



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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ELABORACIÓN DE BIODIÉSEL, A PARTIR
DE ACEITE CRUDO DE PALMA AFRICANA POR MEDIO DE DOS PROCESOS,
A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO,**

Nelson Darío Barraza López
Asesorado por el Ing. Qco. José Eduardo Calderón

Guatemala, noviembre de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ELABORACIÓN DE BIODIÉSEL, A
PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA AFRICANA POR MEDIO DE DOS
PROCESOS, A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO,**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

NELSON DARÍO BARRAZA LÓPEZ

ASESORADO POR EL INGENIERO JOSÉ EDUARDO CALDERÓN GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2007.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Benjamín Piedra Santa
EXAMINADOR	Ing. Juan Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Oscar Martínez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

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:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ELABORACIÓN DE BIODIÉSEL, A PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA AFRICANA POR MEDIO DE DOS PROCESOS, A NIVEL LABORATORIO Y PLANTA PILOTO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 25 de abril de 2007.

Nelson Darío Barraza López

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS	Por iluminarme el camino del bien a lo largo de mi vida, y su infinita misericordia al permitirme culminar hoy un sueño.
LA VIRGEN MARÍA	Por ser modelo y ejemplo de entrega.
MIS PADRES	Ramiro y Flory, como reconocimiento a su amor, dedicación y apoyo.
MI TÍA	Por su amor brindado como una segunda madre.
MIS HERMANOS	Michy, Corina y Jairo, por su apoyo y comprensión.
MIS AMIGOS	Por su amistad, entusiasmo y apoyo brindado durante todo este tiempo.
El Ing. Eduardo Calderón	Por su asesoría y apoyo durante la realización de esta investigación.
El Ing. César García	Por su colaboración y tiempo dedicado en la revisión de esta investigación.

La Universidad de San Carlos de Guatemala
En especial, a la Facultad de Ingeniería

ACTO QUE DEDICO A:

MIS ABUELOS

Aquilino, Josefina, Eleodoro y Socorro.

MIS TÍAS Y TÍOS

Marilú, Araceli, Álida, Idalia, Maribel, Laura, Yoli, Carmen, Gustavo, Juan Carlos, Mynor y Armando.

MIS PRIMOS

Alejandra, Ana Lucía, Gustavo, Alan, Carlos, Sandra, Flor, Daliberth y Juan Carlos.

MIS SOBRINOS

Carlo Fabián, Mario Antonio, Javier Alejandro, Jorge José y Juan David.

MIS AMIGOS

Gerardo, Mariana, Víctor, Bryan, Aníbal, Cesar, Jerónimo, Raúl, David, Adela, Clara Idalia, Francisco, Juan Esteban, Susan, Sebastián, Hilda María, Carlos, Mónica, Javier.

LOS INGENIEROS

José Calderón, César García, Manuel Tay, Williams, Otto Raúl, Orlando Posadas, Piedra Santa.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
HIPÓTESIS	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Combustibles	3
2.1.1 Petróleo	3
2.1.1.1 Proceso del petróleo	4
2.1.1.2 Derivados del petróleo	4
2.1.1.2.1 Diésel	5
2.2 Lípidos	6
2.2.1 Clasificación de lípidos	6
2.2.1.1 Glicéridos	7
2.2.1.2 Ceras	8
2.2.1.3 Jabones	9
2.2.1.4 Detergentes	10
2.2.1.5 Fosfolípidos	13
2.2.1.6 Esteroides	13
2.2.1.7 Isoprenoides	14

2.3 Índice de acidez	15
2.4 Grasas animales	16
2.5 Aceites vegetales	16
2.5.1 Aceites esenciales	17
2.5.2 Aceites fijos	17
2.5.2.1 Aceite de Palma Africana	18
2.6 Bio-combustibles	20
2.6.1 Obtención de bio-combustibles	21
2.6.2 Biodiésel	22
2.6.3 Principales emisiones del aceite diesel	22
2.6.4 Comparación promediada de las emisiones del biodiésel mezclado y el aceite diésel	23
3. METODOLOGÍA	
3.1 Localización	25
3.2 Recursos humanos	25
3.3 Recursos materiales	26
3.4 Equipo y cristalería	26
3.5 Metodología experimental	27
3.6 Descripción del método	28
3.6.1 Esterificación-Transesterificación del aceite crudo de palma africana	28
3.6.2 Transesterificación del aceite crudo de palma africana.	29
4. RESULTADOS	31
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41

CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
BIBLIOGRAFÍA	55
APÉNDICES	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Moléculas de diferentes tipos de glicéridos	8
2.	Moléculas de ceras animales y vegetales	9
3.	Molécula del triglicérido glicerol sal de ácidos grasos	10
4.	Reacción para obtener detergente	11
5.	Molécula de surfactante natural	11
6.	Molécula de surfactante aniónico	12
7.	Molécula de surfactante catiónico	12
8.	Símbolos de un surfactante	12
9.	Molécula de fosfolípidos	13
10.	Molécula del colestano	14
11.	Fruto y aceite de palma africana	20
12.	Emisiones producidas por un auto Mercedes Benz cada 40,000 km recorridos, utilizándose como combustible RME al 20% y aceite diésel. (las emisiones del aceite diésel equivalen al 100%).	24
13.	Relación del los gramos de biodiésel / jabón vrs volumen en exceso de etanol para el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio.	32
14.	Relación de los gramos de biodiésel / jabón vrs volumen en exceso de metanol para el proceso de transesterificación a nivel laboratorio.	34

15.	Revoluciones por minuto vrs mezcla de biodiésel / diesel realizadas en un motor estacionario de combustión interna marca Deutz de un piston.	36
16.	Polímero de aceite crudo de palma africana.	63
17.	Balance de masa automatizado para obtener biodiésel para la reacción esterificación-transesterificación y sólo transesterificación.	64
18.	Reacción de esterificación etapa ácida	64
19.	Resultado de la esterificación fase pesada y fase liviana	65
20.	Fase pesada, fase liviana y aceite crudo de palma africana	65
21.	Etóxido	66
22.	Cambio de color en la reacción de esterificación a transesterificación	66
23.	Mezcla después de una hora sin reaccionar en el proceso de transesterificación.	67
24.	Biodiésel atrapado por fase grumos.	67
25.	Biodiésel obtenido por el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio.	68
26.	Biodiésel obtenido por el proceso de transesterificación a nivel laboratorio.	68
27.	Resultado del análisis del Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas, de biodiésel obtenido por el proceso de esterificación-transesterificación a nivel planta piloto.	69
28.	Resultado del análisis del Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas, para la muestra de biodiesel por el proceso de transesterificación a nivel planta piloto	70
29.	Pruebas de mezclas biodiésel / diésel en un motor estacionario de combustión interna.	71
30.	Reactor para la obtención de biodiésel, ubicado en la Planta Piloto	71

del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

31.	Reacción de esterificación de Fisher.	72
32.	Reacción de Esterificación.	72

TABLAS

I.	Algunos ácidos grasos comunes en forma aniónica.	16
II.	Composición porcentual de los ácidos grasos en la palma africana.	19
III.	Resultados del primer proceso (esterificación-transesterificación) a nivel laboratorio, con un volumen de lote de 300 mL y 1% en masa de ácido sulfúrico para la obtención de biodiésel de aceite crudo de palma africana y sus subproductos.	31
IV.	Resultados del segundo proceso (transesterificación) a nivel laboratorio con un volumen de lote de 300 mL. Para la obtención de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana y sus subproductos.	33
V.	Resultados obtenidos en unidades de rpm (revoluciones por minuto) para diferentes mezclas de biodiésel / diésel, para las pruebas realizadas en un motor estacionario de combustión interna con biodiésel obtenido a partir de aceite crudo de palma africana	35
VI.	Propiedades y características del biodiésel obtenido mediante el proceso de transesterificación.	36
VII.	Resultados de la obtención y sus subproductos de biodiésel por el proceso de esterificación-transesterificación a nivel planta piloto.	37
VIII.	Resultados de la obtención y sus subproductos de biodiésel por el proceso de transesterificación a nivel planta piloto para usarlo en un motor estacionario de combustión interna.	37

IX.	Comparación de los resultados del análisis de biodiésel obtenido por los dos procesos esterificación-transesterificación a nivel planta piloto con el diésel comercial 2-D.	38
X.	Comparación de la máxima relación experimental de los gramos de biodiésel respecto a los gramos de jabón generados por los procesos de esterificación-transesterificación y sólo transesterificación a nivel laboratorio y planta piloto.	39
XI.	Comparación de la máxima relación teórica de los gramos de biodiésel respecto a los gramos de jabón generados por los procesos de esterificación-transesterificación y sólo transesterificación a nivel laboratorio y planta piloto.	39
XII.	Pruebas de biodiésel obtenido, cantidad de jabón y etanol sin reaccionar a nivel laboratorio para el proceso esterificación-transesterificación.	57
XIII.	Pruebas de biodiésel obtenido, cantidad de jabón y metanol sin reaccionar a nivel laboratorio para el proceso de transesterificación.	58
XIV.	Promedio de las revoluciones por minuto para cada mezcla obtenida por un motor estacionario de combustión interna.	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
RPM	Revoluciones por minuto
CB1	Corrida de biodiésel uno
CB2	Corrida de biodiésel dos
CJ1	Corrida de jabón uno
CJ2	Corrida de jabón dos
CE1	Corrida etanol uno
CE2	Corrida etanol dos
CM1	Corrida metanol uno
CM2	Corrida metanol dos
C1	Corrida uno
C2	Corrida dos
%	Porcentaje

GLOSARIO

Aceites esenciales	Líquidos volátiles y aromáticos que se hallan en los tallos, hojas y flores de las plantas aromáticas en porcentajes muy bajos.
Aceites fijos	Mezclas de triglicéridos con ácidos grasos diversos, pero con menor saturación que los de origen animal.
Biodiésel	Biocombustible líquido muy similar en propiedades al aceite diésel, pero obtenido a partir de productos renovables, los aceites vegetales y las grasas animales
Bio-combustibles	Productos químicos orgánicos obtenidos del procesamiento de biomasa y que son utilizados como combustibles.
Combustible	Sustancia carburante, cuya energía química, liberada en la reacción de combustión, busca aprovecharse.
Ceras	Mezcla de ésteres de alta masa molecular, constituidas por ácidos grasos y alcoholes

monohidroxilados, son abundantes en la naturaleza, las mismas pueden ser obtenidas de fuentes animales y plantas.

Diésel

Es una de las fracciones más 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.

Detergentes

Son sulfonatos o sulfatos de sodio de cadenas largas (doce o más átomos de carbono); los mismos presentan las ventajas de no precipitar con los iones metálicos presentes en el agua dura.

Esteroides

Son lípidos no hidrolizables, no saponificables en general, que contienen una estructura química muy particular, presentando cuatro anillos condensados.

Esterificación

Reacción mediante la cual los ácidos carboxílicos se convierten en ésteres con la adición de catalizadores ácidos.

Fosfolípidos	Lípidos hidrolizables, debido a que contienen la función éster y son lípidos compuestos, debido a que rinden por hidrólisis glicerol, ácidos orgánicos grupos fosfatos y otros compuestos.
Glicéridos	Están constituidos por ácidos grasos de alta masa molecular y alcoholes trihidroxilados como el propanotriol, glicerol o glicerina.
Grasas animales	Se encuentra en el tejido adiposo debajo de la piel y en la leche materna. El proceso de obtención consiste en calentar el tejido para remover la grasa, el cual se puede realizar en seco o con vapor.
Índice de acidez	Es la cantidad de base, expresada en mgKOH, necesaria para neutralizar 1 gramo de producto.
Jabón	Mezcla sales de metales alcalinos (usualmente sales de sodio), provenientes de ácidos de 16 a 18 átomos de carbono, pero pueden contener sales de sodio de ácidos carboxílicos de baja masa molecular.
Lípidos Isoprenoides	Son terpenos y terpenoides, considerándose como derivados del isopreno, sin embargo, ellos son divisibles en unidades de isopreno, de forma natural, ellos se biosintetizan en las plantas a partir del pirofosfato de isopentenilo.

Terpenos	Hidrocarburos saturados y no saturados, cíclicos y acíclicos.
Terpenoides	Poseen cadenas hidrocarbonadas pero exhiben la presencia de sales (hidróxilo, carbonilo, carboxilo), las cadenas pueden ser cíclicas y anillos condensados).
Transesterificación	Reacción en la que los triglicéridos se convierten en ésteres y glicerina con la utilización de catalizadores alcalinos.

RESUMEN

Se efectuaron pruebas para obtener biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana por medio de dos procesos: esterificación-transesterificación y sólo transesterificación, trabajando a nivel laboratorio definiendo variables para su escalamiento a nivel planta piloto.

Se llegó a la optimización de los dos procesos, el primer proceso con la utilización de calor en la primera etapa y el segundo proceso sin la utilización de calor. Las muestras de biodiésel obtenido por medio de los dos procesos se analizaron respecto a sus propiedades fisicoquímicas como: la densidad, propiedades organolépticas y por análisis de laboratorio efectuado por el Ministerio de Energía y Minas, según norma ASTM 6751 (estándar del biodiésel) para acreditar su uso en un motor estacionario de combustión interna.

Se analizaron los resultados de biodiésel a nivel laboratorio, obtenido mediante los dos procesos y se llegó a la conclusión que el proceso de transesterificación fue el más eficiente, ya que la relación en masa de biodiésel respecto al jabón obtenido de subproducto fue de 3.29 gramos de biodiésel obteniéndose solo 1 gramo de jabón y presentó un volumen de biodiésel de 200 mL con una conversión en volumen de 80% y en masa de 74.55%, respecto a los 180 mL obtenidos por el proceso de esterificación-transesterificación.

Se llegó a la obtención de biodiésel a nivel planta piloto por el proceso de transesterificación con un volumen de 20 Lt biodiésel para un lote de 30 Lt, exceso de metanol de 600%, 2% de álcali y 25.33 Lt de aceite crudo de palma

africana. Se hicieron mezclas en volumen de 10 hasta 100% de biodiésel / diésel para el funcionamiento de un motor estacionario de combustión interna.

HIPÓTESIS

Se puede obtener biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana, por esterificación-transesterificación y solo transesterificación a nivel de laboratorio y planta piloto.

OBJETIVOS

GENERAL

Obtener biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana mediante esterificación-transesterificación y sólo transesterificación, utilizando catalizadores ácidos y básicos a nivel de laboratorio y planta piloto.

ESPECÍFICOS

1. Evaluar las características del biodiésel obtenido basado en la norma ASTM 6751 por el método de esterificación-transesterificación y sólo transesterificación.
2. Comparar las características del biodiésel obtenido a partir del aceite crudo de palma africana con el diésel comercial (2-D) según norma ASTM 6751.
3. Efectuar pruebas de funcionamiento con mezclas en porcentaje de volumen (biodiésel / diésel) de 10%, 20% y 100%, en un motor estacionario de combustión interna de un tiempo, para evaluar su funcionamiento respecto a las revoluciones por minuto generadas.
4. Definir variables de proceso a nivel laboratorio para su escalamiento nivel planta piloto.

INTRODUCCIÓN

El biodiésel es un combustible líquido muy similar en propiedades a la del diésel, pero obtenido a partir de productos renovables, como son los aceites vegetales y las grasas animales.

La obtención de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana por medio del proceso de esterificación y transesterificación, ofrece una compatibilidad respecto al biodiésel obtenido a partir de aceite refinado de palma africana, con la diferencia del ahorro económico de producción como lo es el refinamiento de dicho aceite.

El biodiésel a partir del aceite crudo de palma africana se obtiene por medio de dos procesos. La primera etapa del primer proceso es esterificando los ácidos grasos por medio del alcohol (etanol o metanol) y utilizando como promotor ácido sulfúrico y calor dando como resultado ésteres y agua, se efectúa la separación de ésteres y se transesterifican de nuevo los ésteres por medio de un álcali como promotor (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) para obtener la máxima conversión en la reacción y un rendimiento adecuado de producto deseado y el segundo proceso es una transesterificación directa utilizando hidróxido de sodio como promotor y un exceso de metanol sin ayuda de calor en el avance de la reacción.

El biodiésel obtenido se analizó en el Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas, para la cual procedió a comparar con la norma ASTM D-6751 asegurando su calidad y por consiguiente su uso. Se mezcló biodiésel con diésel en porcentaje de volumen utilizando mezclas de 10%, 20%, 30% hasta 100% en un motor estacionario de combustión interna, se midieron

las revoluciones por minuto, en la cual las revoluciones por minutos generadas por el motor estacionario de combustión interna aumentaban cuando la presencia de biodiésel en la mezcla fue mayor hasta llegar a 100%.

1. ANTECEDENTES

El uso por primera vez de aceites vegetales como combustible, se remonta al año de 1900, siendo Rudolph Diésel, quien lo utilizara por primera vez en su motor de ignición-compresión y quien predijera el uso futuro de bio-combustibles.

Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en el Brasil, sobre diésel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiésel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que sucedía en el momento, y al elevado costo del petróleo alcanzado como consecuencia de los factores políticos existentes.

Las primeras pruebas técnicas con biodiésel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero sólo hasta el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME. Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia, son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiésel en automóviles. En su producción se destacan instituciones como: BDP (*Bioenergy Development Program of Canadá*), PORIM (*Palm Oil Research Institute of Malasia*), *COPERATIVE ASPERHOFEN* - Austria y CENPES/DIPROD del Brasil; en investigación y ensayo son líderes las universidades de Missouri, Iowa, Illinois e Idaho en los Estados Unidos, Saskatchewan en Canadá, Göttingen en Alemania y Graz en Austria, además de las instituciones: NBB

(National Biodiesel Board), DOE (US Department of Energy), USB (United Soybean Board) y FPRF (Fats and Proteins Research Foundation).

El biodiésel es obtenido a partir de varias fuentes de aceites de origen vegetal la cual en su mayoría tienen un proceso de refinamiento (comestible) o tratamiento térmico (aceites usados). La producción de biodiésel a partir de los mismos es significativamente un proceso directo no crea complicaciones como ejemplo una saponificación, ceras etc, debido a su bajo contenido de ácidos grasos. Por el bajo contenido de ácidos grasos se facilita la rotura de la molécula para formar los ésteres que son esencialmente la composición del biodiésel.

El biodiésel de aceite crudo de palma africana por su gran contenido de ácidos grasos se convierte en jabón, ceras o se saponifica. Al estandarizar el proceso del mismo y lograr el rompimiento de todas las moléculas de los ácidos grasos se obtiene biodiésel de una forma directa, evitándose así un proceso de refinamiento, que es minimizar la cantidad de ácidos grasos o tratamiento térmico como son los aceites usados.

La mayoría de fuentes (materias primas aceites vegetales) para la obtención de biodiésel tienen un tratamiento ya sea térmico o de fraccionamiento, la idea de usar aceite crudo es evitar todos los procesos de tratamiento y que se obtenga de una manera directa. En la mayoría de casos no se ha obtenido biodiésel de aceites crudos.

Las alternativas para la obtención de biodiésel comienza con el proceso a seguir. Los dos procesos a seguir son esterificación-transesterificación y sólo transesterificación. La materia prima son aceites vegetales de alto o bajo contenido de ácidos grasos para la obtención de ésteres.

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 (CO_2) y agua (H_2O), con la liberación de energía (Ref. 1). La importancia de los combustibles es que su energía química se puede convertir en energía calorífica, eléctrica o mecánica con el equipo adecuado (Ref. 1).

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.

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.

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 (Ref. 2).

2.1.1.1 Proceso del petróleo

El proceso del petróleo, luego de hallado, extraído de los pozos petroleros y transportados 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 (Ref. 3).

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 hidrotradoras para remover azufre, nitrógeno, oxígeno y otros contaminantes. 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.

2.1.1.2.1 Diésel

El diésel es una de las fracciones más 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 más volátil. Su uso inició cuando Rudolf Diésel, en 1892, obtuvo la patente del motor diésel 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. Estos principios aún son la esencia del funcionamiento del motor que lleva su nombre. En la actualidad los motores accionados por combustible diésel son muy eficientes y desarrollan potencias elevadas.

2.2 Lípidos

Son compuestos que existen en forma natural en animales y plantas, los cuales son muy importantes en muchos aspectos biológicos. Las grasas, aceites, ceras, esteroides, prostaglandinas y vitaminas pertenecen a la familia general de compuestos denominados lípidos (del griego, lipos , grasas). Esos son insolubles en agua, pero solubles en éter y otros disolventes orgánicos de polaridad semejante. La mayoría de los ácidos contienen un número par de átomos de carbono, por lo regular , de 12 a 20. Por esta razón, la mayoría de los ácidos que presentan seis o mas átomos de carbono en múltiplos pares reciben el nombre de **ACIDOS GRASOS**.

2.2.1 Clasificación de lípidos

Los lípidos pueden clasificarse de acuerdo a su estructura química, aquellos que presentan enlaces éster y pueden ser hidrolizados, tales como ceras, glicéridos se denominan lípidos hidrolizables y los que no presentan enlaces ésteres , denominados no hidrolizables en los que se encuentran los esteroides, esteroides, terpenos y terpenoides.

Los lípidos hidrolizables, se clasifican en: lípidos simples, compuestos, los lípidos no hidrolizables se clasifican en isoprenoides y esteroides.

Los lípidos se clasifican en dependencia de las reacciones químicas que experimentan , de esta manera aquellos que reaccionan con disolución de NaOH al 40%, originando sales, se denominan lípidos saponificables, y los que no experimentan este tipo de reacción se consideran lípidos no saponificables.

Los lípidos se pueden clasificar en dependencia de las funciones que realiza en los organismos vivos, encontrando en la naturaleza aquellos que realizan la función de reserva y lípidos citoplasmáticos (presentes en orgánulos celulares, mitocondrias y membrana celular).

Los lípidos también se clasifican considerando si aportan ácidos grasos que no son sintetizados por los organismos animales, los que reciben el nombre de esenciales; y los no esenciales son producidos por el metabolismo animal no necesitan ser ingeridos, son producto del metabolismo.

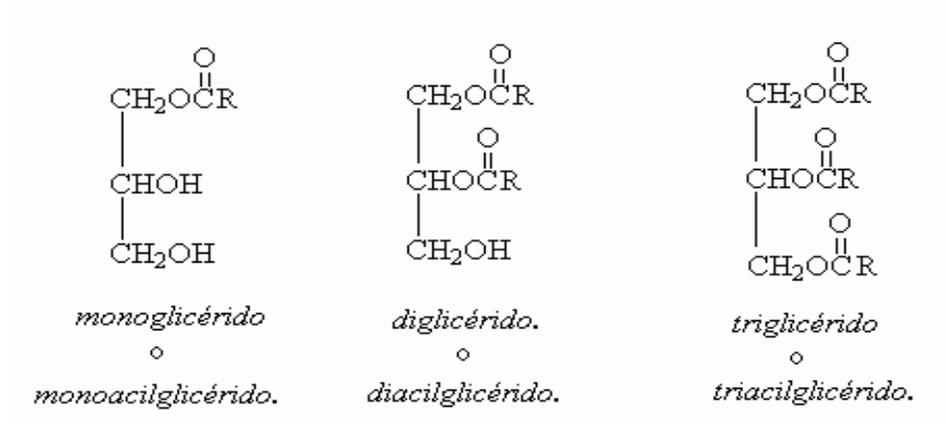
Características estructurales

Los lípidos simples son abundantes en la naturaleza en forma de: ceras y glicéridos. Los glicéridos a su vez se encuentran en forma de grasas y aceites.

2.2.1.1 Glicéridos

Los **glicéridos** están constituidos por ácidos grasos de alta masa molecular y alcoholes trihidroxilados como el propanotriol, glicerol o glicerina. Los glicéridos pueden presentar un grupo hidróxilo eterificado, denominados monoacilglicérido, diacilglicérido cuando presentan dos grupos hidróxilos eterificados y triacilglicérido, cuando se eterificaron los tres grupos hidróxilos.

Figura 1. Moléculas de diferentes tipos de glicéridos.



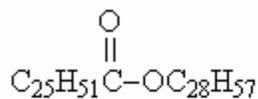
Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9rido>

Los glicéridos cuando presentan cadenas carbonadas saturadas reciben la denominación de grasas, todos los átomos de carbono presentan hibridación sp^3 , excepto el carbono del grupo funcional (éster), por lo que se deduce que los ácidos grasos presentes en estas estructuras son de cadenas saturadas.

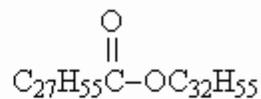
2.2.1.2 Ceras

Las ceras son mezclas de ésteres de alta masa molecular, constituidas por ácidos grasos y alcoholes monohidroxilados, son abundantes en la naturaleza, las mismas pueden ser obtenidas de fuentes animales y plantas ejemplos de ellas tenemos la cera de abeja, la cera de carnauba, la lanolina, en los árboles forestales se puede encontrar la cera del follaje de conífera y de varios tipos de latifolias.

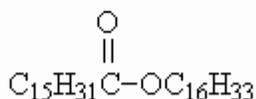
Figura 2. Moléculas de ceras animales y vegetales



cera de oveja.



cera de carnauba.



cera de plantas.

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>

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 número 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 más dobles enlaces). 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.

2.2.1.3 Jabones

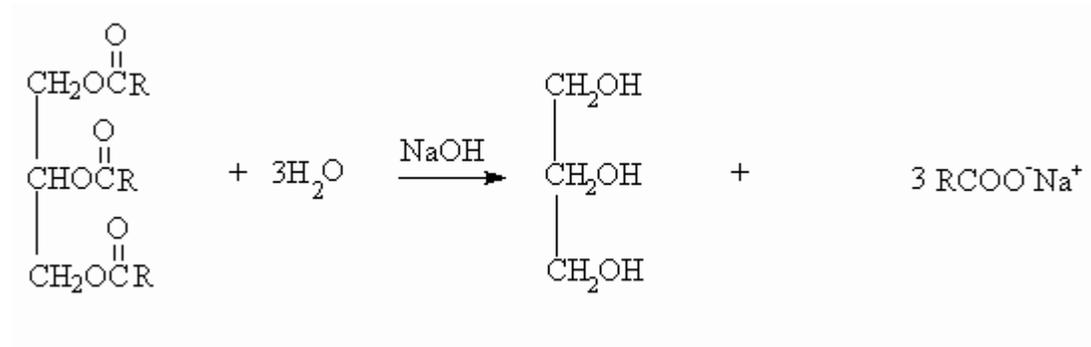
El jabón es una mezcla sales de metales alcalinos (usualmente sales de sodio), provenientes de ácidos de 16 a 18 átomos de carbono, pero pueden contener sales de sodio de ácidos carboxílicos de baja masa molecular.

Se estima que el jabón fue descubierto por los fenicios, otros atribuyen este descubrimiento a los antiguos egipcios; se supone que data del año 600 A.C., se conoce también que tribus teutónicas hacían el jabón pero se

desconocía su acción limpiante, estos datos fueron publicados por Julio César, no obstante estos descubrimientos fueron olvidados, no fue hasta el Renacimiento que el jabón fue redescubierto. Su utilización con los fines actuales data del siglo XVIII.

La preparación o manufactura del jabón no ha variado mucho, se usan las mismas técnicas que antiguamente, se trata la grasa o aceite con disolución de NaOH al 40%, mediante la reacción conocida como Saponificación, entonces se produce la hidrólisis de los triglicéridos formando ácidos grasos y glicerol o glicerina los ácidos se convierten en sales en presencia de una base.

Figura 3. Molécula del triglicérido glicerol sal de ácidos grasos



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Jabones>

2.2.1.4 Detergentes

Los detergentes sintéticos comenzaron a utilizarse después de la II guerra mundial y la estructura química es muy diferente a la del jabón (sales sódicas de ácidos grasos), los mismos son sulfonatos o sulfatos de sodio de cadenas largas (doce o más átomos de carbono); los mismos presentan las ventajas de no precipitar con los iones metálicos presentes en el agua dura.

Figura 4. Reacción para obtener detergente



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>

Los jabones y detergentes pertenecen al grupo de compuestos conocidos como surfactantes; los cuales pueden disminuir la tensión superficial del agua, pero deben presentar una parte de la molécula hidrófoba (varias cadenas de hidrocarburos) y una terminación hidrofílica (usualmente, pero no necesariamente iónica).

Los surfactantes pueden ser clasificados en aniónicos, catiónicos o neutrales en dependencia de la naturaleza de los grupos hidrofílicos. Los jabones son surfactantes aniónicos debido a la presencia del anión carboxilato, un ejemplo de surfactante catiónico es el cloruro de benzalconio (cloruro de N-bencil amonio cuaternario). Los surfactantes neutrales contienen grupos polares los cuales pueden interactuar con el agua a través de los enlaces por puente de hidrógeno.

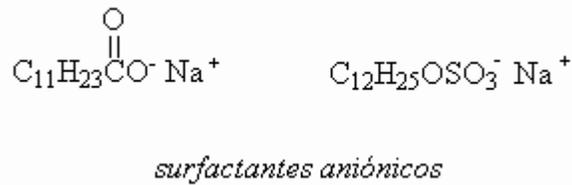
Figura 5. Molécula de surfactante natural



surfactante neutral

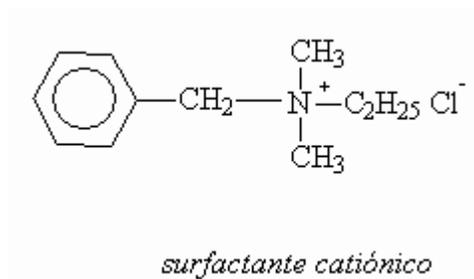
Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>

Figura 6. Molécula de surfactante aniónico



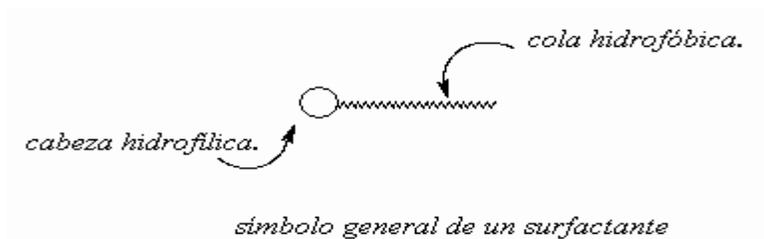
Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>

Figura 7. Molécula de surfactante catiónico



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>

Figura 8. Símbolos de un surfactante



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>

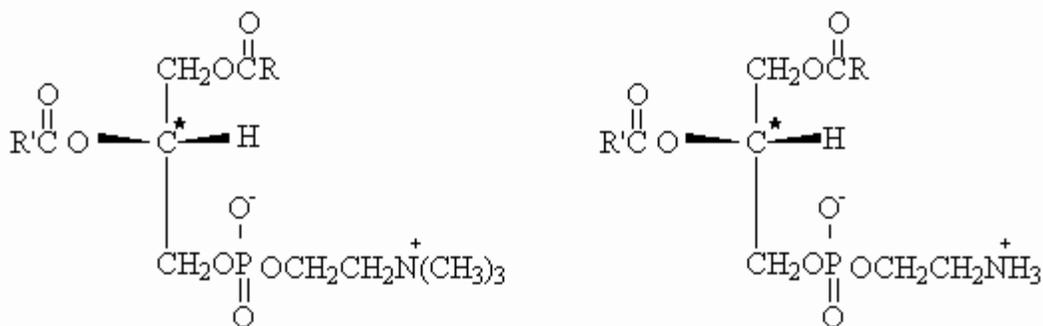
Los surfactantes disminuyen la tensión superficial del agua debido a que destruyen los enlaces de hidrógeno en la superficie del agua, esto es debido a la posición que ocupan las cabezas hidrofílicas sobre la superficie del agua y sus colas hidrofóbicas se extienden fuera de la superficie del agua.

2.2.1.5 Fosfolípidos

Los fosfolípidos son lípidos hidrolizables, debido a que contienen la función éster y son lípidos compuestos debido a que rinden por hidrólisis glicerol, ácidos orgánicos grupos fosfatos y otros compuestos. Estos compuestos usualmente contienen dos grupos ésteres formado por ácidos grasos y un enlace éster con el grupo fosfato en el átomo de carbono tres.

La particularidad de los fosfoglicéridos es que sus moléculas contienen dos largas cadenas hidrofóbicas y un grupo hidrofílico altamente polar (un grupo que constituye un ión dipolar). Los fosfoglicéridos son por esta razón surfactantes neutrales.

Figura 9. Moléculas de fosfolípidos

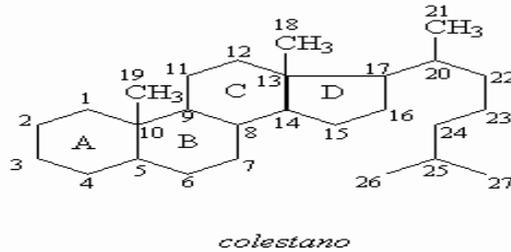


Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Fosfol%C3%ADpido>

2.2.1.6 Esteroides

Los esteroides son lípidos no hidrolizables, no saponificables en general, que contienen una estructura química muy particular, presentando cuatro anillos condensados, designados por A, B, C, D. Los átomos de carbono son enumerados como se muestra en la estructura siguiente.

Figura 10. Molécula del colestano.



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Colesterol>

Muchos esteroides pueden ser considerados como derivados del colestano.

Los esteroides pueden ser encontrados en casi todos los tejidos de los organismos vivos. Muchos esteroides actúan como hormonas en animales y el hombre.

Dentro del grupo de esteroides el colesterol es un importante componente de las membranas celulares en los animales superiores y es un intermediario necesario en la biosíntesis de hormonas esteroidales. Sin embargo este puede ser sintetizado a partir del acetil coenzima A, y no es necesario como suplemento en la dieta. Altos niveles de colesterol en sangre está asociado con la aterosclerosis (endurecimiento de las arterias).

2.2.1.7 Lípidos isoprenoides

Los lípidos isoprenoides se clasifican en terpenos y terpenoides, considerándose como derivados del isopreno, sin embargo ellos son divisibles en unidades de isopreno, de forma natural ellos se biosintetizan en las plantas a partir del pirofosfato de isopentenilo. Son abundantes en las plantas, en la actualidad se conocen alrededor de 22 000 compuestos diferentes, aunque existen muchos de estructuras desconocidas.

Características estructurales. Terpenos y terpenoides

Los compuestos terpénicos son sustancias extraparietales, que no constituyen parte de la pared celular, obtenidas del tejido de los vegetales y plantas superiores lignificadas, con solvente de baja polaridad; constituyen la fracción lipídica no hidrolizable, sin embargo algunos de ellos pueden saponificarse para obtener sales de sodio. Desde el punto de vista químico son estructuras derivadas del 2-metil 1,3- butadieno (isopreno).

Los lípidos isoprenoides se clasifican en terpenos y terpenoides. Los terpenos son hidrocarburos saturados y no saturados, cíclicos y acíclicos, mientras que los terpenoides poseen cadenas hidrocarbonadas pero exhiben la presencia de grupos funcionales (hidróxilo, carbonilo, carboxilo), las cadenas pueden ser cíclicas y anillos condensados).

2.3 Índice de Acidez

Índice de acidez total (TAN) : Es la cantidad de base, expresada en mgKOH, necesaria para neutralizar 1 gramo de producto. Índice de acidez fuerte (SAN) : Es la cantidad de base, expresada en mgKOH, necesaria para neutralizar los ácidos fuertes presentes en 1 gramo de producto mediante extracción con agua o ebullición, correspondiendo este valor a la acidez mineral. Índice de basicidad (TBN) : Es la cantidad de ácido, expresada en mgKOH, necesaria para neutralizar los componentes básicos fuertes presentes en 1 gramo de producto.

Tabla I. Algunos ácidos grasos comunes en forma aniónica.

Nombre	Denominación*	Nombre IUPAC	Formula molecular	Punto de Fusión °C
Laurato	C12:0	Dodecanoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COO}^-$	44
Miristato	C14:0	Tetradecanoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COO}^-$	52
Palmitato	C16:0	Hexadecanoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COO}^-$	63
Estearato	C18:0	Octadecanoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}^-$	70
Araquidato	C20:0	Eicosanoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COO}^-$	75
Palmitoleato	C16:1	cis- Δ^9 -Hexadecenoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COO}^-$	-0.5
Oleato	C18:1	cis- Δ^9 -Octadecenoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COO}^-$	13
Linoleato	C18:2	cis,cis- $\Delta^{9,12}$ -Octadecadienoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_2(\text{CH}_2)_6\text{COO}^-$	-9
Linolenato	C18:3	todo cis- $\Delta^{9,12,15}$ -Octadecatrienoato	$\text{CH}_3\text{CH}_2(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_3(\text{CH}_2)_6\text{COO}^-$	-17
Araquidonato	C20:4	todo cis- $\Delta^{5,8,11,14}$ -Eicosatetraenoato	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4(\text{CH}=\text{CHCH}_2)_4(\text{CH}_2)_2\text{COO}^-$	-49

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

2.4 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.

2.5 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 fisicoquímicas y por la cantidad en la que se encuentran dentro de la misma.

2.5.1 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, aldehídos, 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.

2.5.2 Aceites fijos

Los aceites fijos de plantas vegetales 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, 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 equipos llamados *expeller's* 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 fijos 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 oleína (aceites de cocina), modificados (grasas para repostería o

confitería) o en emulsiones (margarina). Un aceite puede volverse una manteca 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.

2.5.2.1 Aceite de palma africana

El aceite de palma africana se obtiene de su fruta, las semillas se plantan en viveros y luego las plántulas son transplantadas. Las plantaciones de palma comienzan a producir frutos a los 4-5 años de implantadas mediante el uso de variedades seleccionadas y clonadas y alcanzan su mayor producción entre los 20 y 30 años, luego de lo cual declinan y dejan de ser rentables, especialmente por la altura a la que se encuentran los frutos. Los racimos, que pesan unos 15-25 kilos, están conformados por unos 1000 a 4000 frutos de forma ovalada, de 3 a 5 cm de largo.

Una vez cosechados, la parte carnosa de los frutos es transformada mediante diversos procesos en aceite, en tanto que de la nuez se extrae el aceite de palmiste. El procesamiento del aceite crudo resulta en dos productos diferentes: 1) La estearina de palma y 2) La oleína de palma. La estearina (sólida a temperatura ambiente) es destinada casi exclusivamente a usos industriales, tales como cosméticos, jabones, detergentes, velas, grasas lubricantes), en tanto que la oleína (líquida a temperatura ambiente), es

utilizada exclusivamente como comestible (aceite para cocinar, margarinas, cremas, confitería).

Cada hectárea de palma aceitera, produce 10 toneladas anuales de frutos de los cuales se extrae 3 mil kilogramos de aceite de palma y 750 kg de aceite de palmiste. Existen proyectos para producir masivamente combustible biodiesel a partir del aceite de palma.

El aceite de palma contiene 43% de grasa monosaturada y 13% poliinsaturada y además vitamina K y Magnesio. El derivado de la especie americana *E. oleífera* se caracteriza por contener mayor concentración de ácido oleico y linoléico así como menor concentración de ácido palmítico y otros saturados.

Tabla II. Composición porcentual de los ácidos grasos más abundantes en el aceite de palma.

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

Acido Graso	%
Mirístico (C14:0)	1.1
Palmitico (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. Pag. 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.

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

Figura 11. Fruto y aceite crudo extraído de la palma africana



Fuente: www.tisr.com.tl.

2.6 Bio-combustibles

Son bio-combustibles aquellos productos químicos orgánicos obtenidos del procesamiento de biomasa y que son utilizados como combustibles. En algunos casos, 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 bio-combustibles 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 CO₂, 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.

2.6.1 Obtención de bio-combustibles

Para la obtención de bio-combustibles, 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: biogás e hidrógeno
- Líquidos: aceites vegetales, bioetanol y biodiesel

2.6.2 Biodiésel

El biodiésel es un bio-combustible líquido muy similar en propiedades al aceite diésel, pero obtenido a partir de productos renovables, los aceites

vegetales y las grasas animales. El biodiésel puro es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilice en la transesterificación.

Las primeras pruebas técnicas con biodiésel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero solo hasta el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME. Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles. En su producción se destacan instituciones como: BDP (*Bioenergy Development Program of Canadá*), PORIM (*Palm Oil Research Institute of Malasia*), *COPERATIVE ASPERHOFEN* - Austria y CENPES/DIPROD del Brasil; en investigación y ensayo son líderes las universidades de Missouri, Iowa, Illinois e Idaho en los Estados Unidos, Saskatchewan en Canadá, Göttingen en Alemania y Graz en Austria, además de las instituciones: NBB (*National Biodiesel Board*), DOE (*US Department of Energy*), USB (*United Soybean Board*) y FPRF (*Fats and Proteins Research Foundation*).

2.6.3 Principales Emisiones del Aceite Diésel

El aceite diésel o ACPM (Aceite Combustible Para Motores Diésel), es un destilado medio obtenido en la destilación atmosférica del petróleo crudo, en tal forma que su índice de cetano, el cual mide la calidad de ignición, sea de 45 como mínimo.

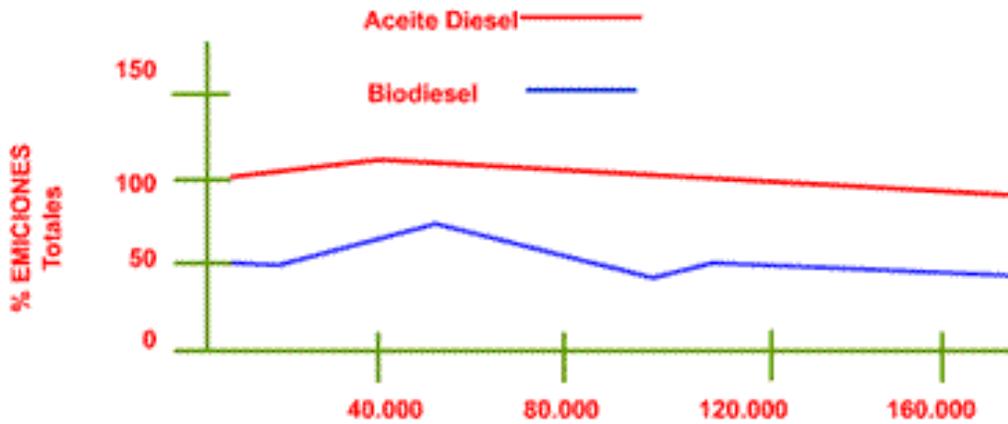
Las principales emisiones generadas por los sistemas de compresión - ignición (máquinas diesel), son :

- Hidrocarburos (HC)
- Óxidos de Nitrógeno (NOx)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Partículas (Pt)
- Óxidos de Azufre (SOx)
- Dióxido de Carbono (CO₂)

2.6.4 Comparación Promediada de las Emisiones del Biodiésel Mezclado y el Aceite Diésel

Los estudios realizados para comparar las emisiones del biodiésel y el aceite diésel los llevaron a cabo la Universidad de Idaho y la compañía alemana Mercedes Benz en 1994. Los ensayos realizados fueron con mezclas al 20 % de RME (*Rapeseed Methyl Ester*), PME (*Palm Methyl Ester*) y SBME (*Soybean Methyl Ester*), mientras que el combustible utilizado por la Mercedes Benz fue una mezcla al 20 % de RME. De éstos estudios se concluyó lo siguiente: los niveles de hidrocarburos se pueden llegar a reducir con el biodiésel hasta en un 47 %, el monóxido de carbono en un 12 %, el dióxido de carbono en un 50 %, las partículas o smoke en un 72 % y los óxidos de azufre en un 99 %; el estudio demostró un cambio que los óxidos de nitrógeno aumentaron hasta en un 6 %, con el uso de biodiésel en comparación con el aceite diésel.

Figura 12. Emisiones Producidas por un auto Mercedes Benz cada 40.000 km recorridos, utilizándose como combustible RME al 20% y aceite diésel. (las emisiones del aceite diésel equivalen al 100%).



Fuente: www.biodiesel.org

3. METODOLOGÍA

3.1 Localización

La parte experimental de la investigación se llevo a cabo en las siguientes instalaciones:

- 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 las pruebas a nivel laboratorio y planta piloto para la obtención de biodiésel.
- Laboratorio Técnico de la Sección de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas. En este lugar se llevo a cabo los análisis de laboratorio según norma ASTM 6751 (estándar del biodiésel) para la determinación de las propiedades y acreditación de uso del biodiésel como combustible.
- Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la Escuela de Mecánica y parqueo de catedráticos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En estos lugares se comprobó el funcionamiento del biodiésel llegando a utilizar hasta cien por ciento biodiésel y tomando mediciones de las revoluciones por minuto producidas por el motor.

3.2 Recursos Humanos

Investigador: Br. Nelson Darío Barraza López

Asesor: Ing. Q. José Eduardo Calderón.

3.3 Recursos materiales

Para cada experimento:

Crudo de aceite de palma africana (*elaeis guineensis*)

- Hidróxido de sodio.
- Alcohol etílico
- Alcohol metílico
- Agua potable
- Ácido sulfúrico al 97%.

3.4 Equipo y Cristalería

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

- Beacker de 2000 mL
- Beackers de 50, 100, 250, 600 mL
- Varilla de Agitación
- Vidrios de Reloj
- Espátulas
- Balanza analítica
- Probetas de 100 y 50 ml
- Rotaevaporador
- Bomba de vacío
- Plancha eléctrica con agitación magnética
- Termómetros de 120 C
- Ampolla de decantación de 2000 mL
- Mangueras de caucho
- Agitadores magnéticos

- Pinzas
- Mascarilla para gases nocivos
- Campana de Extracción
- Guantes de latex.

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

- Reactor de acero inoxidable
- Caldera
- Eyector
- Marmita de rectificación o destilación
- Intercambiador de calor de la marmita de rectificación o destilación
- Tanque recuperador de solvente.

3.5 Metodología experimental

La obtención de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana es factible por lo que no necesita de un proceso de refinamiento y dependiendo del proceso o método a utilizar se usa calor y también en ausencia del mismo. El aceite crudo a temperatura ambiente esta en un estado sólido o semisólido la cual al momento de ser introducido al reactor puede causar problemas con el eje de agitación y el rodete por lo tanto se trata el aceite crudo de palma africana calentando por 3 a 5 minutos llegando a una temperatura de 40 y 50 grados centígrados.

El biodiésel a partir del aceite crudo de palma africana se obtiene, primero esterificando los ácidos grasos por medio del alcohol (etanol) y utilizando como promotor ácido sulfúrico y calor dando como resultado ésteres y

agua, se efectúa la separación de ésteres y se transesterifican de nuevo los ésteres por medio de un álcali como promotor (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) para obtener la máxima conversión en la reacción y un rendimiento adecuado de producto deseado y sólo transesterificación directa utilizando hidróxido de sodio como promotor y metanol sin ayuda de calor en el avance de la reacción.

3.6 Descripción del método

Los procesos para producir biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana son los siguientes:

3.6.1 Esterificación-transesterificación del aceite crudo de palma africana

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

La reacción de esterificación, mejor conocida como esterificación de Fischer, es sólo la primera de dos etapas necesarias para la conversión del aceite en biodiésel. 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 primera etapa de este proceso es la etapa de esterificación o etapa ácida. El proceso comienza colocando el aceite tratado en un beacker (a nivel

laboratorio) o en el reactor (a nivel planta piloto), donde se calienta, se agita y se mezcla con el etanol y ácido sulfúrico. Después de cumplido el tiempo de agitación y calentamiento, se deja en reposo y se introduce toda la mezcla en un recipiente para poder separar las dos fases. Se separa la fase pesada que son ésteres y parte de ácidos grasos no esterificados y se coloca en un beacker o recipiente. La segunda etapa de este proceso es la etapa de transesterificación o etapa básica. Se prepara el etanol con el hidróxido de sodio hasta que se forme el etóxido o simplemente por observación cuando todo el hidróxido este consumido. La fase pesada se introduce en el beacker con una agitador magnético (a nivel laboratorio) o en el reactor (a nivel planta piloto) y se mezcla con el etóxido agitando sin adicionar calor hasta que se completa la reacción. La mezcla ya completada su reacción se agrega agua en una proporción agitando por cinco minutos y se decanta separando la fase pesada (agua, etanol sin reaccionar jabones y glicerina) y la fase liviana (biodiésel). La fase liviana (biodiésel) se efectúan tres lavados y se calienta por diez minutos para eliminar trazas de agua o etanol presente en el mismo y la fase pesada se introduce en el rotaevaporador (a nivel laboratorio) o marmita de destilación o rectificación (a nivel planta piloto), separando todo el etanol presente. La mezcla sin etanol presenta un estado semisólido llegando estabilizarse con la temperatura ambiente presentándose en un estado sólido. La mezcla sólida se le efectuó el proceso de saponificación produciendo jabón.

3.6.2 Transesterificación del aceite crudo de palma africana

En la reacción de transesterificación directa del aceite con un promotor básico, como hidróxido de sodio. 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 hidróxilo del alcohol en sustitución de los residuos acilo grasos.

El proceso de transesterificación es directo sin ayuda de calentamiento. Se prepara el metóxido la cual es una mezcla de metanol con hidróxido de sodio y se agita hasta que se consuma todo el hidróxido de sodio. Se introduce el aceite tratado en un beacker (a nivel laboratorio) o en el reactor (a nivel planta piloto) y se mezcla con el metóxido sin adicionar calor hasta que se complete la reacción. Se deja reposar la mezcla, se separa la fase liviana biodiésel y la fase pesada (metanol sin reaccionar, jabones, glicerina etc). La fase liviana (biodiesel) se efectúan tres lavados y se calienta por diez minutos para eliminar trazas o metanol presente en el mismo y la fase pesada se introduce en el rotaevaporador (a nivel laboratorio) o marmita de destilación o rectificación (a nivel planta piloto), separando todo el metanol presente. La mezcla sin metanol presenta un estado semisólido llegando estabilizarse con la temperatura ambiente, presentándose en un estado sólido. La mezcla sólida se le efectuó el proceso de saponificación produciendo jabón.

4. RESULTADOS

Tabla III. Resultados del primer proceso (esterificación-transesterificación) a nivel laboratorio con un volumen de lote de 300 mL y 1 % en masa de ácido sulfúrico para la obtención de biodiésel de aceite crudo de palma africana y sus subproductos.

%exceso de etanol	mL de aceite	mL etanol	g de NaOH (2% masa)	mL etanol residual	g de jabón	% masa de jabón	mL de biodiésel	g de biodiésel / g de jabón	% conversión en masa	% conversión en volumen
100	251.33	88.36	4.62	-	-	-	-	0	-	-
200	251.33	132.54	4.62	-	-	-	-	0	-	-
300	251.33	176.72	4.62	14.61	78	34.4	150	1.67	57.16	59.68
400	251.33	220.89	4.62	15.22	77	34.04	155	1.75	59.08	61.67
500	251.33	265.07	4.62	27.80	68	30.06	156	2.00	59.45	62.06
600	251.33	307.31	4.62	31.62	65	28.73	160	2.14	62.63	63.66
700	251.33	353.43	4.62	27.11	58	25.6	175	2.63	66.69	69.62
800	251.33	397.61	4.62	33.46	52	22.9	180	3.01	68.59	71.61
900	251.33	441.79	4.62	94.62	70	30.9	125	1.55	47.63	49.73
1200	251.33	560.26	4.62	177.21	90	39.7	75	0.72	28.58	29.84

Figura 13. Relación de los gramos de biodiésel / jabón vrs volumen en exceso de etanol para el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio.

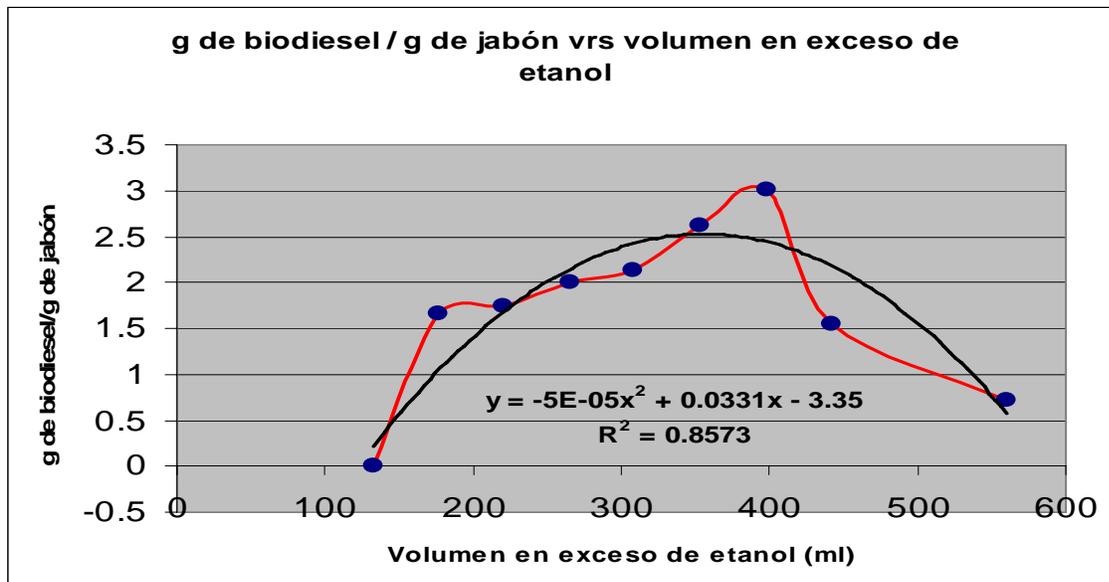


Tabla IV. Resultados del segundo proceso (transesterificación) a nivel laboratorio con un volumen de lote de 300 mL para la obtención de biodiésel de aceite crudo de palma africana y sus subproductos.

%exceso de metanol	mL de aceite	mL metanol	g de NaOH (2% masa)	mL metanol residual	g de jabón	% masa de jabón	mL de biodiésel	g de biodiésel/g de jabón	% conversión en masa	% conversión en volumen
100	251.33	88.36	4.62	-	-	-	-	0	-	-
200	251.33	132.54	4.62	-	-	-	-	0	-	-
300	251.33	176.72	4.62	-	-	-	-	0	-	-
400	251.33	220.89	4.62	-	-	-	-	0	-	-
500	251.33	265.07	4.62	-	-	-	-	0	-	-
600	251.33	307.31	4.62	1.07	53	23.87	200	3.29	76.21	80
700	251.33	353.43	4.62	36.36	65	28.73	160	2.14	60.97	63.66
800	251.33	397.61	4.62	22.35	54	30.5	185	2.98	70.5	73.62
900	251.33	441.79	4.62	162.29	100	44.20	50	0.43	19.05	19.89

Figura 14. Relación de los gramos de biodiésel / jabón vrs volumen en exceso de metanol para el proceso de transesterificación a nivel laboratorio.

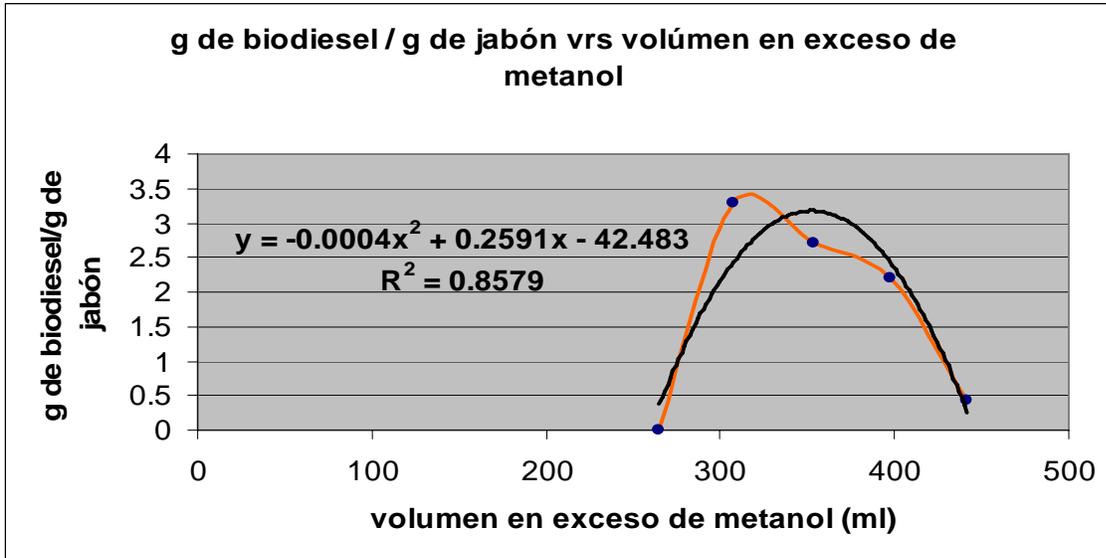


Tabla V. Resultados obtenidos, en unidades de rpm (revoluciones por minuto) para diferentes mezclas de biodiésel / diésel, para las pruebas realizadas en un motor estacionario de combustión interna con biodiésel obtenido a partir de aceite crudo de palma africana

No	Mezcla	RPM
0	B00	1426
1	B10	1550
2	B20	1600
3	B30	1650
4	B40	1710
5	B50	1720
6	B60	1750
7	B70	1800
8	B80	2000
9	B90	2450
10	B100	2562

Figura 15. Revoluciones por minuto vrs mezcla de biodiésel / diésel realizadas en un motor estacionario de combustión interna marca DEUTZ de un pistón.

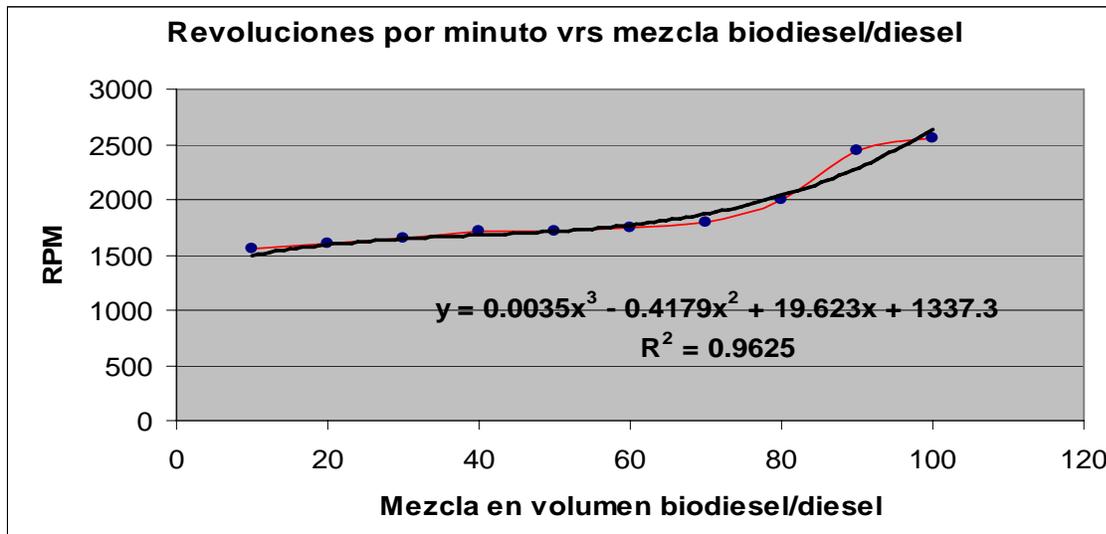


Tabla VI. Propiedades y características del biodiésel obtenido mediante transesterificación.

Propiedad	Resultado
Densidad (g/mL a 21 °C)	0.872
Índice de Refracción (a 21 °C)	1.565

Tabla VII. Resultado de la obtención y sus subproductos de biodiésel por el proceso de esterificación-transesterificación a nivel planta piloto.

% exceso de etanol	L de aceite	L etanol	kg de NaOH (2% masa)	L etanol residual	kg de jabón	% masa de jabón	L de biodiésel	kg de biodiésel / kg de jabón	% conversión en masa	% conversión en volumen
800	25.133	30.31	0.462	2.90	5.20	20.86	17.5	2.93	67.54	69.62

Tabla VIII. Resultado de la obtención y sus subproductos de biodiésel por el proceso de transesterificación a nivel planta piloto para usarlo en un motor estacionario de combustión interna.

% exceso de metanol	L de aceite	L metanol	kg de NaOH (2% masa)	L metanol residual;	kg de jabón	% masa de jabón	L de biodiésel	kg de biodiésel / kg de jabón	% conversión en masa	% conversión en volumen
600	25.133	30.31	0.462	2.3	6.10	23.65	19.42	3.23	74.86	77.26

Tabla IX. Comparación de los resultados del análisis de biodiésel obtenido por los dos procesos esterificación-transesterificación y transesterificación a nivel planta piloto con el diésel comercial No. 2-D.

Descripción	Método de análisis ASTM	Resultado de biodiésel (Esterificación-transesterificación)	Resultado de biodiésel (Transesterificación)	Especificación Diésel No. 2-D
Punto de inflamabilidad (C)	D-93	112	134	52 min.
Azufre (% en masa)	D-129	0.03	0.02	0.5 máx.
Corrosión en la tira de cobre	D-130	1	1	No.2 máx.
Gravedad API (API)	D-287	31.0	30.8	Repotar
Viscosidad Cinemática (mm/s)	D-445	4.8	4.6	1.9 m ⁱ – 4.1 máx.
Ceniza (%)	D-482	0.006	0.001	0.01 máx.
Índice de Cetano	D-976	50	51	45 min.
Agua y sedimento (% volumen)	D-1796	0	0.05	0.05 máx
Destilación (C) 90% recuperado	D-86	360	362	282 min. – 360 máx.

Fuente: Resultado de análisis, Laboratorio de Hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas. Ver Anexos.

Tabla X. Comparación de la máxima relación experimental de los gramos de biodiésel respecto a los gramos de jabón generados por los procesos de esterificación-transesterificación y solo transesterificación a nivel laboratorio y planta piloto.

g de biodiésel / g de jabón		Nivel Laboratorio	Nivel Planta Piloto
Proceso	Esterificación – Transesterificación	3.01	2.93
	Transesterificación	3.29	3.23

Tabla XI. Comparación de la máxima relación teórica según ecuaciones de las figuras 12 y 13 ($y = -5E-05x^2 + 0.0331x - 3.35$ para esterificación-transesterificación, $y = -0.0004x^2 + 0.2591x - 42.483$ para transesterificación donde “y” es la relación gramos de biodiésel / gramos de jabón y “x” es la cantidad de alcohol en exceso) de los gramos de biodiésel respecto a los gramos de jabón generados por los procesos de esterificación-transesterificación y solo transesterificación a nivel laboratorio y planta piloto.

g de biodiesel / g de jabón		Nivel Laboratorio	Nivel Planta Piloto
Proceso	Esterificación - Transesterificación	2.5	2.76
	Transesterificación	2.72	2.93

5. DISCUSIÓN RESULTADOS

En la investigación para realizar este trabajo se evaluó, efectuó, analizó, comparó y se llevó a cabo la conversión del aceite crudo de palma africana a biodiésel, mediante dos procesos, esterificación-transesterificación y sólo transesterificación. La primera etapa (etapa ácida) del primer proceso se adicionó calor a la reacción y en la segunda etapa del primer proceso (etapa básica) no se adicionó calor, usando etanol en ambas etapas. El segundo proceso se usó metanol sin adición de calor ya que es una reacción directa.

El primer proceso (esterificación-transesterificación) se llevaron a cabo varios experimentos a nivel laboratorio, modificando variables de proceso por ejemplo: el volumen de aceite crudo de palma africana, exceso de etanol y volumen del lote. Las cantidades en volumen o masa de las variables anteriormente descritas fueron resultado de un balance masa de toda la reacción de esterificación-transesterificación y solo transesterificación llegando a la automatización del balance de masa (Ver Anexos figura 17 página 65).

En los primeros experimentos del proceso para obtener biodiesel a partir de aceite crudo de palma africana por esterificación-transesterificación eran erróneos y no deseados ya que no se llevaba a cabo la reacción, se saponificaba o se formaba un polímero muy duro grasoso (Ver Anexos figura 16 página 64). El problema fue debido al exceso de promotor (NaOH) en la segunda etapa y una cantidad sin exceso de etanol, llegando a una proporción en volumen 1:1 aceite crudo-etanol. La primera obtención de biodiésel esterificando y seguidamente transesterificando fue con un exceso de etanol de 300% , con 1% de ácido sulfúrico y 2% de hidróxido de sodio en masa

respectivamente, se obtuvo 150 mL de biodiésel (Ver sección Apéndice datos originales Tabla X página 59).

La primera etapa del primer proceso se llevó a cabo la catálisis ácida o reacción ácida en la cual los ácidos grasos se esterifican en una proporción adicionando calor, etanol y ácido sulfúrico. En la mezcla de los reactivos, se apreció un notable cambio de color de rojo a café oscuro en un tiempo de 10 minutos después de comenzada la etapa, indicando la rotura de la molécula del ácido graso para la formación del éster (Ver anexos figura 18 página 65). El tiempo de reacción fue de 30 minutos ya que pasado de dicho tiempo ya no cambió de color la reacción. La temperatura de la mezcla fue de 50 a 55 grados centígrados, si se trabaja a temperaturas mayores a la indicada el etanol será evaporado por el aceite debido a su bajo punto de ebullición (78 °C) y no se llevará a cabo la reacción. La mezcla se decanta observándose una fase pesada y una fase liviana (Ver Anexos figura 19 página 66). La fase pesada es la fase de interés, es una mezcla de ésteres y ácidos grasos no esterificados o generalmente una proporción de ésteres que se formaron con aceite crudo de palma africana que no reaccionó (Ver Anexos figura 20 página 66) y la fase liviana es etanol, agua y clorofila del aceite crudo de palma africana

La segunda etapa del primer proceso se llevó a cabo la catálisis básica o reacción básica. En esta etapa la fase pesada de la reacción de esterificación se vuelve a esterificar (transesterificación) logrando que los ésteres formados y los ácidos grasos no esterificados se esterifiquen por completo logrando conversiones de 57 a 68 por ciento en masa y un porcentaje en volumen de 59 a 71 (Ver sección de resultados tabla III página 31) de ésteres respecto al aceite crudo de palma africana.

La etapa de transesterificación no se adicionó calor y se mezcló la fase pesada producto de la primera etapa (esterificación) con un exceso de etanol y 2% en masa de promotor básico (NaOH) respectivamente. Se preparó el etóxido o alcóxido, que es una mezcla de hidróxido de sodio con etanol, hasta que todo el hidróxido de sodio se consuma por completo (Ver Anexos figura 21 página 67). Se mezcló el etóxido con la fase pesada producto de la esterificación observándose un cambio inmediato en la mezcla de café a rojo claro (Ver Anexos figura 23 página 67), es evidente que reaccionó instantemente. Toda la mezcla se dejó reaccionar por una hora la cual no se apreció cambio alguno.

Se ejecutaron nueve pruebas con excesos de etanol de 100 hasta 1,200 por ciento en masa. Cuando se trabajo con excesos de 100 y 200 por ciento de etanol en masa se formó un polímero con características semisólidas o sólidas y muy duro la cual no era el objetivo de la investigación. Con excesos de etanol de 300 a 1200 por ciento si se obtuvo biodiesel, llegando a optimizar el proceso con 800% en masa de exceso de etanol con un máximo de rendimiento de 68.59% en masa , 71.61 % en volumen y un mínimo de conversión 28.58% en masa y 29.84% en volumen (Ver sección resultados tabla III página 31).

Cuando se aumenta el porcentaje de etanol en exceso aumenta el rendimiento de la reacción para obtener ésteres (biodiésel), con el etóxido formado y un exceso de etanol se facilita la rotura de la molécula hasta que se llega a un máximo. La conversión de biodiésel a partir de un exceso de 900 a 1,200 por ciento es muy baja, debido a la basta cantidad de etóxido los ésteres se degradaron quedando solo un remanente de lo que era realmente.

El segundo proceso transesterificación del aceite crudo de palma africana fue directo sin adicionar calor. Se comenzó a trabajar con excesos de metanol

de 100 a 900 por ciento, con 2% en masa de promotor (NaOH) y con la ayuda del balance de masa automatizado anteriormente descrito. Las pruebas de 100 a 500 % de exceso de metanol no se obtuvo biodiésel, debido a la no interacción de los reactivos en la mezcla. En la mezcla se observó que al transcurrir una hora no se observaba una mezcla homogénea si no que una heterogénea. Al terminar el tiempo de reacción se dejó decantar, se observaron dos fases una fase pesada y una fase liviana. La fase pesada era el aceite crudo de palma africana que se midió anteriormente y la fase liviana era el metóxido. No hubo reacción entre ambos (Ver Anexos figura 22 página 68). La no obtención de biodiésel fue al no tener un exceso suficiente de metanol la cual al formarse el metóxido rompe la molécula del aceite crudo de palma africana para formar los ésteres deseados.

Con excesos de metanol de 600 a 900 por ciento en masa si se obtuvo biodiésel, ya que el exceso de metanol favoreció la reacción sin adicionar calor. Se dejaron reaccionar los componentes durante una hora la cual con un exceso 600% de metanol, 2% de promotor (NaOH) y 251.33 mL de aceite crudo de palma africana se obtuvo la mayor conversión del aceite crudo de palma africana a ésteres (biodiésel) que fue de 76.21% en masa y 80% en volumen (Ver sección de resultados tabla IV página 33).

Se siguió agregando más exceso de metanol pero se llegó a una declinación de obtención de biodiésel ya que al tener demasiado exceso de metanol y formar el metóxido este mismo degradaba la cantidad de ésteres presentes, produciendo un volumen mucho menor al deseado.

El procedimiento final del biodiésel obtenido en ambos procesos se efectuaron tres lavados. Los lavados arrastran todas las impurezas presentes en el biodiésel como ceras, algunos jabones, metanol o etanol sin reaccionar y

glicerina. Si no se efectúan los lavados en la mayoría de los casos al terminar la reacción comienza a formarse una especie grumosa especialmente en el primer proceso (esterificación-transesterificación) que hace la mezcla semisólida atrapando todo el biodiésel obtenido (Ver Anexos figura 24 página 68), por lo tanto lo mejor es efectuar tres lavados con agua para arrastrar dichas impurezas que impiden la obtención de biodiésel. Seguidamente después de los tres lavados de la obtención de biodiésel de ambos procesos se adiciona calor a dichos productos hasta llegar a un temperatura de 100 °C para quitar las trazas sobrantes de etanol o metanol, agua y otras impurezas de bajo porcentaje. Realizada la purificación de biodiésel quedan los productos de buena calidad y con una apariencia color rojo brillante y transparente (Ver Anexos Figura 25 y 26 páginas 71 y 72).

El residuo de los lavados no se desecho si no que se ejecutó una forma de poderlo utilizar o caracterizarlo. Se tomó la cantidad de lavado y se procedió a separar el metanol o etanol presente en la mezcla. Separado el metanol o etanol por completo la mezcla quedó con una apariencia semisólida , se dejó reposar en un beacker y transcurrido el tiempo al estabilizarse con la temperatura ambiente su apariencia fue dura pero con propiedades saponificables. Se tomó la cantidad sólida y se le efectuó el proceso para producir un jabón. La masa sólida se partió en trozos y se le adicionó calor en un horno de secado a una temperatura de 80 °C hasta que llegara al punto de lloríqueo, seguidamente se dejó reposar a temperatura ambiente quedando con una apariencia de jabón. Para acertar que era jabón, a tres estudiantes trabajadores de la planta piloto de extracción-destilación se untaron las manos aceite de carro en una pequeña cantidad la cual se lavaron las manos con el jabón obtenido dando como resultado la remoción del aceite. El porcentaje de jabón osciló entre 25 y 44% en masa según la cantidad de biodiésel obtenido y

exceso de metanol o etanol utilizado en ambos procesos (Ver sección resultados tabla III y IV páginas 31 y 33).

En el proceso de esterificación-transesterificación se trabajó con etanol y metanol, cuando se trabajó con metanol la mayoría de las pruebas no producía ninguna reacción y los componentes no interactuaban entre si quedando las mismas cantidades que estaban originalmente sin obtener de biodiésel. El proceso de esterificación-transesterificación es una reacción de dos etapas la cual se maneja la reactividad S_N1 (sustitución nucleofílica monomolecular), la reactividad de dicha reacción favorece a los alcoholes terciarios y secundarios, la razón de la reactividad son los factores estéricos o el impedimento estérico para llevar a cabo o completar la reacción (Ref.4 página 438), por lo tanto al trabajar con metanol que es un alcohol primario habrá un impedimento estérico que no dejara la formación del éster por lo tanto no hay reacción.

Se utilizó un gran exceso de etanol para favorecer la reacción y obtener la mayor conversión de aceite crudo de palma africana a ésteres (biodiésel). Wingrove explica porque el exceso de etanol “La reacción se lleva a cabo usando un gran exceso de alcohol con una pequeña cantidad de ácido sulfúrico como catalizador. El alcohol a menudo sirve como disolvente para la reacción, la reacción es reversible y la intervención del ácido sulfúrico es determinante en las condiciones de reacción para un equilibrio favorable” (Ref 4 página 1091).

El exceso de etanol es fundamental para que la reacción no sea reversible y se alcance el máximo de conversión de aceite crudo de palma africana a ésteres, esta muy ligada al principio de Le Chatelier que trata del efecto de la concentración en el equilibrio. El ácido sulfúrico es importante en la reacción para limitar la presencia de agua. Wingrove lo explica como “Una concentración

razonable de un catalizador de ácido sulfúrico o fosfórico puede emplearse en la reacción para limitar el agua, como el ión hidronio, a medida que se forma. Asimismo esto desplaza el equilibrio para favorecer la formación del éster” (Ref.4 página 1092).

El proceso de transesterificación sin la adición de calor se trabajó con etanol y metanol. Trabajando con etanol no se llevó a cabo la reacción, al contrario presentaba pruebas saponificables y productos indeseables incluso trabajando con un gran exceso. El proceso de transesterificación es una reacción de una sola etapa o bien directa, la cual se maneja con una reactividad S_N2 (sustitución nucleofílica bimolecular), la reactividad de dicha reacción favorece especialmente a los alcoholes primarios, ya que estos no presentan impedimento estérico (Ref.4 página 432).

El análisis de comparación de ambas reacciones con el exceso de alcohol en masa vrs volumen de biodiesel, se observó que el rendimiento y la cantidad de biodiésel obtenida es mucho mayor con el proceso de transesterificación respecto al proceso de esterificación-transesterificación. El proceso de esterificación-transesterificación se obtuvo biodiesel para un lote de 300 mL con un exceso de 300% hasta llegar a un máximo de 800% de etanol y la mayor cantidad de biodiésel fue de 180 mL. Al proceso se adicionó calor en la primera etapa y etanol en ambas etapas por lo tanto la cantidad de etanol es grande al utilizar en ambas etapas. El proceso de transesterificación se logró un máximo de obtención de biodiésel con una cantidad de 200 mL y un exceso de metanol de 600%, fue una reacción directa sin la adición de calor. Al comparar ambos procesos el mejor proceso para la obtención de biodiesel es el proceso de transesterificación ya que es una reacción directa sin el uso de calor, con una mayor obtención de biodiésel y una conversión de aceite crudo de palma africana a ésteres alta de 76.21% en masa y 80% en volumen.

Al definir las variables de proceso y elegir el mejor proceso para la obtención de biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana, se trabajó a nivel planta piloto, para llevar a cabo el análisis de laboratorio de hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas según norma ASTM 6751 y posteriormente la prueba en mezclas biodiésel / diésel en un motor estacionario de combustión interna. Los resultados de las pruebas a nivel laboratorio de ambos procesos realizadas por el Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas (Ver sección resultados tabla IX página 33) están sobre los parámetros de la norma y su acreditación para su uso (Ver anexos figuras 27 y 28 páginas 71 y 72).

Se usó biodiésel en mezclas de volumen biodiésel / diésel hasta llegar 100% biodiésel en un motor estacionario de combustión interna de la Escuela de Ingeniería Mecánica, y se observó un comportamiento directamente proporcional de las revoluciones por minuto generadas al aumentar la cantidad de biodiésel en la mezcla con diésel . Se llegó a un máximo de 2,562 revoluciones por minuto para una mezcla 100% biodiésel. Las emisiones del diésel automotriz fue de color negro respecto a las emisiones de las mezclas de biodiésel de color grisáceo y menos irritantes (Ver anexos figuras 29 página 73).

CONCLUSIONES

1. Se puede obtener biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana por ambos procesos de esterificación-transesterificación y sólo transesterificación.
2. El proceso de transesterificación es el más eficiente ya que la máxima relación de la cantidad de biodiésel y jabón generado es mayor que la cantidad generada por el proceso de esterificación-transesterificación.
3. El biodiésel obtenido en ambos procesos fue acreditado para usarlo en motores de combustión interna según comparación de la norma ASTM 6751 y el análisis de Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas.
4. Las revoluciones por minuto generadas por un motor de combustión interna respecto a las mezclas de biodiésel / diésel, presentó una forma cúbica según ecuación $y = 0.0035x^3 - 0.4179x^2 + 19.623x + 1337.3$ con un coeficiente de correlación de 0.9625.

RECOMENDACIONES

1. Comparar las variables de proceso para obtener biodiésel de aceite crudo de palma africana, respecto al aceite refinado oleína
2. Obtener biodiésel por medio de otros alcoholes por medio de una reacción ácida, adicionando calor para el proceso de transesterificación.
3. Evaluar la factibilidad de recuperación de subproductos como pigmentos, carotenoides o de otros residuos para obtener biodiésel puro.
4. Separar los jabones, glicerinas y otros subproductos para obtención de biodiésel por medio del método *“Salting Out”*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Direcció General de Hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas, República Guatemala. **Estadísticas de Hidrocarburos**, Año 2004. Guatemala.
2. Glab, Edgard. **Del yacimiento a la refinera. Presentación de la Industria Petrolera los medios de prensa e Guatemala**. Noviembre, 1994.
3. Seese, Williamirecci y William Daub. Química. 5a edición. México: Prentice-Hall, 1995. 209 pp.
4. Wingrove, Alan y Robert Caret. **Química Orgánica**. México: Oxford University Press, 1999. 432, 438, 1091, 1092p.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fessenden Ralf j., Fessenden Joan. S, Organic Marshall W. Logue. **An International Thomson Publishing.** Company, 1998.
2. Horton, H. Robert; Morán, Laurence A; Ochs Raymond S; Rawn, J. David; Scrimgeour K. Gray - México, D.F: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1995.
3. Mc. Murry, John. **Organic chemistry JTP. An International Thomson Compary** 1984.
4. Solomons, G."Química Orgánica" University of South Florida 1997.Stauffer, Clyde. **Fats & Oils.** Eagan Press Handbook Series. EEUU:Eagan Press, 1996. 50 pp.
5. O´Brien, Richard. **Fats and oils: Formulating and processing for applications.** EEUU: Technomic Publishing Company, Inc. 1998.
6. Weiss, Theodore. **Food Oils and their uses.** 2a edición. EEUU: AVI Publishing Company, 1983.
7. Friedman, Milton; Premio Nobel de Economía; citado en **“La Crisis Energética y nuestro futuro”**; por Bronstein Víctor; El País; Diario Clarín; 16 de Abril de 2006 Argentina.

Referencia electrónica

8. http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf.
9. <http://www.biodiesel.org>.
10. <http://www.monografias.com/trabajos31/lipidos/lipidos.shtml>.
11. <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>.
12. <http://www.tistr.or.th>.
13. <http://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADpido>

APÉNDICE A

Datos Originales

Tabla XII. Volumen de biodiésel y gramos de jabón obtenido a partir de aceite crudo de palma africana, por el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio para un lote de 300 mL.

Exceso de etanol %	Volumen de biodiésel mL		Jabón (g)		Etanol residual mL	
	CB1	CB2	CJ1	CJ2	CE1	CE2
100	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-
300	148	152	84	72	12	17.22
400	160	155	88	66	16	13.22
500	153	159	75	61	14	16.44
600	164	156	60	70	30	25.60
700	178	172	50	66	45	18.24
800	170	190	60	44	40	14.22
900	138	112	60	80	35	31.93
1200	100	50	70	110	160	194.42

Tabla XIII. Volumen de biodiésel y gramos de jabón obtenido a partir de aceite crudo de palma africana, por el proceso de transesterificación a nivel laboratorio para un lote de 300 mL

Exceso de Metanol %	Volumen de biodiésel mL		Jabón (g)		Metanol residual mL	
	CB1	CB2	CJ1	CJ2	CM1	CM2
100	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-
400	-	-	-	-	-	-
500	-	-	-	-	-	-
600	202	198	48	58	2	0.14
700	170	150	55	75	30.2	42.52
800	190	185	40	68	27.5	17.2
900	40	60	105	95	150.43	174.15

Tabla XIV. Revoluciones por minuto(RPM) para las diferentes mezclas biodiésel / diésel.

Combustible	RPM		
	C1	C2	Promedio
Diesel	1359	1493	1426
B10	1562	1290	1550
B20	1568	1532	1600
B30	1725	1475	1650
B40	1700	1600	1710
B50	1600	1820	1720
B60	1650	1790	1750
B70	1850	1750	1800
B80	1842	2158	2000
B90	1900	3000	2450
B100	2600	2524	2562

APÉNDICE B

Muestra de Cálculo

1. Cálculo de porcentaje en masa de la cantidad de jabón

% de jabón = g de jabón / g de aceite crudo de palma africana

$$\% \text{ de Jabón} = 78 \text{ g} / 220.46 \text{ g}$$

$$\% \text{ de jabón} = 34.4 \text{ *}$$

* Resultado del porcentaje de jabón para 300% de exceso de etanol en el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio. Procedimiento equivalente para las demás corridas.

2. Cálculo de la conversión en masa de biodiésel obtenido respecto la cantidad de aceite crudo de palma africana

% conversión en masa = Volumen de biodiésel (mL) x Densidad del biodiésel (g/mL) / Volumen de aceite crudo de palma (mL) x densidad del aceite(g/mL)

$$\% \text{ conversión en masa} = 150 \text{ mL} \times 0.872 \text{ g/mL} / 251.33 \text{ mL} \times 0.9 \text{ g/mL}$$

$$\% \text{ conversión en masa} = 57.16 \text{ *}$$

* % de conversión en masa de biodiésel con un exceso de etanol 300% para el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio. Procedimiento equivalente para las demás corridas.

3. Cálculo de la conversión en volumen de biodiésel obtenido respecto al volumen de aceite crudo de palma africana.

$$\% \text{ de conversión en volumen} = \text{Volumen de biodiésel (mL)} / \text{Volumen de aceite crudo (mL)}$$

$$\% \text{ de conversión en volumen} = 150 \text{ mL} / 251.33 \text{ mL}$$

$$\% \text{ de conversión en volumen} = 59.68 \text{ *}$$

* % de conversión en volumen de biodiésel con un exceso de etanol de 300% para el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio. Procedimiento equivalente para las demás corridas.

4. Cálculo de las revoluciones por minuto (RPM) promedio

$$\text{RPM promedio} = \text{RPM1} + \text{RPM2} / 2$$

$$\text{RPM promedio} = 1562 + 1290 / 2$$

$$\text{RPM promedio} = 1426 \text{ *}$$

* Revoluciones por minuto para el combustible diésel. Procedimiento equivalente para las demás corridas

5. Cálculo de la relación de gramo de biodiésel respecto a los gramos de jabón.

$$\text{g de biodiésel} / \text{g de jabón} = \text{Volumen de biodiésel (mL)} \times \text{Densidad de biodiésel} / \text{g de jabón.}$$

$$\text{g de biodiésel} / \text{g de jabón} = 150 \text{ mL} \times 0.872 \text{ g/mL} / 78 \text{ g}$$

$$\text{g de biodiésel} / \text{g de jabón} = 1.67$$

* Relación de los gramos de biodiésel respecto a los gramos de jabón para el proceso de esterificación-transesterificación.

APÉNDICE C

Figuras

Figura 16. Polímero de aceite crudo de palma africana



Figura 17. Balance de masa automatizado para obtener biodiésel para la reacción de esterificación-transesterificación y sólo transesterificación.

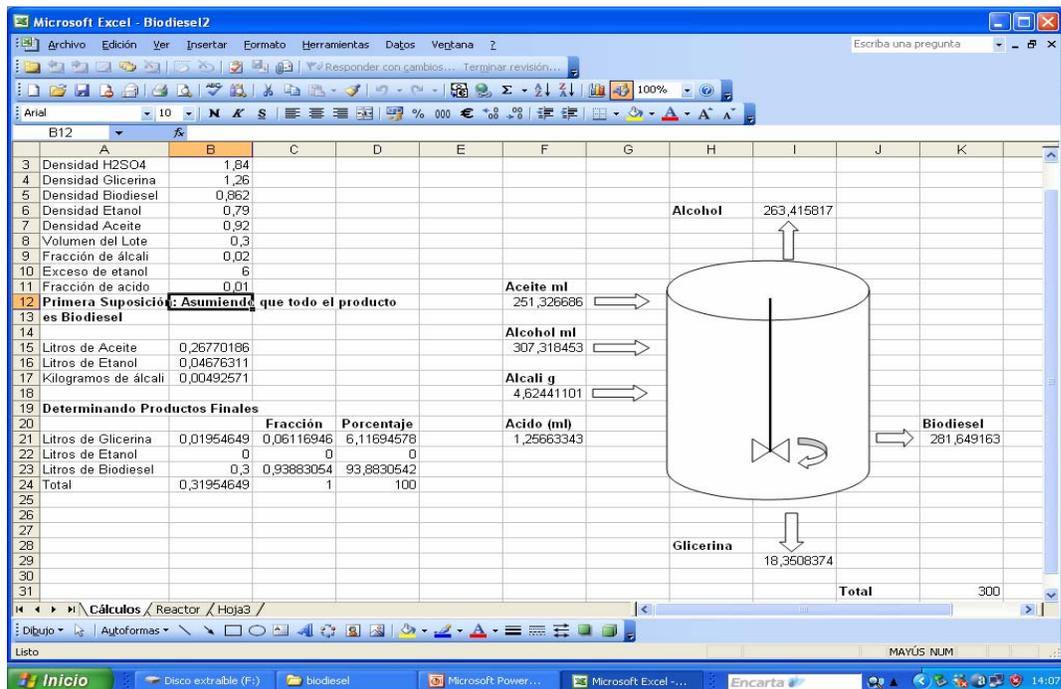


Figura 18. Reacción de esterificación etapa ácida.



Figura 19. Resultado de la esterificación fase pesada (ésteres y aceite sin reaccionar) y fase liviana etanol (clorofila del aceite crudo de palma africana).

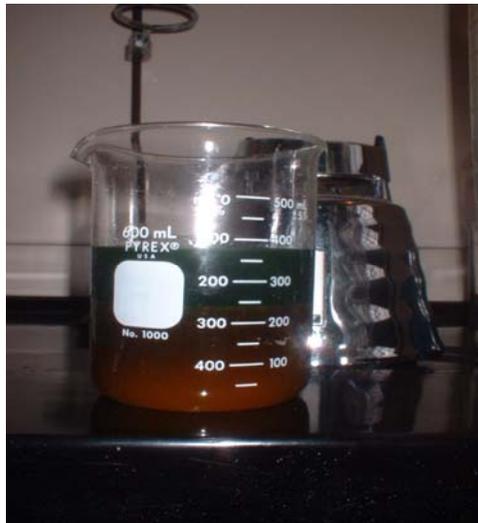


Figura 20. Comparación del aceite crudo de la fase pesada, fase liviana y el aceite crudo de palma africana.



Figura 21. Etóxido (alcóxido).



Figura 22. Cambio de color en la reacción de esterificación a transesterificación.



Figura 23. Mezcla después de una hora sin reaccionar en el proceso de transesterificación.



Figura 24. Biodiésel atrapado por fase grumosa



Figura 25. Biodiésel obtenido por el proceso de esterificación-transesterificación a nivel laboratorio.



Figura 26. Biodiésel obtenido por el proceso de transesterificación a nivel laboratorio

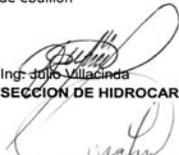
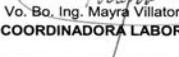


Figura 27. Resultados del análisis de laboratorio de hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas, para la muestra de biodiésel obtenido por el proceso de esterificación-transesterificación a nivel planta piloto.

LABORATORIO TECNICO		 PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-708-07 ORDEN No. L-297-07 GUATEMALA, 03-07-07		
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DE GUATEMALA				
RESULTADOS DE ANALISIS				
MUESTRA: Biodiesel PRESENTADA POR: Planta Piloto, Centro de Investigaciones RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido PROCEDENCIA: Muestra No. 1. Nelzon Barraza LOCALIZACION: Planta Piloto, Centro de Investigaciones FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 13-06-07 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 26-06-07 PRECIO DE ANALISIS: \$ 68.12 ANALISTA: Roderico Zapeta				
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)	
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93	-----	112	
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	-----	0.03	
CORROSION EN LA TIRA DE COBRE, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130	-----	1	
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(d) 39.98	
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	-----	31.0	
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm ² /s (c)	ASTM D-445	-----	4.8	
CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	0.006	
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-976	-----	50	
COLOR ASTM, No.	ASTM D-1500	-----	4.5	
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796	-----	0	
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86		VOLUMEN %	RECUPERADO °C
			P. INICIAL	316
			5	323
			10	326
			20	328
			30	329
			40	330
			50	332
			60	334
			70	335
			80	344
90	357			
P. FINAL (e)	360			

OBSERVACIONES:

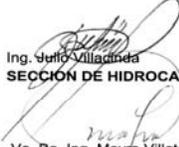
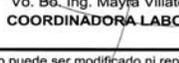
a) En el Acuerdo Ministerial No.192-06, no existen especificaciones para este producto
 b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio
 c) 1 mm²/s es equivalente a 1 cSt
 d) 39.98 MJ/Kg es equivalente a 9550 Kcal/Kg
 e) Punto final de ebullición


 Ing. Julio Villacinda
SECCION DE HIDROCARBUROS

 Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro
COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS




El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico

Figura 28. Resultados del análisis de laboratorio de hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas, para la muestra de biodiésel por el proceso de transesterificación a nivel planta piloto.

LABORATORIO TECNICO		 PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-709-07 ORDEN No. L-297-07 GUATEMALA, 03-07-07		
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DE GUATEMALA				
RESULTADOS DE ANALISIS				
MUESTRA: Biodiesel PRESENTADA POR: Planta Piloto, Centro de Investigaciones RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido PROCEDENCIA: Muestra No. 2. Nelzon Barraza LOCALIZACION: Planta Piloto, Centro de Investigaciones FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 13-06-07 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 26-06-07 PRECIO DE ANALISIS: \$ 68.12 ANALISTA: Hugo Argueta				
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)	
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93	-----	134	
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	-----	0.02	
CORROSION EN LA TIRA DE COBRE, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130	-----	1	
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(d) 40.26	
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	-----	30.8	
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm ² /s (c)	ASTM D-445	-----	4.6	
CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	0.001	
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-976	-----	51	
COLOR ASTM, No.	ASTM D-1500	-----	4.3	
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796	-----	0.05	
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86		VOLUMEN	RECUPERADO
			%	°C
			P. INICIAL	319
			5	330
			10	332
			20	335
			30	335
			40	336
			50	337
			60	338
			70	340
80	342			
90	350			
		P. FINAL (e)	362	
OBSERVACIONES: <p>a) En el Acuerdo Ministerial No.192-06, no existen especificaciones para este producto b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio c) 1 mm²/s es equivalente a 1 cSt d) 40.26 MJ/Kg es equivalente a 9615 Kcal/kg e) Punto final de ebullición</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Ing. Julio Villagorda SECCIÓN DE HIDROCARBUROS </div> <div style="text-align: center;">  SECCIÓN DE HIDROCARBUROS GUATEMALA, C. A. </div> <div style="text-align: center;">  MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS DIRECCION ADMINISTRATIVA DEPARTAMENTO LABORATORIO GUATEMALA, C. A. </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS </div>				

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico

Figura 29. Pruebas de mezclas biodiésel / diésel en un motor estacionario de combustión interna



Figura 30. Reactor para la obtención de biodiésel ubicado en la Planta Piloto del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.



Figura 31. Reacción de esterificación de Fisher.

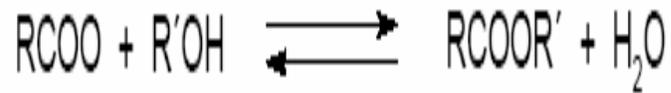
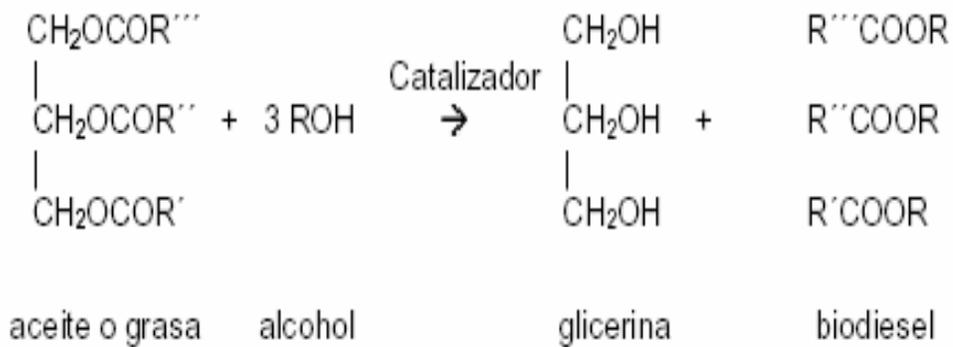


Figura 2. Reacción de esterificación.

Figura 32. Reacción de transesterificación



Fuente: http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuel/factsheets/prod_quality.pdf

