



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

**ELABORACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE BIODIESEL  
A PARTIR DE ACEITE DE PALMA USADO (*Elaeis guineensis*)  
MEDIANTE DOS PROCESOS, A NIVEL DE PLANTA PILOTO**

**Herbert Roberto Romero Erazo**  
**Asesorado por Ing. Q. José Eduardo Calderón García**

**Guatemala, agosto de 2005**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELABORACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE BIODIESEL  
A PARTIR DE ACEITE DE PALMA USADO (*Elaeis guineensis*)  
MEDIANTE DOS PROCESOS, A NIVEL DE PLANTA PILOTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HERBERT ROBERTO ROMERO ERAZO**  
ASESORADO POR ING. JOSÉ EDUARDO CALDERÓN GARCÍA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2005



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. José Eduardo Calderón García
EXAMINADOR	Ing. Federico Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Dr. Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **ELABORACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE PALMA USADO (*Elaeis guineensis*) MEDIANTE DOS PROCESOS, A NIVEL DE PLANTA PILOTO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de enero de 2005.

**Herbert Roberto Romero Erazo**





## **DEDICATORIA**

**A:**

**DIOS**

**MIS PADRES**

Gustavo Romero González y Beatriz Noemí Erazo de Romero, por su amor, esfuerzo y dedicación. Sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

**MI FAMILIA**

Por creer en mí.

**CANDU MANRIQUE**

Por su gran apoyo y esmero.

**MIS AMIGOS**

Juan Carlos, Aldo, Paty, Estuardo, Milton, Gustavo, Miguel, Jorge y todos los de LB por su ayuda y amistad.



## **AGRADECIMIENTOS**

**A:**

**Ing. José Eduardo Calderón García**

Por su asesoría y atención durante la realización del presente trabajo

**Ing. René Meléndez**

Por su valioso aporte para la realización de este trabajo

**Los Asistentes de Investigación**

José Estuardo Herrera, Gustavo Hidalgo, Hector Escobar, Mariana Flores, Dario Barraza y Gerardo Robles por su gran ayuda

**Ing. Julio Villacinda**

Por su colaboración e interpretación de resultados en el laboratorio del Ministerio de Energía y Minas

**Ing. Arturo Estrada y al Ing. Jorge Quinteros**

Por la autorización y ayuda para la realización de las pruebas del biocombustible



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
OBJETIVOS	XI
HIPÓTESIS DE TRABAJO	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Combustibles .....	3
2.1.1 Petróleo .....	4
2.1.1.1 Proceso del petróleo.....	4
2.1.1.2 Derivados del petróleo.....	5
2.1.1.2.1 Diesel .....	6
2.1.2 El petróleo y sus derivados en Guatemala .....	7
2.1.2.1 Producción y consumo .....	7
2.1.2.2 Importación.....	8
2.2 Aceites y Grasas.....	8
2.2.1 Composición química de los aceites y grasas .....	8
2.2.1.1 Ácidos grasos .....	8
2.2.2 Propiedades de los aceites y grasas .....	9
2.2.3 Fuentes de obtención y usos .....	10
2.2.3.1 Grasas animales.....	10
2.2.3.2 Aceites vegetales .....	11
2.2.3.2.1 Aceites esenciales.....	11
2.2.3.2.2 Aceites fijos .....	11
2.2.4 Reacciones de los aceites y grasas.....	12

2.2.5	Aceite de palma africana .....	13
2.3	Biocombustibles .....	15
2.3.1	Obtención de biocombustibles .....	16
2.3.2	Biodiesel.....	16
2.3.2.1	Transesterificación .....	17
2.3.2.2	Esterificación.....	17
2.3.3	Especificaciones de calidad del biodiesel .....	18
3.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	21
3.1	Localización.....	21
3.2	Recursos humanos.....	21
3.3	Recursos materiales.....	22
3.4	Equipo y cristalería .....	22
3.5	Metodología experimental .....	23
3.6	Descripción del método .....	23
3.6.1	Transesterificación directa del aceite .....	23
3.6.2	Esterificación de los ácidos grasos y transesterificación del aceite .....	24
4.	RESULTADOS .....	25
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	29
	CONCLUSIONES .....	33
	RECOMENDACIONES .....	35
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37
	BIBLIOGRAFÍA .....	39
	APÉNDICE .....	41

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Formas Intercambiables de Energía	3
2	Ilustración del proceso de refinamiento del crudo y proceso de remoción de azufre a la fracción diesel	5
3	Reacciones del aceite utilizado como medio de calentamiento para frituras	13
4	Palma Africana ( <i>elaeis guineensis</i> ) con su fruto en vaina y suelto	14
5	Reacción de transesterificación	17
6	Reacción de esterificación de Fischer	18
7	Absorción en el Infrarrojo (IR) de fase liviana destilada	26
8	Absorción en el Infrarrojo (IR) de fase pesada destilada	26
9	Absorción en el Infrarrojo (IR) de fase pesada	27
10	Esquema del equipo de la planta piloto de extracción-destilación	44

### TABLAS

I	Galones de derivado de petróleo basadas en la producción promedio de una refinería de EEUU en 2002.	6
II	Algunos ácidos grasos comunes en forma aniónica	9
III	Composición porcentual de los ácidos grasos mas abundantes en el aceite de palma	14
IV	Algunos parámetros para Biodiesel (B100) según norma ASTM D-6751	19

V	Obtención y rendimiento de biodiesel mediante transesterificación de 100 mL de aceite de palma usado a nivel laboratorio	25
VI	Obtención y rendimiento de biodiesel mediante transesterificación de 5.4 L de aceite de palma usado a nivel de planta piloto	25
VII	Propiedades y características del biodiesel obtenido mediante transesterificación a nivel de planta piloto	27
VIII	Resultados de análisis de biodiesel, obtenido mediante transesterificación a nivel planta piloto, según especificaciones de calidad de aceite combustible diesel No. 2-D (Automotriz)	28
IX	RPM y potencia de un motor diesel de un pistón con mezclas de biodiesel y diesel comercial	28
X	Volumen de fases luego de destilación de fase liviana por lote a nivel de planta piloto	41
XI	RPM para torque fijo en pruebas de biodiesel por mezcla	41
XII	RPM promedio y potencia de un motor diesel de un pistón con mezclas de biodiesel y diesel comercial	43



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
M1	Método de transesterificación
M2	Método de esterificación
PP	Planta Piloto
d	distancia
F	Fuerza
T	Torque
P	Potencia
R	Rendimiento
%	Porcentaje



## GLOSARIO

<b>Aceite Fijo</b>	Mezcla de triglicéridos que se hallan acumulados en los tejidos de plantas oleaginosas; son insolubles en agua, no volátiles y a temperatura ambiente son líquidos.
<b>Ácidos grasos</b>	Ácidos monocarboxílicos de la fórmula general R-COOH, en donde R representa una cadena de hidrocarburo generalmente lineal, no ramificada, de 12 a 24 átomos de carbono y que componen a los triglicéridos.
<b>Biodiesel</b>	Mezcla de ésteres cuyas propiedades son muy similares a las del aceite combustible diesel, formada a partir de los ácidos grasos de los triglicéridos que componen a los aceites y grasas.
<b>Combustible</b>	Sustancia carburante, cuya energía química, liberada en la reacción de combustión, busca aprovecharse.
<b>Combustión</b>	Reacción química entre compuestos carburantes y oxígeno que mediante una fuente de ignición genera dióxido de carbono y agua junto con la liberación de la energía química del combustible
<b>Diesel</b>	Una fracción muy importante del procesamiento del petróleo compuesta por una mezcla líquida de hidrocarburos pesados de cadenas largas (como C <sub>14</sub> H <sub>30</sub> ) y compuestos nafténicos, de apariencia aceitosa y color amarillo.

<b>Ésteres</b>	Compuestos químicos derivados de los ácidos carboxílicos que se caracterizan por tener el grupo acilo unido a otra molécula mediante un átomo de oxígeno
<b>Esterificación</b>	Reacción mediante la cual los ácidos carboxílicos se convierten en ésteres con la adición de catalizadores ácidos.
<b>Glicerina</b>	Alcohol de tres átomos de carbono saturados, en el que cada uno de ellos tiene unido un grupo hidroxilo.
<b>Petróleo</b>	Líquido bituminoso espeso formado por muchos compuestos orgánicos en los que predominan cadenas de carbono e hidrógeno que se encuentra debajo de la superficie de la tierra y es utilizado como combustible y como materia prima en la industria química.
<b>Transesterificación</b>	Reacción en la que los triglicéridos se convierten en ésteres y glicerina con la utilización de catalizadores alcalinos.
<b>Yacimiento</b>	Lugar en el que se halla encerrado el petróleo debajo de la corteza terrestre y del cual se extrae dicha sustancia.

## RESUMEN

Se llevaron a cabo las reacciones de transesterificación y esterificación de Fischer a nivel laboratorio y a nivel de planta piloto para obtener biodiesel a partir de aceite de palma africana (*elaeis guineensis*) usado en la industria de alimentos. Se trabajó a nivel laboratorio para determinar la factibilidad de poder llevar a cabo las reacciones sin necesidad de calentar.

El avance de la reacción se determinó por observación y la verificación, mediante análisis de absorción de Infrarrojo para determinar grupos funcionales en las muestras. Se midieron las propiedades fisicoquímicas, como: la densidad e índice de refracción y se hicieron análisis para determinar la calidad de las muestras como combustible. También, se hicieron pruebas de funcionamiento en un motor diesel de 1 pistón ubicado en las instalaciones de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se obtuvieron resultados sin calentamiento, solamente con la reacción de transesterificación. A partir de 5.4 litros de aceite usado y pretratado, se obtuvo un promedio de 3.72 litros de biodiesel con un calor de combustión de 39.8 MJ/kg. El biodiesel obtenido, en mezclas de hasta 20%, funciona y las emanaciones son menos irritantes que las del aceite combustible diesel automotriz.



## OBJETIVOS

- **General**

Obtener biodiesel a partir de aceite de palma usado en la industria alimenticia mediante transesterificación, utilizando catalizadores ácidos y básicos a nivel de planta piloto.

- **Específicos**

1. Evaluar las características del biodiesel obtenido con los dos métodos.
2. Comparar los biocombustibles obtenidos con el diesel comercial, combustible fósil.
3. Establecer las variables de proceso en los dos métodos para la producción de biodiesel.
4. Determinar el rendimiento de una mezcla de biodiesel al 20% en un motor de un pistón de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.





## **HIPÓTESIS DE TRABAJO**

Se puede obtener biodiesel a partir de aceite de palma usado, tanto por transesterificación como por esterificación, sin necesidad de aplicar calor al llevar a cabo la reacción, a nivel laboratorio o a nivel de planta piloto.



## INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son una alternativa energética que ha venido tomando auge en los últimos años debido al incremento en el precio del petróleo y, también, por la certeza de que, eventualmente, se agotará. Los biocombustibles no poseen esta desventaja porque provienen de fuentes renovables, como plantas o productos de éstas. Si se transforma de manera adecuada, la biomasa puede producir biocombustibles que se pueden implementar a los sistemas actuales.

El desarrollo de la industria de biocombustibles tiene un gran potencial. Guatemala cuenta con tierras de vocación agrícola y climas apropiados para cultivos energéticos, es decir, para la generación de biocombustibles, cortando, significativamente, la dependencia del petróleo en el país y dando empleo a muchas personas en diferentes sectores.

El diesel es uno de los derivados del petróleo de mayor uso en el mundo y el biodiesel, aceite combustible muy similar a éste, puede utilizarse en los motores diesel actuales en mezclas o sustituirlo por completo con ligeras modificaciones. En su mayoría, se produce a partir de aceites vegetales como el aceite de palma africana, planta que requiere condiciones como las de nuestro país y que en 5 años empieza a producir fruto para la obtención de aceite.

Esta investigación es sólo una aproximación a la búsqueda de combustibles más limpios y menos dañinos al medio ambiente. Por ello, se realizaron pruebas de factibilidad de obtención de biodiesel con aceite de palma usado.

El concepto ecológico de la investigación se halla también en la selección del alcohol para llevar a cabo la reacción. La mayoría de referencias hacen mención de mayores conversiones de biodiesel al utilizar metanol, pero éste se obtiene en gran parte a partir del petróleo. El etanol, en cambio, se puede obtener por fermentación de biomasa celulósica y se le conoce como bioetanol.

## 1. ANTECEDENTES

Actualmente, la elaboración de biodiesel se lleva a cabo en países como Brasil, Estados Unidos y Argentina, pero es un tema de estudio e investigación alrededor del mundo. En Guatemala, el tema se empieza a desarrollar con proyectos de tesis, estudios de investigación y proyectos financiados por el gobierno a diferentes instituciones.

En el presente año Jorge Antonio Quintero Jordán realizó la investigación de tesis titulada: “Biodiesel de higuierillo (*Ricinos communis L.*) como combustible en un motor diesel”. El biodiesel, fabricado de manera artesanal en Antigua Guatemala, Guatemala y proporcionado por la Dirección General de Energía, se probó en mezclas de hasta 35%, en un motor diesel de un pistón ubicado en el Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos. Dicha investigación no trata en absoluto acerca de la obtención del biodiesel, sino de su utilización como combustible, pero sus resultados concluyen que las mezclas hacen funcionar bien al motor aunque con una leve disminución de la potencia del mismo.

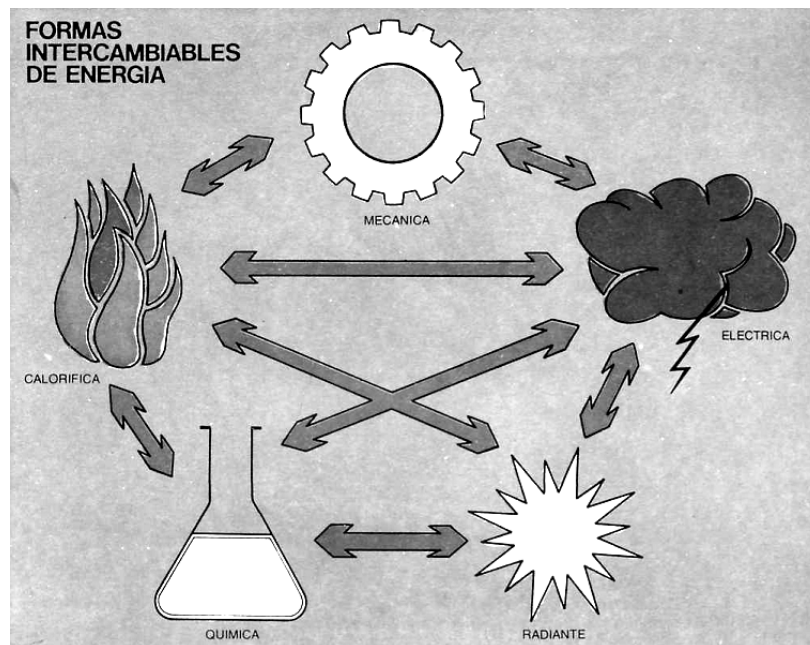


## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Combustibles

Los combustibles son sustancias carburantes, cuya energía química, liberada en la reacción de combustión, busca aprovecharse. Para que la reacción se pueda llevar a cabo se requiere la presencia del combustible, oxígeno y de una fuente de ignición (llama, chispa o calor). Los productos de la reacción completa son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), con la liberación de energía (1). La importancia de los combustibles es que su energía química se puede convertir en energía calorífica, eléctrica o mecánica con el equipo adecuado.

**Figura 1** Formas Intercambiables de Energía



Fuente: El mundo de la Física, tomo 1. Pág. 58.

La utilización de un combustible parte de un requerimiento energético, de una necesidad y para suplirla no solo se busca cualquier combustible sino el que mejor se adapte, que no tenga problemas de disponibilidad y que cuya utilización no sea un problema en el futuro.

El hombre en sus inicios utilizaba leña para generar calor en su hogar. Con la invención de máquinas para la realización de muchos trabajos se requirió mayor energía, que condujo a la utilización del carbón mineral y posteriormente del petróleo. En la actualidad, el petróleo y sus derivados son utilizados alrededor del mundo en una gran diversidad de procesos que van desde encender una estufa de cocina hasta la generación de vapor en plantas industriales.

### **2.1.1 Petróleo**

El petróleo es un líquido bituminoso espeso formado por muchos compuestos orgánicos en los que predominan cadenas de carbono e hidrógeno. Este se encuentra debajo de la superficie de la tierra y es utilizado como combustible y como materia prima en la industria química (2).

Su industrialización se maneja en dos partes completamente diferenciadas que son Upstream y Downstream. En el upstream se maneja todo lo relativo a la exploración de yacimientos petroleros y su explotación, es decir, la extracción del petróleo de los yacimientos. El downstream se encarga de todos los procesos de refinamiento del petróleo y su comercialización.

#### **2.1.1.1 Proceso del petróleo**

El proceso del petróleo, luego de hallado, extraído de los pozos petroleros y transportado a la refinería, es un tratamiento de separación y posterior refinamiento de cada una de las fracciones que lo componen.



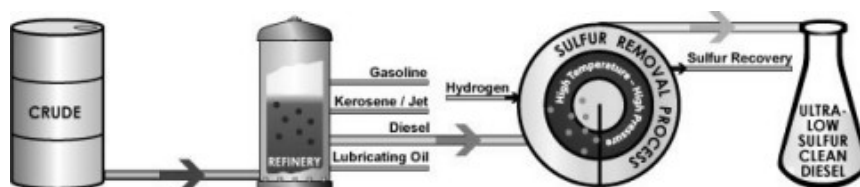
La separación de los componentes del crudo se lleva a cabo en una unidad de destilación, en la que se aprovecha la diferencia de volatilidad de los componentes. El crudo pretratado (calentado y desalado) se ingresa a una columna de destilación en la que es calentado al vacío para llevar a cabo la separación. Cada una de las fracciones del crudo se recuperan y se condensan para su posterior tratamiento.

### 2.1.1.2 Derivados del petróleo

Los derivados del petróleo, expuestos en orden de volatilidad, son el gas licuado de petróleo (GLP), nafta o gasolina, kerosene, diesel y crudo reducido. Otros derivados son las ceras, grasas, lubricantes y asfaltos, que se obtienen del posterior tratamiento de las fracciones del crudo.

Separadas cada una de las fracciones, la nafta, el kerosene y el diesel se someten a unidades hidrotratadoras para remover azufre, nitrógeno, oxígeno y otros contaminantes.

**Figura 2** Ilustración del proceso de refinamiento del crudo y proceso de remoción de azufre a la fracción diesel



Fuente: <http://www.dieselforum.org/factsheet/cleandiesel.html>

La proporción en la que se obtienen los derivados a partir de un barril de crudo depende de su procedencia. Esto se debe a que la composición del petróleo depende del tipo de materia orgánica del que se formó y de la ubicación y condiciones del yacimiento.

En la tabla I se presentan los galones de derivados obtenidos de un barril promedio producido en una refinería estadounidense en el 2002.

**Tabla I** Litros de derivado de petróleo basadas en la producción promedio de una refinería de EEUU en 2002.

<b>Derivado</b>	<b>Litros por Barril</b>
Gasolina	73.3
Diesel	36.7
Jet Fuel	16.2
Carbón Residual de petróleo (coke)	7.6
Fuel Oil	7.2
Gas licuado y de refinación	14
Asfaltos	5.3
Materia prima petroquímica	4.2
Lubricantes	1.9
Kerosene	0.8
Otros	1.5

Fuente: Edward Glab. Del yacimiento a la refinería

#### **2.1.1.2.1 Diesel**

El diesel es una de las fracciones mas importantes del petróleo, utilizada en equipos industriales, transporte pesado y en un pequeño pero creciente porcentaje de transporte liviano. Es una mezcla líquida a temperatura ambiente que se compone de una mezcla de hidrocarburos pesados de cadenas largas (como  $C_{14}H_{30}$ ) y compuestos nafténicos, de apariencia aceitosa y color amarillo.

Su gran aceptación radica en su alto poder calorífico (48.81 MJ/kg) y poca volatilidad que lo hacen un combustible eficiente y seguro, comparado

con la gasolina, que tiene un poder calorífico ligeramente menor (47.19 MJ/kg) y es mucho mas volátil.

Su uso inició cuando Rudolf Diesel, en 1892, obtuvo la patente del motor diesel en su búsqueda de un motor más eficiente que el accionado por gasolina (inventado en 1872). En vez de utilizar una chispa para encender la mezcla de combustible-aire, propuso inyectar el combustible al aire comprimido ya que el calor del aire comprimido sería suficiente para quemar el combustible (3). Estos principios aún son la esencia del funcionamiento del motor que lleva su nombre. En la actualidad los motores accionados por combustible diesel son muy eficientes y desarrollen potencias elevadas<sup>1</sup>.

### **2.1.2 El petróleo y sus derivados en Guatemala**

Guatemala es un país que tiene yacimientos petroleros en los cuales se extrae el crudo, pero su contenido de azufre es demasiado alto y por ello no hay en el país una planta de refinamiento para obtener derivados. Del crudo nacional, solo se utiliza para consumo local, una mínima fracción de asfalto y lo demás es exportado.

#### **2.1.2.1 Producción y consumo**

Según datos publicados por el ministerio de energía y minas, para el año 2004, en Guatemala se produjeron 7,384,124.48 barriles de crudo, con los cuales no se podría suplir la demanda nacional de hidrocarburos, ya que es de aproximadamente 25 millones de barriles anuales (2003 y 2004). De estos, el diesel es el de mayor consumo (31.2%) que se utiliza para el parque vehicular y equipo industrial accionado por combustible diesel (4).

---

<sup>1</sup> Las especificaciones de calidad del aceite combustible diesel No. 2-D (automotriz) según Acuerdo Ministerial No. 761-2004 se hallan en el Apéndice

### **2.1.2.2 Importación**

Las importaciones de hidrocarburos en el año 2004 fueron de 24,547,290 barriles, con una factura de \$1,047,571,545. De estos el diesel, debido a que es el de mayor consumo, también ocupa el primer lugar en importaciones con 7,914,584 barriles (32.24%), con una factura de \$396,222,317.

Los productos petroleros importados provienen de muchos países, de los cuales podemos mencionar entre los mas importantes a Curacao, Estados Unidos, Venezuela y Chile.

## **2.2 Aceites y Grasas**

### **2.2.1 Composición química de los aceites y grasas**

Los aceites y grasas son lípidos que se hallan abundantemente en la naturaleza, almacenados en los tejidos animales y vegetales, por su alto contenido energético. Aunque parecen diferentes, sus estructuras moleculares están estrechamente relacionadas (5). Ambos son ésteres de ácidos grasos y glicerol, pero generalmente se presentan como triésteres del glicerol o triglicéridos, con tres moléculas de ácidos grasos (no necesariamente iguales) unidos a una molécula de glicerol.

#### **2.2.1.1 Ácidos grasos**

Son ácidos monocarboxílicos de la fórmula general  $R-COOH$ , en donde R representa una cadena de hidrocarburo que es generalmente lineal y no ramificada con un numero par de átomos de carbono entre 12 y 24. Dichas cadenas pueden ser saturadas (si no tienen dobles enlaces  $C=C$ ), monoinsaturadas (con un doble enlace) o poliinsaturadas (dos o mas dobles enlaces).

**Tabla II** Algunos ácidos grasos comunes en forma aniónica

Nombre	Denominación <sup>2</sup>	Nombre IUPAC	Formula molecular	Punto de Fusión °C
Laurato	C12:0	Dodecanoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COO <sup>-</sup>	44
Miristato	C14:0	Tetradecanoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COO <sup>-</sup>	52
Palmitato	C16:0	Hexadecanoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COO <sup>-</sup>	63
Estearato	C18:0	Octadecanoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COO <sup>-</sup>	70
Araquidato	C20:0	Eicosanoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>18</sub> COO <sup>-</sup>	75
Palmitoleato	C16:1	cis- $\Delta^9$ -Hexadecenoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COO <sup>-</sup>	-0.5
Oleato	C18:1	cis- $\Delta^9$ -Octadecenoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COO <sup>-</sup>	13
Linoleato	C18:2	cis,cis- $\Delta^{9,12}$ -Octadecadienoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (CH=CHCH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> COO <sup>-</sup>	-9
Linolenato	C18:3	todo cis- $\Delta^{9,12,15}$ -Octadecatrienoato	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> (CH=CHCH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> COO <sup>-</sup>	-17
Araquidonato	C20:4	todo cis- $\Delta^{5,8,11,14}$ -Eicosatetraenoato	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (CH=CHCH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> COO <sup>-</sup>	-49

Fuente: Robert Horton. Bioquímica. Pág. 9-3.

### 2.2.2 Propiedades de los aceites y grasas

Los triglicéridos son neutros (no iónicos) y no polares, por lo tanto insolubles en agua y menos densos que ella. Diferentes mezclas de éstos componen a las grasas y aceites y que dichas mezclas sean sólidas (grasas) o líquidas (aceites) a temperatura ambiente depende de la cantidad y proporción de los ácidos grasos que las componen (6).

Las propiedades de los ácidos grasos y por ende de los aceites y las grasas, dependen de la longitud de la cadena de hidrocarburo, de la cantidad de dobles enlaces presentes y su posición en la cadena. El punto de fusión de ácidos grasos de cadena larga es mayor a los de cadena corta, de igual manera, a mayor saturación, mayor punto de fusión (véase tabla II). La reactividad aumenta con la cantidad de dobles enlaces presentes, aunque su posición dentro de la cadena, también influye de gran manera.

<sup>2</sup> La denominación es una forma simple para especificar un ácido graso, en donde se indica la cantidad de átomos de carbono y el número de dobles enlaces separados por dos puntos.

### **2.2.3 Fuentes de obtención y usos**

Es del lenguaje común hacer referencia a los triglicéridos de origen animal como grasas y a los de origen vegetal como aceites, debido al estado en el que se encuentran al finalizar el proceso de obtención.

#### **2.2.3.1 Grasas animales**

Las grasas animales se encuentran en el tejido adiposo debajo de la piel y en la leche materna de las hembras. El proceso de obtención consiste en calentar el tejido para remover la grasa, el cual se puede realizar en seco o con vapor. La utilización de uno u otro método depende de la calidad y propiedades deseadas en la grasa (7).

La remoción de grasas en seco se utiliza cuando se desea un producto residual (tejido animal) de calidad y una grasa no comestible en la que no importa su color, textura o sabor. Un ejemplo de recuperación de grasa en seco es la fritura de tocino, en la que el tejido se calienta y deshidrata liberando la grasa. Se completa el proceso de obtención de la grasa al prensar el sólido remanente. Este tipo de grasas se utilizan para hacer jabones en el proceso de saponificación y como ingrediente en la elaboración de concentrados bovinos y porcinos.

Cuando se desean aceites o grasas de calidad para uso o consumo humano se utiliza vapor para la extracción de las grasas animales. Se hace pasar vapor a alta presión por el tejido animal para liberar la grasa, que luego se recupera al ser condensada y separada por decantadores continuos o centrifugación. Estas grasas son utilizadas para la elaboración de cosméticos y cremas humectantes, entre otros.

### **2.2.3.2 Aceites vegetales**

En las plantas se pueden hallar dos tipos de aceites, los esenciales y los fijos, que se diferencian por su función dentro de la planta, sus propiedades físicoquímicas y por la cantidad en la que se encuentran dentro de la misma.

#### **2.2.3.2.1 Aceites esenciales**

Los aceites esenciales son líquidos volátiles y aromáticos que se hallan en los tallos, hojas y flores de las plantas aromáticas en porcentajes muy bajos. Son una mezcla de compuestos muy complejos (carburos terpenicos, cetonas, aldehidos, etc) cuya función es proporcionar a las plantas su olor característico.

Los aceites esenciales se extraen mediante arrastre por vapor, arrastre por solvente o ambos en una proporción que depende de la materia prima y son utilizados en perfumería y para productos farmacéuticos. Entre los aceites esenciales mas utilizados podemos mencionar el de cardamomo, eucalipto, clavo de olor, romero y tomillo.

#### **2.2.3.2.2 Aceites fijos**

Los aceites fijos son mezclas de triglicéridos con ácidos grasos diversos pero con menor saturación que los de origen animal. Tienen consistencia de jarabe, color amarillo o rojizo al ser extraídos pero incoloros, ligeramente amarillos y casi inodoros luego de ser tratados. Fungen como medio de almacenamiento de energía en plantas oleaginosas como el maíz, algodón, palma, oliva, etc, que lo contienen en porcentajes considerables.

Para extraerlos se utilizan prensas hidráulicas y solo cuando el material sólido remanente contiene un porcentaje considerable de aceite se somete a una extracción por solvente. Al extraerlo arrastra muchas impurezas y sustancias que alteran su consistencia y características. Por ello, los aceites se someten a un proceso de refinamiento, donde se remueven impurezas; blanqueado, para remover los compuestos que modifican el color y promueven la oxidación; y desodorizado, donde se arrastran las sustancias que modifican el olor y sabor del aceite. Un aceite RBD es aquel que fue sometido a los tres procesos, las siglas son por las iniciales de cada uno de los procesos.

La mayoría de los aceites vegetales se utilizan en la industria alimenticia, como aceites RBD (aceites de cocina), modificados (grasas para repostería o confitería) o en suspensiones (margarina). Un aceite puede volverse una grasa al agregarle átomos de hidrógeno a la cadena insaturada de los ácidos grasos que lo componen, ya que se aumenta su estabilidad y su punto de fusión, este proceso se denomina hidrogenación.

La selección de los diferentes aceites para cada industria o uso, depende de sus características físicas y químicas, disponibilidad y precio. Por ejemplo, en la elaboración de aderezos se utiliza aceite de oliva por su sabor, olor y color, pero para la elaboración de frituras en la industria, normalmente se utiliza el aceite de palma, que no altera de manera significativa el sabor u olor de la comida, es accesible y resistente a las diversas reacciones en el proceso.

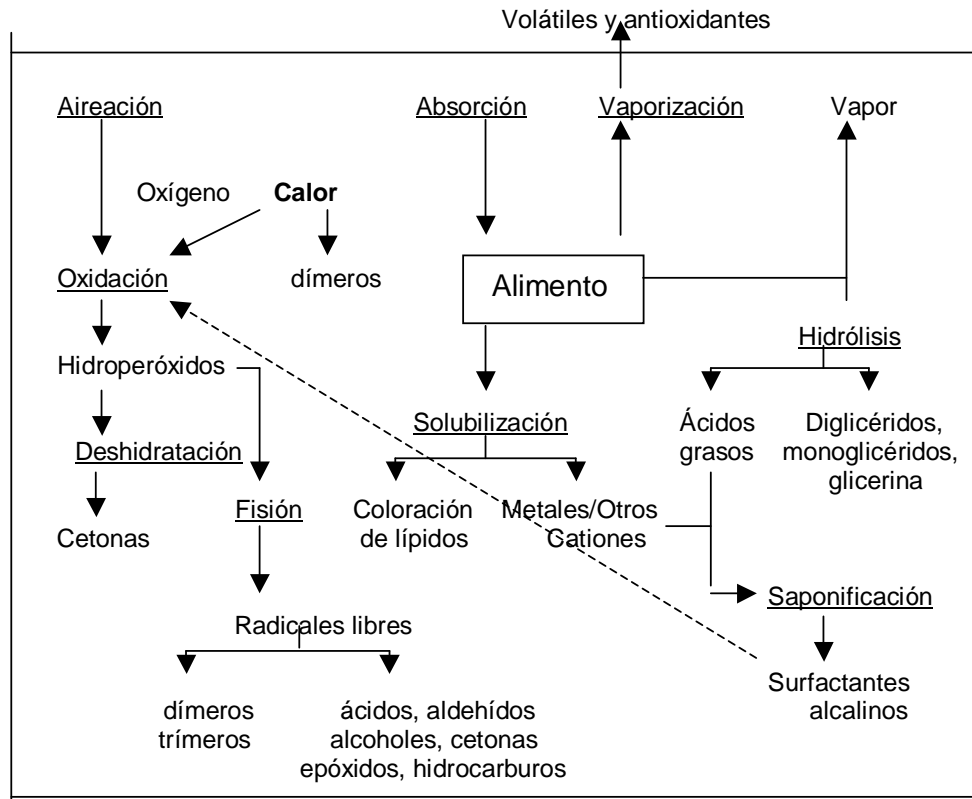
#### **2.2.4 Reacciones de los aceites y grasas**

Cuando los aceites son utilizados como medio de calentamiento en la industria alimenticia, se someten a altas temperaturas y al contacto con los alimentos, provocando que se lleven a cabo una gran cantidad de



reacciones (véase | 3) que modifican todas sus propiedades, al punto que ya no es utilizable y debe ser desechado.

**Figura 3** Reacciones del aceite utilizado como medio de calentamiento para frituras



Fuente: Moreira Rosana, Deep-Fat Frying.

### 2.2.5 Aceite de palma africana

El aceite de palma africana se obtiene de su fruta que crece dentro de una larga vaina que puede contener hasta 10 kilogramos de ella. La fruta es roja y ovalada, tiene de 2.5 a 5 cm de largo, diámetro aproximado de 3 cm, pesa de 6 a 8 gramos en promedio y su porcentaje de aceite varía entre un 40 y 60% del peso de la semilla. Su composición de ácidos grasos se puede observar en la tabla III.

**Tabla III** Composición porcentual de los ácidos grasos mas abundantes en el aceite de palma

Ácido Graso	%
Mirístico (C14:0)	1.1
Palmítico (C16:0)	42.9
Esteárico (C18:0)	4.6
Oleico (C18:1)	39.3
Linoleico (C18:2)	10.7

Fuente: Clyde Stauffer. Fats and Oils. Pág. 131

La palma africana (*elaeis guineensis*) es una planta de hasta 40 m de altura (pero en cultivos hasta 20 m), cuyo tronco termina en una corona de hojas pinnadas. Crece en tierras poco elevadas con alto índice de precipitación con temperaturas entre 20 y 35 °C.

**Figura 4** Palma Africana (*elaeis guineensis*) con su fruto en vaina y suelto



Fuente: <http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/~stueber/mavica/all/3000/02918.jpg>

El cultivo de palma africana en Guatemala se inició en 1987 y a la fecha, hay más de 15 mil hectáreas sembradas de ella. Esta industria proporciona empleo a más de 500 campesinos del área rural. Además del aceite, la masa remanente contiene un alto contenido proteico utilizado en la elaboración de concentrados animales (8).

El aceite extraído de la palma es un producto de alta rentabilidad y versatilidad. Es uno de los aceites mas utilizados en la industria de alimentos como aceite de cocina, como manteca y margarina y también como grasa industrial. También se usa para la manufactura de jabón, como base para fabricar cosméticos, como sustituto del keroseno y para la industria de velas aromáticas, entre otros.

### **2.3 Biocombustibles**

Son biocombustibles aquellos productos químicos orgánicos obtenidos del procesamiento de biomasa y que son utilizados como combustibles. En algunos casos, como la leña, la biomasa es en si misma el combustible. El término biomasa se refiere a toda la vegetación del planeta y a muchos productos y subproductos que provienen de ella, como por ejemplo aceites, residuos agrícolas o algunos desechos municipales e industriales y es la fuente más antigua de energía renovable conocida.

Los biocombustibles poseen grandes ventajas respecto a los combustibles derivados del petróleo, entre ellas se pueden mencionar:

1. Proporcionan una fuente de energía renovable y por lo tanto inagotable.
2. Disminuyen en forma notable las emisiones de CO<sub>2</sub>, de los hidrocarburos no quemados y de materia sólida y elimina los sulfatos por completo.
3. Revitaliza la economía rural, generando empleo y valor agregado a las cosechas.

### **2.3.1 Obtención de biocombustibles**

Para la obtención de biocombustibles, la biomasa se debe transformar o adecuar para su utilización en los sistemas convencionales. Según la naturaleza de la biomasa y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar procesos:

- Mecánicos: astillado, trituración, compactación
- Termoquímicos: combustión, pirólisis y gasificación
- Biotecnológicos: microbacterianos o enzimáticos
- Extractivos: extracción por solvente, arrastre de vapor

Dando como resultado biocombustibles:

- sólidos: paja, leña sin procesar, carbón vegetal
- gaseosos: biogas e hidrógeno
- líquidos: aceites vegetales, bioetanol y biodiesel (9)

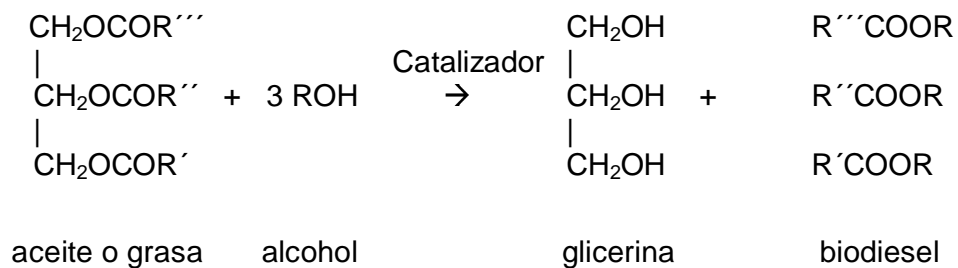
### **2.3.2 Biodiesel**

El biodiesel es una mezcla de ésteres que pueden producirse a partir de diferentes tipos de aceites vegetales, grasas animales o aceites residuales de la industria de los alimentos, haciéndolos reaccionar con metanol u otro alcohol de baja masa molecular, obteniendo glicerina como producto secundario (10). Las dos reacciones mediante las cuales se puede obtener biodiesel son la de transesterificación y la de esterificación.

### 2.3.2.1 Transesterificación

En la reacción de transesterificación directa del aceite con un catalizador básico, como hidróxido de sodio, se presenta en la figura 5. El triglicérido se rompe para dar paso a tres ésteres, formados a partir de la cadena aniónica de los ácidos grasos unida a la cadena alifática del alcohol y a una molécula de glicerol, formada por la introducción de los grupos hidroxilo del alcohol en sustitución de los residuos acilo grasos.

**Figura 5** Reacción de transesterificación



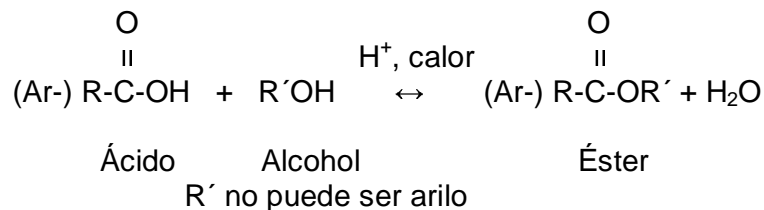
Fuente: [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/prod\\_quality.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf)

### 2.3.2.2 Esterificación

La reacción de esterificación, mejor conocida como esterificación de Fischer, es solo la primera de dos etapas necesarias para la conversión del aceite en biodiesel. En esta, los ácidos grasos del aceite se convierten en ésteres, pero no así los remanentes de aceite, que deben someterse a la reacción de transesterificación, en la segunda etapa del proceso.

La reacción de esterificación de Fischer se lleva a cabo al calentar un ácido carboxílico en una solución alcohólica que contenga una pequeña cantidad de un ácido fuerte como catalizador. Debido a que la reacción es reversible se puede aumentar la conversión de ésteres utilizando una gran cantidad de alcohol como disolvente (11).

**Figura 6** Reacción de esterificación de Fischer



Fuente: Alan Wingrove, Química Orgánica. Pág. 1090

El mecanismo de reacción lo explica McMurry de la siguiente manera: “Esta reacción es una sustitución nucleofílica de acilo realizada en condiciones ácidas. El alcohol neutro no tiene la suficiente capacidad de reacción, pero en presencia de un ácido mineral, como el ácido sulfúrico, se protona el átomo de oxígeno del grupo carbonilo. Esta carga positiva del ácido carboxílico lo vuelve más reactivo al ataque nucleofílico del alcohol. La pérdida posterior de agua del intermediario tetraédrico origina el éster”. (Ref. 5 pp. 856).

### 2.3.3 Especificaciones de calidad del biodiesel

Las características físicas y químicas de los ésteres de los aceites vegetales (biodiesel) son muy parecidas a las del aceite combustible diesel derivado del petróleo y por ello pueden mezclarse en cualquier proporción. Actualmente se utiliza como un aditivo que no excede un 20% en volumen (B20) sin modificaciones al motor.

Para su comercialización, el biodiesel puro (B100), debe cumplir con una serie de especificaciones de calidad que se hallan en la norma ASTM D 6751.

**Tabla IV** Algunos parámetros para Biodiesel (B100) según norma ASTM D-6751

<b>Propiedad</b>	<b>Método ASTM</b>	<b>Límites</b>	<b>Unidades</b>
Punto de Inflamabilidad (Flash Point)	D-93	130 mín.	°C
Agua y sedimentos	D-2709	0.05 máx.	% Vol.
Viscosidad cinemática a 40 °C	D-445	1.9-6.0	mm <sup>2</sup> /s
Ceniza sulfatada	D-874	0.02 máx.	% masa
Azufre	D-5453	0.05 máx	% masa
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50 °C	D-130	No. 3 máx	----
Índice de cetano	D-613	47 mín	----
Punto de enturbiamiento	D-2500	Reportar	°C
Destilación, 90% recuperados	D-1160	360 máx.	°C

Fuente: [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/prod\\_quality.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf)





### **3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Localización**

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en las siguientes dependencias

- Planta Piloto de Extracción-Destilación de la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En este lugar se llevaron a cabo los ensayos a nivel laboratorio y la obtención de biodiesel a nivel de planta piloto.
- Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas. En este laboratorio se realizaron los análisis de absorción de Infrarrojo (IR), así como las pruebas para determinación de propiedades del biodiesel como combustible.
- Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En estas instalaciones se comprobó el funcionamiento del biodiesel.

#### **3.2 Recursos humanos**

Investigador: Br. Herbert Roberto Romero Erazo

Asesor: Ing. Q. José Eduardo Calderón García

### 3.3 Recursos materiales

Para cada unidad experimental:

Aceite de palma africana (*elaeis guineensis*) usado

Hidróxido de sodio

Alcohol etílico

Agua Destilada

Ácido Sulfúrico

### 3.4 Equipo y cristalería

El equipo y cristalería utilizado para la obtención de biodiesel a nivel laboratorio es:

Erlenmeyers de 500 mL

Varilla de agitación

Vidrios de reloj

Espátulas

Balanza analítica

Probetas

Pipetas

Rotaevaporador

Bomba de vacío

Planchas eléctricas

Termómetro

Ampolla de decantación

Beackers

Mangueras de caucho

Los equipos que se utilizaron para la obtención de biodiesel a nivel de planta piloto son:

- Marmita de extracción
- Tapadera-Agitador de la marmita de extracción
- Marmita de destilación
- Bomba de vacío
- Caldera de alimentación de vapor
- Condensadores de la marmita de destilación
- Tanque recuperador de solvente

### **3.5 Metodología experimental**

La factibilidad de obtención de biodiesel a partir de aceite de palma usado en la industria alimenticia sin necesidad de calentamiento se evaluó al someter dicho aceite pretratado (remoción de impurezas y agua) a reacción de transesterificación y esterificación por separado. Se buscó definir variables aproximadas a nivel laboratorio para luego, al escalonar cada proceso, realizar entre tres y seis lotes por método.

### **3.6 Descripción del método**

Los métodos propuestos para la obtención de biodiesel a partir del aceite de palma usado en la industria alimenticia son los siguientes:

#### **3.6.1 Transesterificación directa del aceite**

Este método consiste en llevar a cabo la reacción de transesterificación de los triglicéridos que conforman el aceite. Se coloca el aceite pretratado en el recipiente de reacción, al cual, se le agrega la mezcla previamente hecha de hidróxido de sodio en etanol. Los tres componentes se agitan y mezclan hasta que se completa la reacción.

De las dos fases resultantes se toma la fase liviana y se somete a destilación al vacío para remover y recuperar el exceso de alcohol (agregado para promover la reacción) de los ésteres formados. Al finalizar la operación, los ésteres se someten a una serie de lavados con una mínima cantidad de agua destilada para remover sales o trazas de catalizador, ya que estas alteran sus propiedades.

### **3.6.2 Esterificación de los ácidos grasos y transesterificación del aceite**

El segundo método se lleva a cabo en dos etapas, una etapa ácida y una etapa básica. El proceso se inicia colocando el aceite pretratado en un recipiente apropiado o reactor, donde se calienta y mezcla con el alcohol y el ácido sulfúrico. Después de cierto tiempo de agitación y calentamiento, se deja en reposo para que la mezcla se enfríe y luego proceder a la etapa básica. En un recipiente aparte, se prepara una mezcla de alcohol con el hidróxido de sodio, en proporción al lote trabajado. Se adiciona a la mezcla resultante de la etapa ácida y se agita con calentamiento hasta que se completa la reacción. Los ésteres se hallan en la fase liviana, se separan, destilan y lavan para obtener biodiesel.

## 4. RESULTADOS

Se logró obtener biodiesel a partir del aceite de palma usado, sin necesidad de calentamiento, mediante la reacción de transesterificación. Mediante la reacción de esterificación, el calentamiento es indispensable.

**Tabla V** Obtención y rendimiento de biodiesel mediante transesterificación de 100 ml de aceite de palma usado a nivel laboratorio

<b>Catalizador NaOH (% masa)</b>	<b>Volumen de Etanol (ml)</b>	<b>Volumen de Biodiesel (ml)</b>	<b>Rendimiento %</b>
1% (0.92 gramos)	150	15	15
	200	21	21
	250	24	24
2% (1.84 gramos)	150	93	93
	200	93.2	93.2
	250	103	103

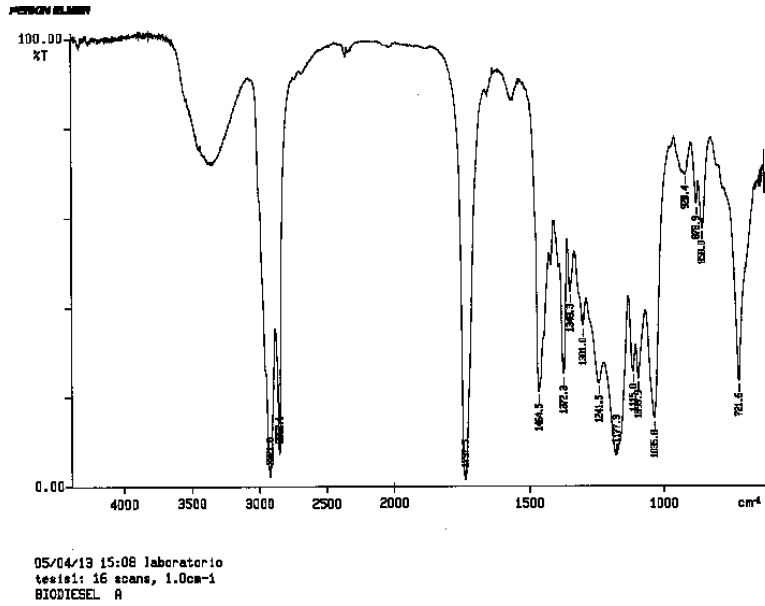
Fuente: Sección, datos originales

**Tabla VI** Obtención y rendimiento de biodiesel mediante transesterificación de 5.4 L de aceite de palma usado a nivel de planta piloto

<b>Lote</b>	<b>Volumen de ésteres (L)</b>	<b>Rendimiento (%)</b>
M1-PP1	3.67	67.96
M1-PP2	1.07	19.81
M1-PP3	3.94	72.96
M1-PP4	3.56	65.93

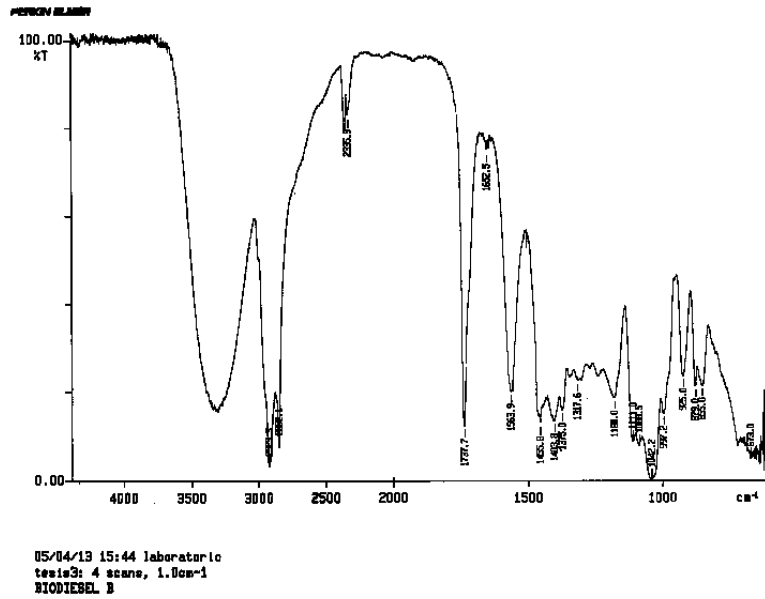
Fuente: Sección, datos originales

**Figura 7** Absorción en el Infrarrojo (IR) de fase liviana destilada



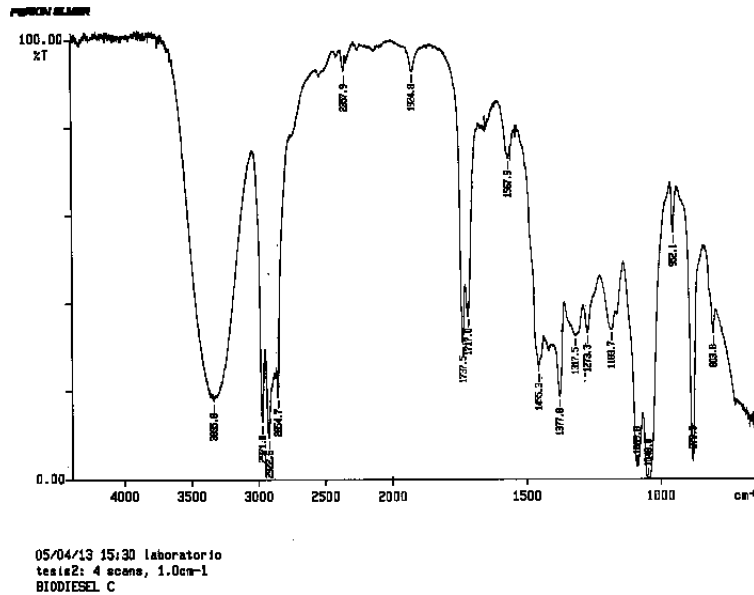
Fuente: Análisis de absorción en el infrarrojo, Laboratorio Técnico, Ministerio de Energía y Minas

**Figura 8** Absorción en el Infrarrojo (IR) de fase pesada destilada



Fuente: Análisis de absorción en el infrarrojo, Laboratorio Técnico, Ministerio de Energía y Minas

**Figura 9** Absorción en el Infrarrojo (IR) de fase pesada



Fuente: Análisis de absorción en el infrarrojo, Laboratorio Técnico, Ministerio de Energía y Minas

**Tabla VII** Propiedades y características del biodiesel obtenido mediante transesterificación a nivel de planta piloto

Propiedad	Resultado
Densidad (g/ml a 21 °C)	0.862
Índice de Refracción (a 21°C)	1.567
pH	7.7-8.2
Color	Amarillo
Apariencia	Claro y brillante
Olor	Agradable

Fuente: Sección, Datos originales

**Tabla VIII** Resultados de análisis de biodiesel, obtenido mediante transesterificación a nivel planta piloto, según especificaciones de calidad de aceite combustible diesel No. 2-D (Automotriz)

Descripción	Método de análisis ASTM	Resultado Biodiesel	Especificación Diesel No. 2-D
Punto de inflamabilidad (°C)	D-93	56	52 mín.
Azufre (% masa)	D-129	0.01	0.5 máx.
Corrosión en la tira de cobre	D-130	1	No. 2 máx.
Gravedad API (°API)	D-287	30.4	Reportar
Viscosidad Cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	D-445	4.9	1.9 mín.- 4.1 máx.
Ceniza (% peso)	D-482	0.003	0.01 máx.
Índice de cetano, calculado	D-976	48.6	45 mín.
Agua y sedimento (% volumen)	D-1796	0.05	0.05 máx.
Destilación (°C) 90% recuperado	D-86	347	282 mín. – 360 máx.
Calor de Combustión (MJ/kg)	D-240	39.8	-----

Fuente: Resultados de análisis, Laboratorio Técnico, Ministerio de Energía y Minas

**Tabla IX** RPM y potencia de un motor diesel de un pistón con mezclas de biodiesel y diesel comercial

Combustible	RPM	Torque (N-m)	Potencia (kw)
Diesel comercial	1300	16.23	2.20932
B10	900	16.23	1.52953
B15	1200	16.23	2.03937
B20	1233	16.23	2.09545

Fuente: Sección, datos calculados



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo se evaluó la posibilidad de poder llevar a cabo la conversión del aceite usado a biodiesel, mediante transesterificación y esterificación, sin necesidad de calentamiento. Esto solo se logró con la reacción de transesterificación al agregar un exceso de catalizador básico.

La reacción de esterificación de Fischer es una reacción reversible y lenta. La adición del catalizador ácido acelera la reacción pero no influye sobre el efecto estérico de los sustituyentes. A mayor masa de los ácidos grasos o del alcohol, disminuye la velocidad de reacción aunque el equilibrio sea el mismo. Los ácidos grasos tienen cadenas muy grandes por lo que aún con la adición del catalizador, sin calentamiento, la reacción simplemente tarda mucho en llevarse a cabo. Además el exceso de catalizador genera agua, que de no ser removida, promueve la reacción de saponificación en la etapa de transesterificación. Lo anterior se comprobó a nivel laboratorio y por ello ya no se procedió a nivel de planta piloto.

De la evaluación de la reacción de transesterificación a nivel laboratorio se observó mayor conversión de biodiesel al trabajar con una relación de volumen de 30-70 de aceite y alcohol, agregando un 2% en masa de catalizador respecto del aceite. La agitación fue de 1 hora.

A nivel planta piloto se trabajó con lotes de 18 litros, compuestos por 5.4 litros de aceite usado y 12.6 litros de etanol, basados en los resultados a nivel laboratorio. El 2% de catalizador fueron 99.36 gramos, que se agregaban al alcohol y se mezclaban previo a mezclarse con el aceite en el reactor. En esta mezcla previa se vuelve más reactiva a la cadena hidrocarbonada del alcohol para favorecer la reacción.

Los volúmenes de biodiesel obtenidos a nivel de planta piloto por medio de la reacción de transesterificación se observan en la tabla VI. Exceptuando el lote 2, se obtiene un promedio de 3.72 litros de biodiesel por lote. El poco rendimiento del segundo lote se debe a que no se disolvió adecuadamente el hidróxido de sodio en el alcohol ya que al final del tiempo de agitación se observó la mayoría del hidróxido de sodio depositado en el fondo del reactor, donde aún se observaba una fase pesada de aceite.

Al final de la reacción se obtienen dos fases. La fase pesada contiene la glicerina, que es el subproducto de reacción. La fase liviana, luego de destilar el alcohol en exceso, presenta dos fases también. La fase liviana es el biodiesel, comprobado por la absorción del infrarrojo en la frecuencia de  $1737.5\text{ cm}^{-1}$  de la figura 7, que luego de lavada presentó las características de la tabla VII.

La fase pesada de la fase liviana presenta ésteres en la misma región (figura 8) pero también indica la presencia del grupo OH por la absorción ancha e intensa alrededor de los  $3500\text{ cm}^{-1}$ , que podrían ser trazas de alcohol no destilado, glicerina o ácidos carboxílicos.

Debido a que los compuestos no son puros se observan muchos picos en las tres figuras, pero la presencia de los grupos funcionales en cada fase verifican que la reacción se lleva a cabo.

Al biodiesel obtenido se le hicieron las pruebas que se hacen al diesel automotriz para verificar su calidad y determinar si es un producto comercialmente aceptable. Nueve de los 10 resultados se hallan dentro de los límites establecidos en la legislación nacional. El resultado que no cumple con las especificaciones es el de viscosidad cinemática, 0.8 puntos por encima del valor máximo, aunque según la norma ASTM D 6751 para biodiesel, se halla dentro del rango permitido.

Para verificar el funcionamiento del biodiesel como combustible se hicieron pruebas en un motor diesel tipo Deutz de 1 pistón. Los datos de la tabla IX (pagina 28) muestran que si funcionó el motor con las mezclas de biodiesel. La potencia desarrollada por el motor aumenta proporcionalmente al aumento de la fracción de biodiesel, casi equiparando la potencia desarrollada por el diesel automotriz.

En cuanto a las emisiones, del diesel automotriz, el humo que salía del motor era de color negro, mientras que las emisiones de las mezclas de biodiesel eran de color grisáceo y eran menos irritantes.



## CONCLUSIONES

1. Se puede obtener biodiesel a partir de aceite de palma usado sin calentamiento, sólo con la reacción de transesterificación.
2. La reacción de esterificación es muy lenta sin la adición de calor y si se agrega más catalizador para acelerarla, aumenta la generación de agua que en la etapa de transesterificación del aceite restante promueve la reacción de saponificación.
3. El porcentaje de rendimiento de obtención de biodiesel a nivel laboratorio es mayor que el de nivel planta piloto.
4. El biodiesel obtenido cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la legislación nacional.
5. Las mezclas de 10, 15 y 20% de biodiesel funcionaron en un motor de un pistón tipo Deutz de arranque manual ubicado en el laboratorio de motores de combustión interna de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos.
6. Las emanaciones del motor al funcionar con mezclas de biodiesel son menos irritantes que las del diesel comercial.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar las separaciones de fases con centrifugas para facilitar el proceso y disminuir el tiempo necesario.
2. Buscar una forma más rápida y eficiente para llevar a cabo la etapa de lavado de los ésteres.
3. Hacer pruebas con diferente materia prima como aceite de soya, maíz o girasol, para determinar cual proporciona una mejor alternativa energética.
4. Realizar pruebas en motores con biodiesel puro para determinar su desempeño
5. Evaluar la posibilidad de trabajar con aceites sin haber sido utilizados.





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Seese, William y William Daub. **Química**. 5a edición. México: Prentice-Hall, 1995. 209 pp.
2. Glab, Edward. **Del yacimiento a la refinería**. Presentación de la Industria Petrolera a los medios de prensa de Guatemala. Noviembre, 1994.
3. <http://auto.howstuffworks.com/diesel3.htm>. Guatemala, enero 2005.
4. Dirección General de Hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas, República de Guatemala. **Estadísticas de Hidrocarburos, Año 2004**. Guatemala: Departamento de Comercialización y Precios, MEM, Marzo 2005. 1-8 pp.
5. McMurry, John. **Química Orgánica**. 5a edición. México: International Thomson Editores, 2000. 1119 pp.
6. Horton, Robert y otros. **Bioquímica**. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1995. 9-6 pp.
7. Stauffer, Clyde. **Fats & Oils**. Eagan Press Handbook Series. EEUU: Eagan Press, 1996. 50 pp.
8. González Castillo, Ana Zeneida. **Utilización de Aceite de palma africana par la fabricación de velas aromáticas**. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad del Valle, 1998. 8-9, 12-14 pp.
9. Comisión Académica X COLAEIQ. **Eje temático: Biotecnología; Salón Biocombustibles**. Colombia: 2004. 1-3 pp.
10. <http://www.econosur.com/notas/biodiesel2.htm>. Guatemala, mayo de 2004.
11. Wingrove, Alan y Robert Caret. **Química Orgánica**. México: Oxford University Press, 1999. 1091-1097 pp.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Moreira, Rosana y otros. **Deep-Fat Frying, Fundamentals and applications**. EEUU: Aspen Publishers, Inc., 1999.
2. O'Brien, Richard. **Fats and oils: Formulating and processing for applications**. EEUU: Technomic Publishing Company, Inc. 1998.
3. Sá Parente, Expedito José de. **Biodiesel: Uma Aventura Tecnológica num País Engraçado**. S.l, s.e, s.a.
4. Skoog, Douglas y otros. **Principios de Análisis Instrumental**. 5ª edición. España: McGraww-Hill/ Interamericana de España, S.A.U., 2001.
5. Sofer, Samir y Oskar Zaborsky. **Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels**. EEUU: Plenum Press, 1981.
6. Weiss, Theodore. **Food Oils and their uses**. 2a edición. EEUU: AVI Publishing Company, 1983.
7. Wise, Donald. **Bioconversion Systems** (CRC Series un Bioenergy Systems) EEUU: CRC Press, Inc., 1984.

## BIBLIOGRAFÍA ELECTRONICA

1. [http://www.sagpya.mecon.ar/0-0/index/biodiesel/biodiesel\\_3.htm](http://www.sagpya.mecon.ar/0-0/index/biodiesel/biodiesel_3.htm). Guatemala, mayo de 2004
2. <http://www.dieselforum.org/factsheet/cleandiesel.html>. Guatemala, enero de 2005.
3. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/prod\\_quality.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf). Guatemala, enero de 2005.
4. [http://www.journeytoforever.org/biodiesel\\_make.html](http://www.journeytoforever.org/biodiesel_make.html). Guatemala, mayo de 2004.



## APÉNDICE

### Datos originales

**Tabla X** Volumen de fases luego de destilación de fase liviana por lote a nivel de planta piloto

<b>Lote</b>	<b>Biodiesel (L)</b>	<b>Fase pesada (L)</b>	<b>Etanol recuperado (L)</b>
M1-PP1	3.67	1.2	6.69
M1-PP2	1.07	----	9.15
M1-PP3	3.94	1.15	6.74
M1-PP4	3.56	1.4	4.75

**Tabla XI** RPM para torque fijo en pruebas de biodiesel por mezcla

<b>Combustible</b>	<b>RPM</b>			
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Diesel	1300	1300	1300	1300
B10	800	900	1000	900
B15	1200	1200	1200	1200
B20	1300	1200	1200	1233

## Muestra de cálculo

### 1. Cálculo del rendimiento

$$\% \text{Rendimiento} = ( \text{Vol. Biodiesel} / \text{Vol. Materia Prima} ) * 100$$

Ejemplo 1 Tomando los valores del primer lote a nivel planta piloto vemos:

$$\%R = (3.67 / 5.4) * 100 = 67.96 \%$$

### 2. Cálculo de las RPM promedio

$$\text{RPM}_{\text{prom}} = \frac{\text{RPM}_1 + \text{RPM}_2 + \text{RPM}_3}{3}$$

Ejemplo 2 Al tomar como referencia los datos de la mezcla B15 tenemos:

$$\text{RPM}_{\text{prom}} = (800 + 900 + 1000)/3 = 900 \text{ RPM}$$

### 3. Cálculo del torque o par motor del motor diesel de 1 pistón

$$T = F * d$$

Donde: T es el torque o par motor

F la fuerza del freno (4 lb)

d la distancia del eje al punto de medición de la fuerza (3 pies)

Ejemplo 3 De los datos anteriores

$$\begin{aligned} T &= (4 \text{ lb}) * (3 \text{ pies}) = 12 \text{ lb-pie} \\ 12 \text{ lb-pie} * (1 \text{ N-m} / 0.7373 \text{ lb-pie}) &= 16.23 \text{ N-m} \end{aligned}$$

#### 4. Cálculo de la potencia del motor de 1 pistón

$$P \text{ (hp)} = T \text{ (lb-pie)} * \text{RPM} / 5252$$

ó

$$P \text{ (kw)} = T \text{ (N-m)} * \text{RPM} / 9550$$

Ejemplo 4 Tomando las RPM promedio del combustible diesel

$$P = (12\text{lb-pie}) * (1300 \text{ RPM}) / 5252 = 2.970292 \text{ hp}$$

ó

$$P = (16.23 \text{ N-m}) * (1300 \text{ RPM}) / 9550 = 2.20932 \text{ kw}$$

#### Datos calculados

**Tabla XII** RPM promedio y potencia de un motor diesel de un pistón con mezclas de biodiesel y diesel comercial

Combustible	RPM	Torque		Potencia	
		N-m	lb-pie	Kw	hp
Diesel comercial	1300	16.23	12	2.20932	2.970292
B10	900	16.23	12	1.52953	2.056356
B15	1200	16.23	12	2.03937	2.741808
B20	1233	16.23	12	2.09545	2.817208

Fuente: Sección, datos calculados

**Figura 10** Esquema del equipo de la planta piloto de extracción-destilación

