0,86704	7,906	1,3417
Muestra 4	17	0,86558	7,782	1,3393
Muestra 4	18	0,864	7,672	1,3382
Muestra 4	19	0,86128	7,546	1,3368
Muestra 4	20	0,85918	7,434	1,3358
Muestra 4	21	0,85694	7,362	1,3341
Muestra 5	22	0,8786	8,13	1,3425
Muestra 5	22	0,867	7,89	1,3417
Muestra 5	23	0,86226	7,764	1,3406
Muestra 5	24	0,8575	7,634	1,3386
Muestra 5	25	0,85522	7,554	1,3371
Muestra 5	26	0,85204	7,484	1,3358
Muestra 5	27	0,84346	7,398	1,3348
Muestra 6	28	0,8786	8,13	1,3425
Muestra 6	28	0,86808	7,912	1,3412
Muestra 6	29	0,86482	7,792	1,3392
Muestra 6	30	0,86436	7,71	1,3381
Muestra 6	31	0,8641	7,626	1,3366
Muestra 6	32	0,85086	7,53	1,3361
Muestra 6	33	0,84626	7,414	1,3351
Muestra 7	34	0,8786	8,13	1,3425
Muestra 7	34	0,86914	7,916	1,3421
Muestra 7	35	0,86606	7,818	1,3408
Muestra 7	36	0,86592	7,776	1,3386
Muestra 7	37	0,86562	7,684	1,3376
Muestra 7	38	0,86558	7,596	1,3365
Muestra 7	39	0,86464	7,52	1,3361
Muestra 7	40	0,86408	7,456	1,3349
Muestra 7	41	0,85678	7,426	1,3347

Fuente: datos originales, elaboración propia.

Apéndice 3. Muestra de cálculo

Cálculo de los gramos adsorbidos por el lecho de resinas en cada muestra refinada

$$g = (\rho_{nominal} - \rho_{final\ promedio}) * V_{muestra} \quad \text{(EC.1)}$$

Ejemplo: calcular los gramos adsorbidos en el lecho de resina si la densidad nominal es de 0,8667(g/ml) y la densidad final promedio es de 0,855 (g/ml). El volumen de la muestra es de 200ml.

$$g = [0,8667 (g/ml) - 0,855(g/ml)] * 200ml$$

$$g = 2,34g$$

Cálculo de la cantidad de milimoles OH⁻ intercambiados en el lecho de resina en la muestra refinada.

$$OH^- = 10^{-pH\ inicial} - 10^{-pH\ final} \quad \text{(Ec.2)}$$

Ejemplo: calcular la cantidad de milimoles intercambiados en el lecho de resina si el pH promedio inicial es de 7,9 y el pH promedio final es de 7,4

$$OH^- = 10^{-7,9} - 10^{-7,4}$$

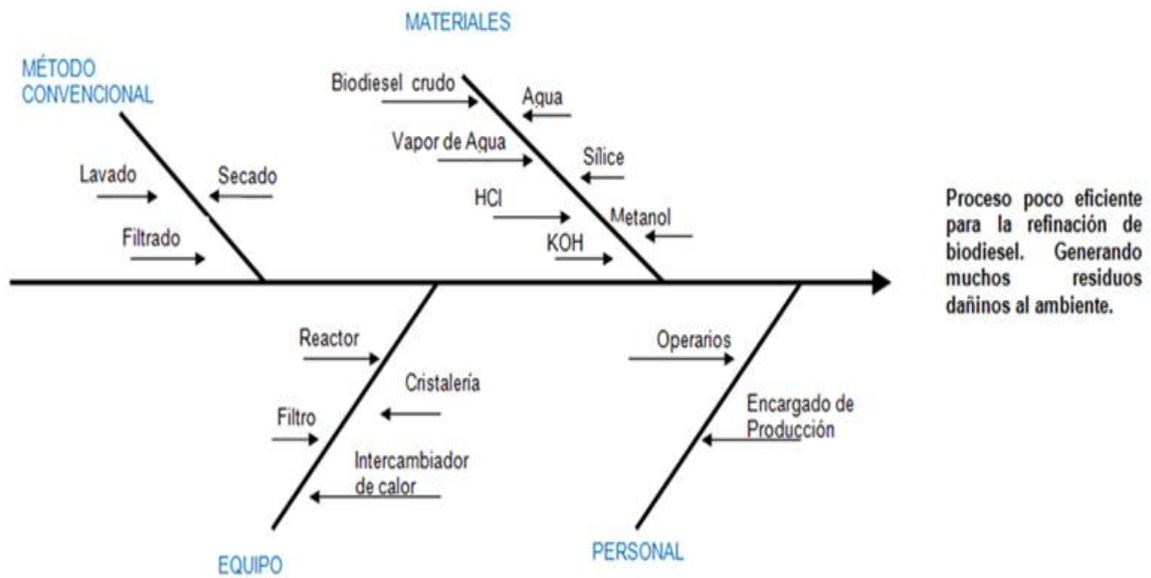
$$OH^- = 2,72E-0,8$$

Apéndice 4. Requisitos Académicos

1 paso	2 paso	3 paso	4 paso	5 paso	6 paso	7 paso		
Carrera	Área	Tema genérico	Tema específico	Especificación	Problema a resolver	Temario tentativo		
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA	QUÍMICA	Química 3 y 4	Soluciones y disoluciones	Concentración de una solución	EVALUACIÓN DEL USO DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO EN EL PROCESO DE REFINACIÓN DE BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DEL ACEITE DE JATROPHA CURCAS -A NIVEL DE LABORATORIO	1. Parámetros establecidos del biodiesel		
			Propiedades intensivas y extensivas	Densidad				
		Análisis Cuantitativo	Métodos analíticos	Volumetría de neutralización			2. Número ácido determinado a partir de una titulación del agua de extracción	
		Laboratorio de fisicoquímica	Análisis de propiedades EQ	Índice de Refracción			3. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del biodiesel	
		OPERACIONES UNITARIAS	Transferencia de masa	Contacto sólido-líquido			adsorción, intercambio iónico	4. Refinación de biodiesel por medio de resinas de intercambio iónico
				Manejo de sólidos			Tamizado	
	CIENCIAS BÁSICAS	Estadística	Análisis de datos	Kruskal-Wallis		5. Análisis estadístico de un conjunto de datos		
			Pruebas de hipótesis	Aceptación o rechazo de hipótesis		6. Interpretación de datos		

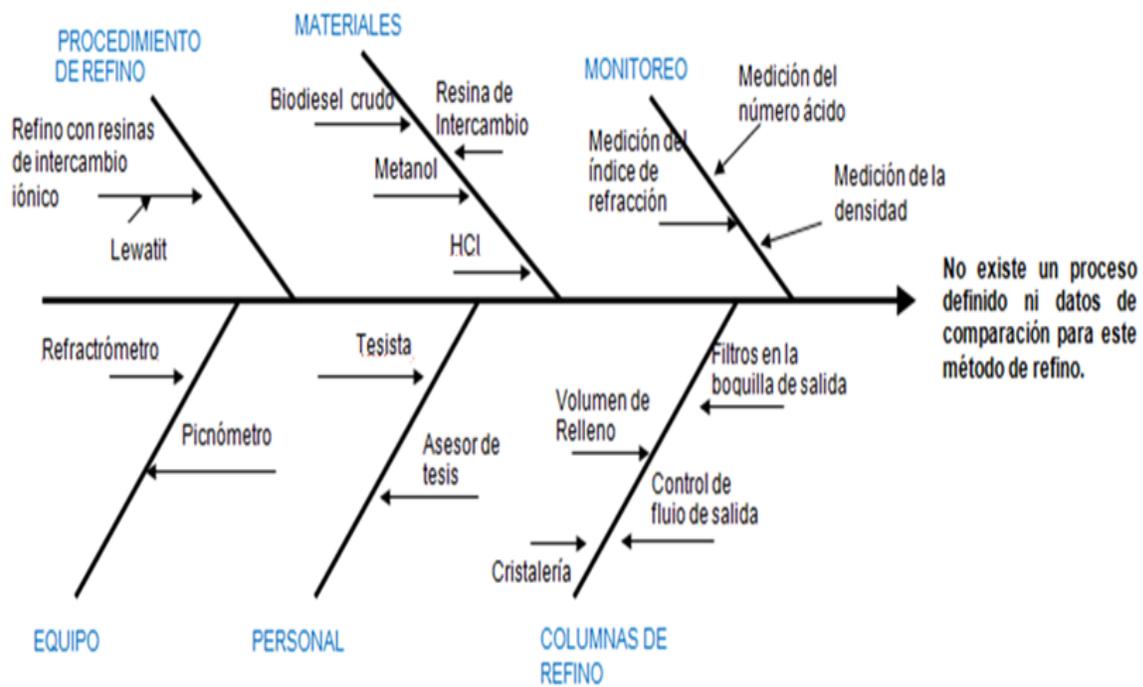
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Refinación de biodiesel mediante el método convencional utilizado por los productores de biodiesel**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Técnica de refinación del biodiesel por medio de una resina de adsorción**



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo I. Ficha de seguridad del Metanol

Tabla VIII. Identificación de la sustancia

Sinónimos	Alcohol metílico Hidrato de metilo Hidróxido de metilo
Uso de la sustancia	Solvente Combustible
Aspecto	Líquido incoloro
Olor	débil de alcohol

Fuente: www.methanex.com/products/documents/MSDS_EUespanol.pdf

Tabla IX. Información reglamentaria

R11	Fácilmente inflamable
R23/24/25	Tóxico por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel
R39/23/24/25	Tóxico: peligro de efectos irreversibles muy graves por inhalación, contacto con la piel e ingestión
S(01/02)	(Consérvese bajo llave y manténgase fuera del alcance de los niños)
S07	Mantener el recipiente bien cerrado
S16	Manténgase alejado de cualquier fuente de ignición - No fumar
S36/37	Úsese indumentaria y guantes de protección adecuados
S45	En caso de accidente o malestar, acuda inmediatamente al médico

Fuente: www.methanex.com/products/documents/MSDS_EUespanol.pdf

Tabla X. **Propiedades físicas y químicas**

Punto intervalo de ebullición	64.5°C
Punto de inflamación	11 °C (TCC)
Límites de explosión	6 - 36 Vol%
Densidad relativa a 20°C	0,792
Hidrosolubilidad	Completa
Soluble en	Etanol, éter, acetona, cloroformo
Punto de fusión	-97,8 °C
Concentración de saturación	166 g/m ³

Fuente: www.methanex.com/products/documents/MSDS_EUespanol.pdf

Tabla XI. **Información toxicológica**

Vías de exposición	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ingestión ▪ Inhalación ▪ Contacto ocular ▪ Contacto cutáneo
Efectos agudos/síntomas:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efectos tras dosis bajas: náusea, cefaleas, dolores abdominales, vómito y perturbaciones visuales (visión borrosa hasta sensibilidad a la luz) ▪ Inhalación de concentraciones elevadas: irritación de las mucosas, cefaleas, somnolencia, náusea, confusión, pérdida del conocimiento, trastornos gastrointestinales y de la visión, muerte ▪ Alta concentración de vapor/contacto con líquido: irritación ocular, lacrimación y sensación de ardor ▪ Puede ser absorbido por la piel en concentraciones

	tóxicas o letales
Efectos crónicos:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exposición repetida por inhalación y absorción: envenenamiento sistémico, trastornos cerebrales, visión disminuída y ceguera. ▪ Inhalación del producto puede agravar condiciones pre-existentes tales como enfisema y bronquitis ▪ Contacto repetido con la piel puede causar irritación, sequedad y grietas
Efectos en la reproducción	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Probable riesgo para el feto

Fuente: www.methanex.com/products/documents/MSDS_EUespanol.pdf

Tabla XII. **Consideraciones sobre la eliminación**

Métodos de eliminación	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La incineración es el método de eliminación recomendado ▪ Los residuos de metanol no son apropiados para la inyección en el subsuelo ▪ Disponer de los residuos de acuerdo con las reglamentaciones nacionales, regionales o locales
------------------------	--

Fuente: www.methanex.com/products/documents/MSDS_EUespanol.pdf

Anexo II. **Ficha de seguridad resina de adsorción (LEWATIT GF 202[®])**

Tabla XIII. **Descripción General**

Ionic form as shipped	Neutra
Grupo Funcional	Ácido
Estructura	Macroporo
Apariencia	Opaca

Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

Tabla XIV. **Propiedades Físicas y Químicas**

Capacidad de adsorción de glicerina con relación 1-2 BV/h	250 g/L
Coeficiente de uniformidad	1,1
Densidad aparente	740 g/L
Densidad	1,24 g/ml
Tiempo de almacenaje	2 años (máximo)
Rangos de temperatura de almacenaje	-20°C a 40°C

Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

Tabla XV. **Condiciones de operación recomendadas**

Temperatura de operación	40°C máx.
Velocidad lineal de flujo	2 m/h (máx.)
Tasa específica de flujo	2 BVH/h (máx.)
Espacio libre para retrolavado	20% Vol.
Reactivo para regeneración	Metanol
Nivel de regeneración	10 l/l aprox.
Velocidad lineal de regeneración	2 m/h aprox.

Fuente: Guía de laboratorio Lanxess, energizing Chemistry, 2008.

Anexo III. **Procedimiento experimental**

Ajuste de la columna de adsorción a las condiciones especificadas

- a) Material de la columna, vidrio
- b) Altura no menor de 75 cm
- c) Diámetro interno de la columna 2.5cm
- d) La temperatura de operación no debe ser mayor de 40°C
- e) Entrada de flujo de biodiesel de arriba hacia abajo de la columna
- g) En la parte inferior de la columna antes de donde se encuentra la válvula de salida del fluido se encuentra una trampa, que funciona como filtro para evitar la salida de las resinas

Figura1. Columna utilizada en la fase experimental del proceso de refinado de biodiesel por medio de resinas de adsorción



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

Figura 2. Boquilla de salida de flujo de biodiesel con sus respectivos orins.

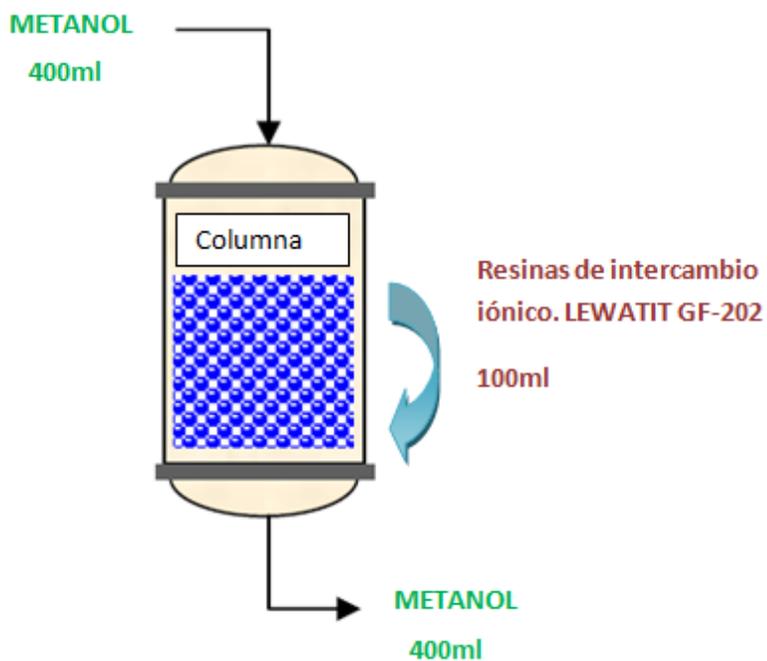


Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

Anexo IV. **Pre acondicionamiento de las resinas**

- a) Agregar resinas a la columna según la relación 2:1 (biodiesel / resina) en proporción de volumen. (Pueden ser 100 ml de resina)
- b) Circular a través de la columna 4 veces el volumen de resinas de metanol (400ml de metanol) a un flujo de 17ml/min
- c) Alternar después del acondicionamiento únicamente biodiesel y metanol a través de la columna ya sea para refinación de biodiesel o bien para la regeneración de las resinas

Figura 3. **Pre acondicionamiento de las resinas de adsorción**

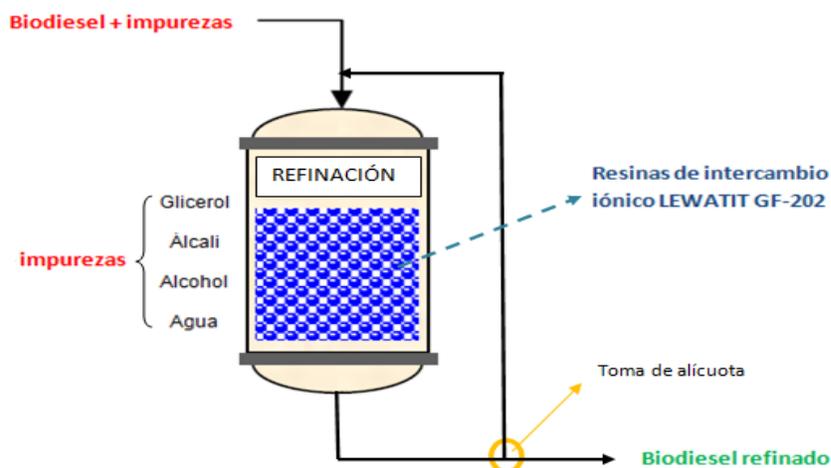


Fuente: elaboración propia.

Anexo V. Refinación de biodiesel

- a) Añadir el volumen de biodiesel requerido según la relación biodiesel/resina estipulada (para este caso 200ml).
- b) Regular el flujo de biodiesel a través de la columna a 3.13ml/s.
- c) Tomar una alícuota de biodiesel y esperar.
- d) Medir los parámetros establecidos para monitorear el refino del biodiesel. (Índice de refracción, densidad, pH).
- e) Trazar las curvas de rompimiento para cada parámetro, índice de refracción vrs # ciclo, densidad vrs. # ciclo, y pH vrs. # ciclo,

Figura 4. Refinación de biodiesel por medio de resinas de adsorción



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. **Columna de refino de biodiesel de la parte experimental (se realizaron 2 corridas a la vez)**



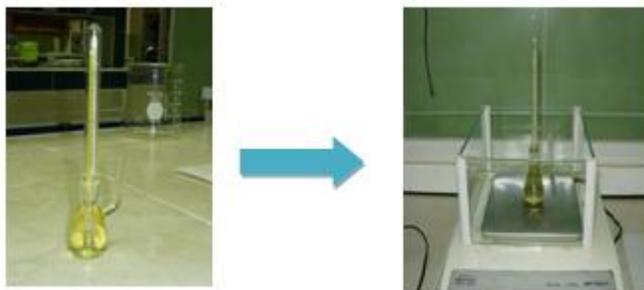
Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

Anexo VI. **Método para la elaboración para las curvas de rompimiento**

Determinación de densidad

La densidad se determinará aplicando el método experimental de picnometría según norma ASTM D-45.

Figura 6. **Medición de densidad del biodiesel en cada ciclo de refino**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

Determinación del Índice de refracción

Para medir el índice de refracción se utilizará un refractómetro Abbe modelo 32200, por medio del siguiente procedimiento:

- a) Ajustar la escala del refractómetro.
- b) Comprobar que el prisma este limpio. Utilizar una pipeta para aplicar su muestra líquida al prisma. Tener cuidado de no tocar el prisma con el extremo de la pipeta, esto puede rasguñar el cristal suave del prisma.

- c) Colocar de 2 a 3 gotas de solución en el centro de la superficie del prisma.
- d) Cerrar cuidadosamente el prisma secundario.
- e) Encender la lámpara usando el interruptor en el lado izquierdo. Ajustar la lámpara para asegurar el brillo adecuado en el prisma de medición.
- f) Observar por el ocular, girar la perilla de compensación de color hasta que aparezca una línea clara y definida en el campo de visión.
- g) Girar la perilla de medición alineando la línea delimitadora con las líneas de intersección (ajuste claro y oscuro al centro)
- h) Mover la palanca de la parte inferior izquierda y leer en la escala superior el índice de refracción y repetir la operación en función del número de muestras a usar.
- i) Registrar el índice de refracción. Después leer el termómetro y registrar la temperatura.
- j) Después de terminar, limpiar el refractómetro.

Figura 7. Refractómetro utilizado en la etapa experimental del trabajo de graduación

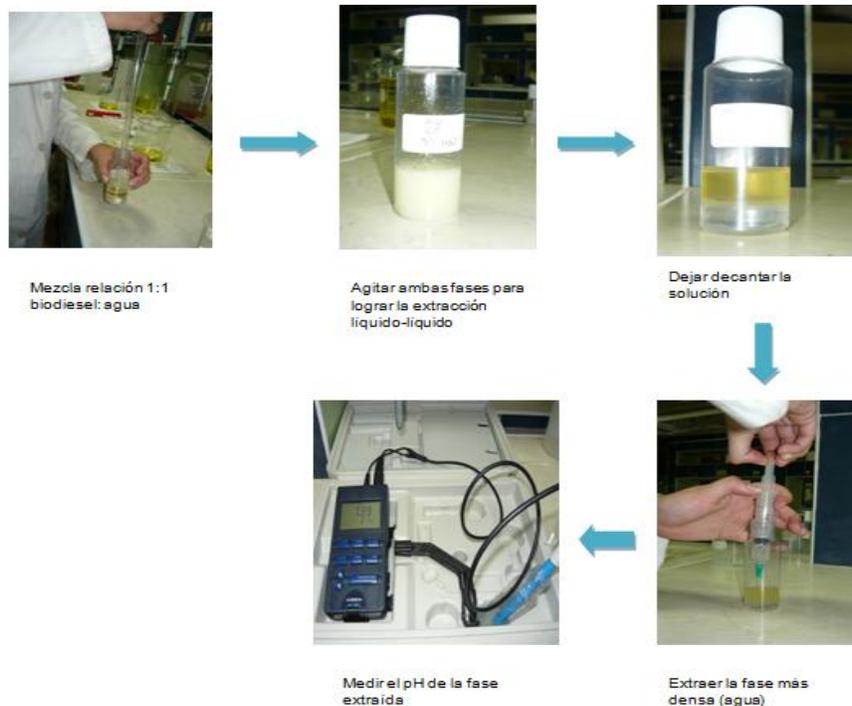


Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.

Determinación del pH

- a) Tomar una muestra de 5ml de biodiesel, agregar 5ml de agua desmineralizada (relación 1:1) con la ayuda de una jeringa desechable.
- b) Agitar la mezcla por un par de segundos
- c) Decantar la fase inferior y colocarla en un earlenmeyer
- d) Medir con la ayuda de un potenciómetro el pH hasta que el valor sea constante

Figura 8. **Procedimiento para la medición de pH de cada muestra refinada**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de industria productora de biodiesel.