



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

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO BASE – BASE CON ETANOL PARA LA
OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE OXIDADO DE PIÑÓN
(*JATROPHA CURCAS L.*) A NIVEL LABORATORIO**

David Antonio Mota Aguilar

Asesorado por el Ing. Julio Francisco Villacinda Maldonado

Guatemala, noviembre de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO BASE – BASE CON ETANOL PARA LA
OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE OXIDADO DE PIÑÓN
(*JATROPHA CURCAS L.*) A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

DAVID ANTONIO MOTA AGUILAR

ASESORADO POR EL ING. JULIO FRANCISCO VILLACINDA MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE 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 Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruíz
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Inga. Casta Petrona Zeceña de Suntecun
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdéz
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne 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:

**EVALUACIÓN DEL MÉTODO BASE – BASE CON ETANOL PARA LA
OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE OXIDADO DE PIÑÓN
(*JATROPHA CURCAS L.*) A NIVEL LABORATORIO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 17 de octubre de 2007.

David Antonio Mota Aguilar

AGRADECIMIENTOS A:

MI MADRE

Concepción Aguilar Bran (D.E.P). Por ser mi mayor inspiración, por dejarme su ejemplo, por permitirme el honor de ser su hijo, por hacer de mí el hombre que soy y por dejarme conocerla y amarla.

MIS AMIGOS Y PRIMOS

Hugo H. Lemus, Hugo A. Lemus, Claudia de León, Sofía Godoy, Carlos Ávila, Alejandra Ibarra, Cindy Acosta, Andy Acosta, Kevin Acosta, Lucía Acosta, Isabel Rodríguez, Rut Rodríguez, Carlos David Peinado, Kevin Peinado, Erick Peinado. y a todos con quienes he compartido los mejores y peores momentos. Por estar siempre conmigo y por ser la parte más importante de mi vida.

CECILIA E. RUIZ V.

Por su cariño y apoyo.

FAMILIA AGUILAR

MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO

Personal técnico y administrativo del Laboratorio Técnico del MEM: Edgar, Roderico, Alfredo, Hugo, Juan, Byron, Oscar, Silvia, Irma y especialmente a la Inga. Mayra Villatoro. Por su apoyo y compañerismo.

MI ASESOR

Ing. Julio Villacinda. Por su interés, dirección y apoyo en la elaboración de este trabajo.

DEDICATORIA

A MI MADRE

Concepción Aguilar Bran (D.E.P)

Por ser el mejor ejemplo de vida, por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas, por su carácter, por su fuerza; por dedicarme su vida, sus sueños, su compañía y sus consejos. Te amo.

A GUATEMALA Y A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XIII
HIPÓTESIS	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. IMPORTANCIA DEL BIODIÉSEL EN GUATEMALA	1
2. ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL	5
2.1 El biodiésel en Guatemala	6
3. BIODIÉSEL	9
3.1 Ventajas	10
3.2 Desventajas	13
3.3 Principios técnicos de la producción de biodiésel	16
3.3.1 Fuentes de materia prima	18
3.3.2 Extracción de aceite	18
3.3.3 Pretratamiento de aceites vegetales crudos	19
3.3.4 El alcohol	22
3.3.5 El catalizador	24
3.4 Mecanismo de la reacción de transesterificación	27
3.5 Biodiésel de aceites vegetales usados u oxidados por almacenamiento	30

3.6 Triglicéridos como combustibles	31
3.7 Oxidación de los aceites y grasas	31
4. PIÑÓN (<i>JATROPHA CURCAS L.</i>)	33
5. MÉTODO BASE – BASE PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL	37
5.1 Filtrado	37
5.2 Secado	38
5.3 Valoración	39
5.4 Preparación de etóxido	40
5.5 Mezclado	41
5.6 Separación	42
5.7 Lavado	43
5.8 Subproductos	46
5.8.1 Glicerina	46
5.8.2 Restos de jabón	48
6. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS PARA CONTROL DE CALIDAD DE BIODIÉSELES	49
7. RESULTADOS	59
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
BIBLIOGRAFÍA	75
APÉNDICE	77
ANEXOS	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama general para la obtención de biodiésel a nivel laboratorio	17
2.	Calor de combustión, Método ASTM 240	61
3.	Gravedad API, Método ASTM D287	62
4.	Destilación al 90%, Método ASTM D86	62
5.	Viscosidad cinemática, Método ASTM D445	63
6.	Punto de inflamación, Método ASTM D93	63
7.	Color, Método ASTM 1500	64
8.	Índice de cetano calculado, Método ASTM D976	64
9.	Diagrama de diseño anidado del experimento	76
10.	Diagrama de flujo del método base – base para la obtención de 1 L de biodiésel	79

TABLAS

I.	Características típicas del biodiésel y del diesel petrolífero	12
II.	Emisiones de biodiésel respecto al diesel convencional	13
III.	Rendimiento promedio de biodiésel a partir de diferentes cultivos y sus porcentajes de aceite por semilla	35
IV.	Especificación nacional de calidad para el biodiésel (B100)	55
V.	Estándares internacionales para biodiésel (B100) para diferentes normas	57

VI.	Rendimiento volumétrico en la obtención de biodiésel respecto al grado de oxidación de los aceites crudos de piñón seleccionados	59
VII.	Parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido a partir del aceite de piñón almacenado por seis meses (6M) respecto al estándar nacional	59
VIII.	Análisis de varianza de repetibilidad del método para el aceite de piñón almacenado por seis meses (6M)	60
IX.	Comparación entre parámetros fisicoquímicos del biodiésel testigo y el producto obtenido (6M)	60
X.	Parámetros fisicoquímicos del biodiésel testigo, el producto obtenido (6M) y la mezcla B20 preparada	61
XI.	Parámetros fisicoquímicos del diesel testigo utilizado en la mezcla B20 preparada	
XII.	Especificación biodiésel (B100) ASTM D6751 – 07a. Marzo 2007	85

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
%	Porcentaje
6M	Nombre utilizado en este trabajo para denotar al aceite de piñón oxidado por aproximadamente 6 meses.
12M	Nombre utilizado en este trabajo para denotar al aceite de piñón oxidado por aproximadamente 12 meses.
API	<i>American Petroleum Institute</i> , por sus siglas en inglés. En español: Instituto Americano del petróleo
cm	Centímetro (s)
cSt	Centistoke (s) = $1 \text{ mm}^2/\text{s}$
g	Gramo (s)
gal	Galón (es)
ha	Hectárea (s)

K	Símbolo elemental del potasio
Kg	Kilogramo (s)
L	Litro (s)
mL	Mililitro (s)
MJ	Megajoule (s)
Na	Símbolo elemental del sodio
S	Símbolo elemental del azufre

GLOSARIO

Ácidos grasos	Componentes más importantes de las grasas, son sustancias químicamente lineales saturadas e insaturadas, con la función carboxilo. Químicamente, son ácidos orgánicos de más de seis carbonos de largo.
Alcóxido	Compuesto del tipo ROM, siendo R un grupo alquilo, O un átomo de oxígeno y M un ión metálico u otro tipo de catión. Los alcóxidos se obtienen a partir de los respectivos alcoholes mediante su desprotonación.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> , por sus siglas en inglés. En español: Sociedad americana para pruebas y materiales.
Biocombustible	Término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa u organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos.
Biodiésel B20	Mezcla de 20% de biodiésel y 80% de diesel derivado del petróleo que puede ser utilizada en motores diesel sin modificar.

Biodiésel B100	Término utilizado para referirse al biodiésel puro producido de aceites vegetales o animales.
Calidad	Conjunto de propiedades y características de un servicio, producto o proceso, que satisfacen las necesidades establecidas del cliente.
Degradación	Descomposición de un cuerpo orgánico con disminución del número de átomos de carbono contenidos por su molécula.
Destilación	Técnica de separación que consiste en separar dos líquidos aprovechando la diferencia en sus puntos de ebullición. Los vapores de cada componente se condensan y recogen una vez separados.
Diesel 2D	Mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre 250°C y 350°C a presión atmosférica y 0,5% en peso de azufre.
Especificación	Documento técnico que establece una lista de requisitos o descripciones detalladas de características, propiedades, rangos, etc.
Estándar	Norma de desempeño definida por entidades competentes para una actividad, un proceso, un producto o un servicio.

Éster	Compuesto orgánico producido por la reacción de un ácido y un alcohol.
Etóxido Sódico	Compuesto formado por la reacción entre el alcohol etílico y el hidróxido de sodio
Índice de cetano	Corresponde a la cantidad presente (porcentaje en volumen) de cetano (hexadecano) en una mezcla de referencia con igual punto de inflamación que el carburante (hidrocarburo) sometido a prueba. Es un indicativo de la eficiencia de la reacción que se lleva a cabo en los motores de combustión interna.
Lípidos	Sustancias de origen orgánico que forman las grasas y los aceites.
Lubricidad	Capacidad de un lubricante de formar una película de un cierto espesor sobre una superficie. Esta propiedad está relacionada con la viscosidad; a mayor viscosidad, mayor lubricidad.
Método	Conjunto de procesos que se deben emprender en la investigación y demostración de la verdad. Es un orden que debe imponer a los diferentes procesos necesarios para lograr un fin dado o resultados.
Oleaginoso	Vegetal que contiene grandes cantidades de aceite en sus semillas o frutos.

Oxidación	Unión de un material con el oxígeno, la cual da como resultado la combustión u otro proceso químico.
PAH	Hidrocarburos poliaromáticos. Hidrocarburos con dos o más anillos bencénicos unidos entre si.
Propiedad	Característica que define a un objeto y/o su comportamiento.
Rancidez	Fenómeno de descomposición que sufren las sustancias grasas a partir de hidrólisis lentas que rompen las cadenas de carbono produciendo compuestos de mal olor.
Rendimiento	Relación entre la materia prima utilizada inicialmente para un proceso y el producto obtenido del mismo.
Testigo	Muestra independiente que sirve de referencia y comparación en un estudio científico.
Transesterificación	Proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Esta reacción es frecuentemente catalizada por la adición de un ácido o una base.
Triglicérido	Tipo de lípido formado por una molécula de glicerol, que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo, por tres ácidos grasos saturados o insaturados.

Titulación	Técnica analítica volumétrica para determinar la concentración de sustancia presente en una muestra por adición de otra sustancia (titulante) de concentración conocida.
Titulante	Solución o sustancia de concentración conocida utilizada en la técnica de valoración para determinar la concentración de analito en una muestra.
Tung	Árbol decíduo de la familia de las Euphorbiaceae. Se valora por su aceite que viene de las semillas del árbol.
Valoración	Sinónimo de titulación. <i>Ver titulación.</i>
Viscosidad cinemática	Representa la característica propia del líquido desechando las fuerzas que genera su movimiento, obteniéndose a través del cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del producto en cuestión.

RESUMEN

El trabajo de investigación que se presenta a continuación evalúa el método base – base con etanol para la obtención de biodiésel a nivel laboratorio utilizando como materia prima aceite oxidado de piñón (*Jatropha Curcas L.*).

Se trabajó con dos muestras de aceites rancios almacenados durante 12 y 6 meses aproximadamente. A partir de ellos se obtuvieron varios lotes de biodiésel mediante el método base – base, cuyo procedimiento puede ser resumido en cinco etapas fundamentales: acondicionamiento inicial del aceite (limpieza y calentamiento); valoración de ácidos grasos libres del aceite; preparación del etóxido sódico; transesterificación del aceite y separación del biodiésel y subproductos.

Los lotes de biodiésel obtenido y una mezcla B20 (preparada a partir de ellos) fueron sometidos a diversas pruebas para determinar sus parámetros fisicoquímicos.

Estos parámetros arrojaron resultados positivos al ser comparados estadísticamente con un *biodiésel testigo* (fabricado recientemente con la misma materia prima a nivel industrial) y además cumplieron con los estándares de calidad nacionales e internacionales.

Se demostró que al obtener biodiésel por el método base – base a nivel laboratorio a partir de aceite de piñón almacenado y desgomado, se obtiene un rendimiento volumétrico promedio de 86,5%.

HIPÓTESIS

Hi. Es posible evaluar el rendimiento en la obtención biodiésel en función del grado de oxidación de un aceite de piñón (*Jatropha Curcas L.*) mediante el método base-base con etanol a nivel de laboratorio.

Ho. No es posible evaluar el rendimiento en la obtención biodiésel en función del grado de oxidación de un aceite de piñón (*Jatropha Curcas L.*) mediante el método base-base con etanol a nivel de laboratorio.

Hipótesis estadística: Existen variaciones estadísticas significativas en las propiedades fisicoquímicas de cada lote de biodiésel respecto al biodiésel testigo obtenido de aceite crudo recién extraído.

OBJETIVOS

General

Evaluar el rendimiento en la obtención biodiésel en función del grado de oxidación del aceite de piñón (*Jatropha Curcas L.*) mediante el método base – base con etanol a nivel de laboratorio y analizar los parámetros fisicoquímicos del producto comparándolos con las especificaciones nacionales vigentes.

Específicos

1. Calcular el rendimiento volumétrico promedio de biodiésel obtenido con el método utilizado para cada aceite crudo de piñón (*Jatropha Curcas L.*) oxidado seleccionado.
2. Analizar las propiedades fisicoquímicas de cada lote de biodiésel obtenido en función del grado de oxidación del aceite crudo oxidado seleccionado de piñón (*Jatropha Curcas L.*).
3. Evaluar estadísticamente el rendimiento volumétrico y las propiedades fisicoquímicas para la búsqueda de diferencias significativas entre lotes.
4. Evaluar las variaciones en las propiedades fisicoquímicas de cada lote de biodiésel en función del biodiésel testigo y de una mezcla 20/80 (B20) preparada a partir del biodiésel obtenido.

INTRODUCCIÓN

Las características de los suelos y condiciones de Guatemala la convierten en un país con gran potencial en el campo de los biocombustibles. Entre ellos se encuentra el biodiésel que es un combustible biodegradable, renovable y puede ser fabricado a partir de materia prima propia de la región.

Este trabajo contribuye en el estudio de este campo evaluando un método para obtener biodiésel a partir de aceite vegetal rancio o degradado extraído de una planta oleaginosa llamada comúnmente piñón (nombre científico: *Jatropha Curcas L.*).

El cultivo y estudio del piñón representa un área de interés para el país debido a sus características, a las tendencias del mercado actual de biocombustibles y a su adaptabilidad a los suelos de Guatemala.

El aceite de piñón, al igual que todos los aceites vegetales, al ser almacenado sufre un proceso de oxidación o degradación que favorece la formación de ácidos grasos libres. El método base – base con etanol permite cuantificar estos ácidos para tratarlos y mejorar el rendimiento de la reacción de transesterificación que se lleva a cabo para obtener biodiésel.

A continuación encontrará los resultados obtenidos en la investigación realizada para evaluar dicho método. Inicialmente se describen las bases teóricas que sustentaron la investigación y por último se presentan los resultados cuantitativos obtenidos en el trabajo experimental (*Ver Resultados*)

Cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos de la investigación, se pudo determinar que el método base – base tiene un rendimiento del % al ser utilizado en la obtención de biodiésel a partir de aceite de piñón oxidado si ser afectado por su grado de oxidación.

A partir de eso, fue posible hacer comparaciones satisfactorias de las propiedades fisicoquímicas de los lotes de biodiésel obtenidos. Y se comprobó que están dentro de las especificaciones nacionales vigentes.

1. IMPORTANCIA DEL BIODIÉSEL EN GUATEMALA

En los últimos años, Guatemala se ha visto afectada por factores económicos globales relacionados a las fluctuaciones y el rápido ascenso en los precios del petróleo crudo y sus derivados.

Al igual que muchos países en desarrollo, Guatemala, es netamente un importador de combustibles fósiles y estas alzas repercuten directa e indirectamente en la mayoría de aspectos económicos del país (precio del transporte, energía eléctrica, producción de bienes y servicios, etc.).

El petróleo y sus derivados son recursos no renovables cuyas reservas disminuyen y su exploración y explotación son cada vez más costosas. Además, el aumento demográfico e industrial que el planeta ha experimentado en las últimas décadas ha originado una enorme demanda energética. Esta relación oferta - demanda es la principal causa del efecto de precios al alza.

Para satisfacer los mercados y la demanda energética *per capita*, se ha hecho necesario el uso de grandes cantidades de energía no renovable. Es conocido que el uso de este tipo de energía trae consigo efectos acumulativos y perjudiciales al medio ambiente generando contaminación y arriesgado la salud y el bienestar de la población mundial.

Dicho de otra manera, el planeta Tierra está mostrando en la actualidad las consecuencias negativas de la actividad humana e industrial que se ha desarrollado en los últimos siglos.

Ante esta problemática económica y ambiental surge la necesidad de buscar alternativas energéticas que sean más económicas y que, sobre todo, contribuyan a mejorar la calidad del medio ambiente.

Guatemala es un país netamente agrícola y las características de sus suelos lo convierten en un país con un alto potencial de generación de energía a través de biocombustibles (biodiésel, alcohol carburante, biogás, etc.)

Entre este tipo de combustibles se encuentra el biodiésel, que es una opción viable para darle solución a los problemas citados anteriormente. ***Este biocombustible representa una alternativa energética renovable, limpia y accesible para los países en desarrollo como el nuestro.***

Estos hechos han sido reconocidos y analizados por empresas e instituciones que han comenzado a invertir en la investigación y desarrollo de proyectos que permitan desarrollar la industria del biodiésel a partir de cultivos nacionales.

En este sentido, el piñón (*Jatropha Curcas L.*) se ha convertido en una de las plantas oleaginosas más rentables y adaptables a las características de los suelos guatemaltecos. Además, es uno de los cultivos que producen mejor rendimiento en volumen de biodiésel por hectárea cultivada. Esto lo convierte en una de las alternativas principales para los proyectos de biodiésel en Guatemala.

"El país tiene un fuerte potencial para la producción de piñón que, se supone, sería la materia prima para la generación del carburante, cuya producción cubriría el 25% de la demanda de diesel en Guatemala y que actualmente asciende a 1,300 millones de galones" (*Emmanuel Seidner,*

Comisionado Presidencial para la Inversión y Competitividad de Guatemala, entrevista sobre la Cumbre del Plan Puebla Panamá, celebrada en Campeche México, 2007) (Referencia 9)

Con base a los beneficios ambientales y económicos comprobados del biodiésel; y al observar el potencial del cultivo de piñón en Guatemala, surge la necesidad de proponer trabajos de investigación, que contribuyan al estudio sistemático y científico de este importante campo.

2. ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

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

"El uso de los aceite vegetales como combustible y fuente energética podrá ser insignificante hoy, pero con el curso del tiempo será tan importante como el petróleo y el carbón". Rudolph Diesel.

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 diesel 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.

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** (*Rapeseed Methyl Ester* - metiléster de aceite de semilla de colza).

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 los últimos años se ha producido biodiésel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en países como Malasia para la producción de biodiésel **PME y PEE** (**Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester**). (Referencia 8)

En la Unión Europea se estipuló que para 2005, el 5% de los combustibles debía ser renovable, porcentaje que deberá duplicarse para 2010: En Francia, todos los combustibles diesel poseen un mínimo del 1% de biodiésel. En Alemania, el biocombustible se comercializa en más de 350 estaciones de servicio y su empleo es común en los cruceros turísticos.

En Europa y los EE UU, el biodiésel es producido y utilizado en cantidades comerciales. En 1998, el DOE (Department of Energy) designó al biodiésel puro (B100), como un combustible alternativo y estableció un programa de créditos para el uso de biodiésel. Sin embargo el biodiésel mezclado, cuya forma más común se llama B20 (20% biodiésel, 80% diesel convencional), no ha sido designado como un combustible alternativo. (*Referencia 8*)

2.1 El biodiésel en Guatemala

Guatemala es un país privilegiado debido a su gran variedad de suelos y climas que combinados con las calidades de tierra le permite obtener una amplia variedad de productos agrícolas. Dentro de estos productos se encuentran plantas de un gran potencial energético como: la soya, el higüerillo, el piñón, el girasol y el aguacate. Estos representan una oportunidad invaluable para iniciar proyectos de desarrollo de una economía sostenible. (*Referencia 3*).

En Guatemala se han realizado trabajos de investigación en el campo de biodiésel a diferentes niveles (planta piloto, escalamiento, estudio de métodos, proyectos de mejora, etc.) y últimamente se han desarrollado y ejecutado proyectos de inversión para la producción de biodiésel a nivel industrial.

También se ha investigado agrónomicamente el cultivo de varias especies de plantas oleaginosas con el fin de encontrar la más eficiente y adaptable a las características de las regiones guatemaltecas.

La Comisión Nacional de Biocombustibles identificó el potencial del país, concluyendo que la producción de biocombustible es de **4,140 gal/día; de estos, 2,090 gal son a base de piñón.**

Se identificaron 600,000 hectáreas para el cultivo de esta planta, según el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA). Esta área incluye tierras ociosas y/o subutilizadas. (*Referencia 4*).

Actualmente se cuenta con 12 hectáreas sembradas de piñón (*Jatropha Curcas L.*) en el municipio de Sayaxché del departamento de Petén. Los objetivos de este proyecto se orientan a la evaluación técnica y económica de producción de biocombustible para usarse como aceite diesel.

Otros objetivos del proyecto son: determinar la potencialidad de la planta para la producción de biodiésel como fuente de energía renovable y su contribución al desarrollo económico, social y ambiental. Así mismo, se busca la generar empleos y reducir emisiones de gases de efecto invernadero.

Los estudios realizados han permitido obtener información en la fase de vivero, en la fase de campo y en la fase agroindustrial. También se espera hacer estudios con respaldo estadístico en los núcleos de producción sobre temas como fertilización, podas, control de plagas, riego y seguir ampliando las plantaciones con base a las experiencias adquiridas.

Las actividades de esta iniciativa se han ampliado hacia la expansión agrícola de la plantación y la realización de estudios para la instalación de una planta de producción de biodiésel (*Referencia 3*).

Las plantaciones de piñón (*Jatropha Curcas L.*) que han sido desarrolladas con fines comerciales, han aumentado su extensión territorial y han incrementando la producción de biodiésel de manera constante y considerable; atrayendo la inversión nacional y extranjera.

Empresas como Biocombustibles de Guatemala S.A. ha realizado trabajos de investigación y desarrollo por medio de donaciones técnicas, inversión privada y extranjera que van enfocados al mejoramiento de la producción de aceite de piñón, sus características agronómicas y la disposición de los subproductos. Al año 2006, esta empresa contaba con 100 hectáreas cultivadas de piñón. En la fase de investigación, llegaron a producir 150 gal/día de biodiésel; actualmente producen 600 gal/día. (*Referencia 7*)

Recientemente, la empresa española de producción de biocombustibles, Cie Automotive, por medio de su filial Bionor Transformación, compro 51% del capital de Biocombustibles de Guatemala S.A. por medio de una suscripción de ampliación de capital, según confirmó el Gerente General de la empresa guatemalteca, Ricardo Asturias. A la vez, se compró la finca San Francisco La Canoa, en Chiquimulilla, Santa Rosa la cual abarca un área de cultivo de 473,034 hectáreas. Con esto, se tiene la expectativa de ampliar la producción de biodiésel a 24,000 gal/mes. (*Referencia 4*)

Analizando las condiciones, el proceso y la comercialización del biodiésel guatemalteco, se ha llegado a determinar que, ***en promedio, el precio de este biocombustible a base de aceite de piñón es 10% menor que el de diesel.***

3. BIODIÉSEL

Son ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplea en los motores de ignición de compresión (motores diesel) o en calderas de calefacción. (*Definición ASTM*)

Esta definición incluye, además de los ésteres metílicos o etílicos, otros ésteres de monoalcoholes como los ésteres isopropílicos, butílicos etc.

El biodiésel es un combustible líquido renovable que ***puede producirse a partir de aceites vegetales de diferentes orígenes, como: soya, maní, piñón, etc.***; además se puede obtener de aceites usados, oxidados o incluso de excremento animal. Tiene propiedades muy similares al aceite diesel; además, es seguro, biodegradable, y reduce agentes contaminantes serios del aire tales como: partículas en suspensión, monóxido de carbono, hidrocarburos y otros agentes tóxicos del aire.

Los componentes básicos de los aceites y grasas son ***triglicéridos***, los cuales provienen tanto de ácidos grasos saturados como insaturados. Dependiendo de estas y otras características del origen de los triglicéridos se obtendrá un biodiésel con unas cualidades y otras.

Generalmente, el biodiésel ***posee una energía específica de combustión 5% menor que la del diesel común***, pero al tener mayor lubricidad y mejor índice de cetano, se compensa esta diferencia.

Las mezclas al 20% de biodiésel con diesel del petróleo (**B20**) son las más comunes y se pueden utilizar generalmente en motores diesel sin modificar. También se puede utilizar en su forma pura (**B100**), pero puede requerir ciertas modificaciones del motor para evitar problemas del mantenimiento y de funcionamiento.

3.1 Ventajas

El biodiésel es un sustituto o suplemento para el diesel y no necesita bombas especiales o equipo de alta presión para aprovisionar de combustible, por lo tanto puede ser utilizado en motores diesel convencionales sustituyendo directamente productos de petróleo y reduciendo la dependencia a los mismos.

El biodiésel (B100) 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 el proceso de transesterificación.

Las emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) y de dióxido sulfuroso (SO₂) se reducen un 100 % y un 95% respecto al diesel convencional. La emisión de hollín se reduce un 40-60%, y las de hidrocarburos (HC) un 10-50 %. La emisión de monóxido de carbono (CO) se reduce un 10-50%. Se reduce igualmente la emisión de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), y en particular de los siguientes derivados, de comprobada acción cancerígena: Fenantreno - 97%; Benzoflúorantreno - 56%; Benzopirenos - 71%.

Finalmente, la emisión de compuestos aromáticos y aldehídos se reduce un 13%, y las de óxidos nitrosos (NO_x) se reducen, o aumentan, 5-10% de

acuerdo con el desgaste del motor, y la calibración de la bomba inyectora. Al utilizar una mezcla de 20 por ciento de biodiésel (B20) se reducen las emisiones de dióxido de carbono en el orden del 15%. (*Referencia 11*)

El biodiésel ofrece ventajas de seguridad sobre el diesel del petróleo ya que tiene un **punto de inflamación mayor** (150°C en promedio), comparado al diesel del petróleo (77°C). Esto lo hace más seguro de almacenar y transportar.

La lubricidad del biodiésel es notable; aumenta la vida útil de los motores que lo utilizan. Por este motivo se lo usa mezclado con gasoil de bajo contenido de azufre, para mejorar la lubricidad de éste. Esto produce menos partículas de desgaste como hierro.

Por lo general los ésteres derivados de ácidos grasos y sus mezclas **mejoran el índice de cetano** del diesel derivado del petróleo ya que durante el proceso de precombustión de los ésteres en el motor se forman diferentes compuestos: alcanos, alquenos, ésteres, bencenos sustituidos y furanos entre otros. Además, se ha comprobado que los compuestos aromáticos poseen un número de cetano menor, por eso el diesel tiene un número de cetano inferior al biodiésel que no posee apenas aromáticos. Los ésteres que más cantidad de compuestos aromáticos poseen son los insaturados.

Otro factor que influye en el número de cetano es la **estructura** (ramificación, presencia y número de dobles enlaces en la molécula). Cuanto mayor sea la longitud de la cadena mayor será el número de cetano, así como la ausencia de dobles enlaces. *Ver Tabla I. La posición del doble enlace también va a influir* en la formación de especies de precombustión (los cis generan menos aromáticos que los trans) y por lo tanto modificará el número de cetano. (*Referencia 14*)

Tabla I. Características típicas del biodiésel y del diesel petrolífero.

Datos fisicoquímicos	Biodiésel	Diesel
Composición combustible	Ester metílico Acidos Grasos C ₁₂ -C ₂₂	Hidrocarburo C ₁₀ -C ₁₂
Poder calorífico inferior, kcal/kg (aprox)	9500	10800
Viscosidad cinemática, cSt (a 40°C)	3,5 – 5,0	3,0 – 4,5
Peso específico, g/cm ³	0,875 – 0,900	0,850
Azufre, % peso	0	0,2
Punto de ebullición, °C	190 – 340	180 – 335
Punto de inflamación, °C	120 – 170	60 – 80
Punto de escurrimiento, °C	-15 / +16	-35 / -15
Numero de cetano	48 – 60	46
Relación estequiométrica Aire/comb	13,8	15

Fuente: Rodolfo J. Larosa. **Proceso para la producción de biodiésel**. Referencia 12.

El biodiésel es el primer y único combustible alternativo que posee una evaluación completa de emisiones y efectos potenciales sobre la salud de las personas, aprobado por E.P.A. (Environmental Protection Agency) según lo dispuesto en el artículo 211(b) del Clean Air Act. Estos programas incluyen las más rigurosas pruebas sobre emisiones de combustibles y aditivos que hechas por E.P.A. en los EE.UU. Los datos recogidos a través de estas pruebas concluyen el más completo inventario sobre salud humana y medioambiental que la tecnología actual permite. Un resumen de los resultados se proporciona en la Tabla II.

Tabla II. Emisiones de biodiésel respecto al diesel convencional.

Tipo de Emisión	B100 (%)	B20 (%)*
Reguladas		
Hidrocarburos totales sin quemar	-93	-30
Monóxido de carbono	-50	-13
Partículas en suspensión	-30	-22
Óxidos de Nitrógeno	+13	+2
No Reguladas		
Sulfatos	-100	-20
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH)	-80	-13
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos nitrogenados. (nPAH)	-90	-50
Potencial de destrucción de la capa de Ozono	-50	-10
*Estimado del resultado de B100		

Fuente: Ing.Agr. Jorge A. Hilbert. **Empleo de los biocombustibles en motores.** Referencia 13.

3.2 Desventajas

El principal problema es que la cadena de producción del biodiésel es tan larga que el precio final se incrementa mucho. Para conseguir un precio competitivo se debe optimizar el proceso uniendo varias fases como la extracción, trituration y transesterificación en una sola instalación.

Otro problema es la necesidad de **aditivos** para arrancar a bajas temperaturas cuando se utiliza biodiésel puro (B100) además se encuentra un aumento en las emisiones de óxido de nitrógeno en algunas ocasiones dependiendo del desgaste del motor.

El problema de la emisión de olores por el escape, que ha llegado a provocar dolores de cabeza y náuseas a los conductores y personal de mantenimiento es causado por la acroleína procedente de los hidrocarburos incombustibles. **Con la introducción del catalizador los olores desaparecen completamente**, sin que se lleguen a notar diferencias con respecto a los motores que trabajan con gasoil, salvo en los primeros momentos de funcionamiento con los motores en frío, ya que el catalizador requiere un mínimo de temperatura para que actúe correctamente.

En la *Referencia 14* se mencionan otros problemas del biodiésel respecto al diesel:

- **Incompatibilidad a bajas temperaturas:** El biodiésel posee malas propiedades a bajas temperaturas. Tanto los Puntos de Congelación (PC), Puntos de Nube (PN), como el Punto de Obstrucción por Filtros Fríos (POFF) son desde ligeramente superiores a muy superiores dependiendo del origen del éster (aceite de maíz, oliva, etc.). Para un biodiésel procedente de un aceite residual el POFF está entre -7 y 0°C, lo cual es insuficiente para el invierno riguroso de algunos países. Utilizando un biodiésel de origen animal el POFF es todavía superior. En Guatemala, estas incompatibilidades son despreciables ya que las temperaturas no son tan drásticas en ninguna época del año.

- **Mayor viscosidad:** Debido a que el biodiésel tiene una viscosidad mayor que el diesel pueden existir problemas de pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores. Si el spray es alterado por el flujo de combustible se puede generar una coquización del inyector o dilución del lubricante.

- **Coquización del inyector:** Se incrementa con el aumento de la viscosidad, del peso molecular y del poder calorífico. Aunque esta disminuye con el grado de instauración.

- **Dilución del lubricante:** Se necesita un lubricante que tenga una capacidad dispersante superior a la utilizada con el diesel (TBN alto). Existen estudios que indican que un aceite de motor se degrada mucho más rápido si el combustible utilizado es biodiésel en vez de diesel y por lo tanto se recomiendan cambios en el aceite en períodos más cortos de tiempo que para un diesel normal.

- **Problemas de corrosión:** Pueden aparecer algunos problemas debido a corrosiones y partículas de desgaste en el aceite, que puede afectar al motor y se deben hacer consideraciones respecto a la instalación. El contenido de agua acelera la presencia de microbios que puede provocar la corrosión del sistema y una colmatación de los filtros prematura.

- **Presencia de K y Na:** Puede causar la precipitación de jabones obstruyendo los filtros. Estos se presentan en el biodiésel debido a un defectuoso proceso de lavado en su producción.

- **Colmatación de filtros:** Como el biodiésel es un buen disolvente, disuelve toda la suciedad que haya en el circuito de combustible hasta dejarlo limpio. Por ello, al principio, puede que se colmaten los filtros rápidamente.

- **Problemas de estabilidad:** Posee menor estabilidad a la oxidación que el diesel debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en su molécula. Esto es importante a la hora de almacenar durante mucho tiempo el biodiésel.

La desventaja social más importante radica en que se prevé que la producción de biodiésel a gran escala supondrá un aumento del uso de tierras agrícolas fértiles y por lo tanto **el cultivo de grandes extensiones de terreno pone en riesgo la salud alimentaria** de la población, debido a esto se deberá legislar priorizando la alimentación sobre la producción de energía.

3.3 Principios técnicos de la producción de biodiésel

Para producir biodiésel a partir de aceite o grasas vegetales, el aceite se extrae de la semilla cultivada, dejando atrás harina de semilla que puede usarse como forraje animal.

El aceite o grasa es refinado y desgomado y se hace reaccionar químicamente con un alcohol para producir los compuestos químicos conocidos como *ésteres alcohólicos del ácido graso*. Biodiésel es el nombre dado a estos ésteres cuando se piensan para el uso como combustible. El *glicerol* (usado en productos farmacéuticos y cosméticos, entre otros mercados) se produce como subproducto que puede ser útil en diversas industrias.

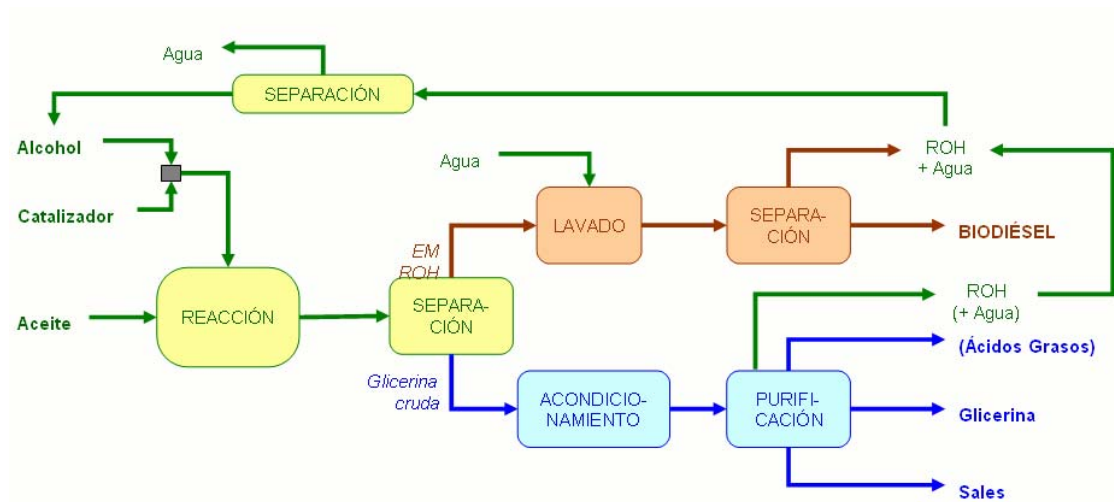
Cuando los ácidos grasos libres del aceite están presentes, pueden ser transformados en biodiésel usando tecnologías especiales en el tratamiento previo. Los aceites y las grasas pretratados entonces se mezclan con un alcohol (generalmente metanol o etanol) y un catalizador (generalmente

hidróxido de sodio o de potasio). Las moléculas del aceite (triglicéridos) son separadas, quebradas y reformadas en los ésteres y el glicerol, que después se deberán separar y se purificar.

Aproximadamente el 55% de la industria del biodiésel puede utilizar cualquier materia de base de la grasa o del aceite, incluyendo la grasa reciclada al cocinar. La otra mitad de la industria se limita a los aceites vegetales, el menos costoso de los cuales es el aceite de la soja.

En esta investigación se plantea la obtención de biodiésel a partir de un aceite oxidado a nivel laboratorio, proceso que puede ser observado en la Figura 1.

Figura 1. Diagrama general para la obtención de biodiésel a nivel laboratorio.



Fuente: Juan Manuel García C. **Biocarburantes líquidos. Biodiésel y etanol.** Referencia 10.

Basado en los objetivos del presente trabajo, no se estudiará el tratamiento de los subproductos del proceso (glicerina, ácidos grasos y sales) ni la reutilización o reciclaje del alcohol utilizado (etanol).

3.3.1 Fuentes de materia prima

Las dos fuentes más comunes de aceites y grasas para producir biodiésel son: Cultivos oleaginosos y tejidos adiposos (grasos) de animales beneficiados. Además, se está experimentando en diversos lugares para obtener biodiésel a partir de: Algas productoras de aceites, aceites residuales de cocina y grasas residuales (de plantas de tratamiento de agua o de separación de grasas).

Los cultivos oleaginosos provienen de diferentes familias botánicas y se han adaptado a las diferentes regiones climáticas del planeta, aunque las regiones tropicales son las que albergan la mayor cantidad de variedades de ellas. Solamente **una decena de especies se usa con propósitos comerciales**, existiendo centenares de cultivos oleaginosos de los que se tiene poco conocimiento pero que son excelentes fuentes de aceite.

3.3.2 Extracción de aceite

Los aceites vegetales se obtienen a partir de las semillas o frutos que los contienen mediante extracción química con solventes (se utiliza principalmente hexano como solvente) o, en menor medida, por medios físicos como la aplicación de grandes presiones. (*Referencia 18*)

La extracción por solventes es el medio más eficiente para obtener el aceite de soya o de la semilla de algodón, lográndose un 9% a 12% más de aceite y con menos impurezas que mediante la presión mecánica. Con la extracción por solventes se requiere menos calentamiento, obteniéndose un aceite de mejor calidad y ahorrando energía.

La fracción oleosa de las semillas se solubiliza en el hexano durante la extracción, y a continuación el hexano se destila y se reutiliza. Dada su alta volatilidad, el residuo de solvente que queda en el aceite es mínimo o nulo. Sin embargo, este método es menos apropiado para aplicaciones rurales, ya que requiere equipamiento grande y sofisticado.

3.3.3 Pretratamiento de aceites vegetales crudos

La mayor parte del biodiésel se produce a partir de aceites comestibles semi-refinados con buenas características de acidez y humedad. Sin embargo, existe gran cantidad de aceites y grasas de menor calidad y menor costo que también podrían ser convertidos en biodiésel (por ejemplo, aceites vegetales crudos, grasas animales y aceites usados o residuales).

El problema para procesar estas materias primas baratas es que suelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres, gomas, humedad y otras impurezas que afectan el proceso de transesterificación alcalina. Por eso, el ***aceite para producir biodiésel debe ser refinado parcialmente*** para:

- Eliminar gomas, que podrían resultar en formación de emulsiones durante el proceso.

- Eliminar fosfátidos, de manera que los efluentes del proceso no tengan fosfatos y se reduzcan sus costos de tratamiento.
- Eliminar ácidos grasos libres, para facilitar la transesterificación y posteriormente la purificación de la glicerina.
- Eliminar ceras, para mejorar el desempeño en frío del biodiésel.
- Eliminar otros contaminantes, y obtener una mejor calidad de la glicerina

Esta refinación parcial (pretratamiento) puede incluir los siguientes procesos:

- **Desgomado.** Casi todos los aceites de semilla contienen en mayor o menor proporción impurezas tales como mucílagos, fosfátidos, peróxidos, glúcidos, tocoferoles; dependiendo esto de la planta de la que ha sido obtenido. La operación de librar al aceite crudo de estas sustancias se llama *desgomado*.

El desgomado con agua es la forma más simple de reducir la cantidad de fosfolípidos y fosfátidos en los aceites. El aceite se calienta a aproximadamente 90°C, se agregan pequeñas cantidades de agua para hidratar las gomas y hacerlas insolubles en el aceite. La cantidad de agua a usar debe ser similar al peso seco de las gomas a remover.

Después de unos 5 minutos las gomas hidratadas pueden ser removidas por centrifugación. ***Las impurezas que se pueden eliminar por este método son fosfátidos hidratables, triglicéridos ocluidos y otros compuestos solubles en agua como azúcares.***

El proceso arriba descrito sólo permite la remoción de las gomas hidratables. Por eso, a veces se utiliza ácido cítrico y/o ácido fosfórico para mejorar la velocidad y la eficacia del proceso y permitir la separación de las

gomas no hidratables. El ácido puede estar disuelto en agua para facilitar la separación y luego el aceite es lavado con agua.

Los aceites crudos casi nunca se comportan de la misma manera. Cada tipo de aceite es único, y dependiendo de qué especie de vegetal haya sido extraído, se puede decir que tienen cada cual una "personalidad" distinta, por decirlo de alguna manera. En muchos casos lo que resulta bueno para un tipo determinado de aceite, no lo es para otro. Debido a este hecho la **conducción del desgomado es bastante delicada**.

Para el desgomado hacen falta contenedores dotados de un potente sistema de agitación. En todos los métodos de desgomado es fundamental una agitación intensa y vigorosa para el buen fin de la operación. Se necesita en promedio 1 Kw de potencia de motor por cada 200 litros de aceite a agitar.

- **Neutralización, lavado y secado.** Aceites con un contenido de hasta 5% de ácidos grasos libres pueden ser procesados con catálisis alcalina añadiendo mayor cantidad de catalizador para compensar las pérdidas en el jabón.

El jabón que se produce es eliminado en el glicerol y/o durante el proceso de lavado con agua, y la única desventaja de este proceso es la pérdida de materia prima en jabones en lugar de biodiésel. **Aceites con más del 5% de ácidos grasos libres no pueden ser transesterificados por catálisis alcalina**, porque los jabones inhibirían la separación del biodiésel de la glicerina y además llevarían a la formación de emulsiones durante el lavado.

Para superar este problema existen dos alternativas: la neutralización del aceite o la esterificación ácida de los ácidos grasos libres.

La neutralización consiste en hacer reaccionar el aceite con una sustancia alcalina como el hidróxido de sodio para eliminar los ácidos grasos libres, responsables de su acidez.

El aceite se calienta a 85°C (en caso de aceites muy ácidos a 65°C) y se aplica hidróxido de sodio diluido en una cantidad tal que neutralice los ácidos en el aceite y con un exceso que favorezca la separación de los jabones y evite la formación de emulsiones. Este exceso puede variar entre 10% y 30% para aceites poco ácidos (hasta 1%) y entre 30% y 50% para aceites de alta acidez.

3.3.4 El alcohol

Es el principal insumo para la producción de biodiésel. En volumen, representa alrededor del 10-15% de los insumos consumidos. Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiésel son ***metanol y etanol***.

Se puede utilizar otros alcoholes – propanol, isopropanol, butanol y pentanol – pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua (es decir, la presencia de agua en mínimas cantidades inhibe la reacción).

El metanol es tóxico cuando se ingiere, se inhala o al contacto con la piel, y además altamente inflamable – sus gases se encienden a una temperatura de 12°C. Por encima de esta temperatura las mezclas de aire y vapor de etanol (con al menos 6% de metanol) son explosivos. Existe riesgo de explosión e incendio cuando el metanol está expuesto al calor, chispas, llamas o descargas de energía estática. Además, el metanol arde con una llama incolora, de manera que no es fácil notar si se enciende. Medidas de seguridad contra

incendios son necesarias al trabajar con metanol, así como adecuada ventilación, etiquetado, sistemas cerrados de manipulación y equipo de protección personal para evitar el contacto, inhalación o ingestión.

El etanol es menos tóxico – aunque puede tener efectos negativos (ebriedad, coma etílico) cuando se ingiere en grandes cantidades – pero también es altamente inflamable. Su uso requiere de menores medidas de seguridad ocupacional, pero sí de seguridad contra incendios.

La desventaja de su uso para producir biodiésel es que **es mucho menos reactivo que el metanol**, y la transesterificación se ve afectada principalmente por cualquier cantidad de agua presente en los insumos. Se requiere entonces que el etanol utilizado tenga una pureza superior al 99%, y que los otros insumos (aceite y catalizador) sean igualmente de muy alta pureza. Es por esto que en la mayoría de plantas de producción de biodiésel aún se utiliza metanol pese a su toxicidad. (*Referencia 18*)

Cabe mencionar además que el metanol se obtiene principalmente de fuentes fósiles no renovables: del gas natural o gas metano. También es posible obtenerlo mediante destilación seca de la madera, pero este proceso aún no se aplica a gran escala. **El etanol, en cambio, proviene de materias primas renovables**: caña de azúcar, remolacha azucarera, papa, otros vegetales celulósicos, etc.

Una de las variables más importantes que afectan el rendimiento de la transesterificación es la **razón molar entre el alcohol y los triglicéridos**. Por razón molar se entiende la cantidad de moléculas de alcohol necesarias para reaccionar con una molécula de triglicérido o aceite.

Cuando se trabaja con metanol se recomienda una razón molar de 6:1 para asegurar una conversión máxima de los triglicéridos a ésteres. **En el caso del etanol, algunos estudios indican que una razón molar de 9:1 sería la más apropiada.** Si la cantidad de alcohol no es suficiente, el producto contendrá monoglicéridos y diglicéridos (productos intermedios de la transesterificación), los cuales cristalizan muy fácilmente en el biodiésel y pueden causar taponamiento de los filtros y otros problemas en el motor.

3.3.5 El catalizador

La transesterificación de los triglicéridos puede ser realizada mediante diferentes procesos catalíticos. Los catalizadores utilizados pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Catalizadores alcalinos – hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), metilato de sodio (NaOMe).
- Catalizadores ácidos – ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico, ácido sulfónico.
- Catalizadores enzimáticos – lipasas
- Catalizadores heterogéneos – catalizadores en fase sólida.

El proceso más conocido, utilizado y hasta el momento más efectivo es el que emplea catalizadores alcalinos. Sin embargo, **si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, la catálisis alcalina no es apropiada** debido a que los hidróxidos reaccionan con los ácidos grasos formando jabones, lo cual reduce el rendimiento de producción de biodiésel.

En este caso, se requiere otro tipo de transesterificación, o un pretratamiento con catalizadores ácidos. (*Referencia 18*)

En el caso de la catálisis alcalina, es muy importante que los catalizadores se mantengan en un estado anhidro. Debe evitarse su contacto prolongado con el aire, pues éste disminuye su efectividad debido a la interacción con la humedad y con el dióxido de carbono. Los tres catalizadores cáusticos tienen ventajas y desventajas:

- **Hidróxido de sodio (NaOH):** Viene en forma de cristales que deben ser disueltos en el alcohol antes de la transesterificación. Es un producto muy barato y fácil de conseguir, pero es cáustico e irritante, y su manipulación directa sin protección respiratoria y para la piel debe evitarse.

Al igual que en el caso del KOH, la manipulación de este insumo sólido puede ser complicada (especialmente en plantas de producción grandes, donde se quieren evitar operaciones manuales). Además, el **NaOH es muy higroscópico** (absorbe humedad del ambiente), lo cual hace que los cristales se peguen, sean más difíciles de manipular, y además reduce su eficacia.

Finalmente, la reacción con el alcohol es exotérmica, genera calor, y el tanque donde se realiza esta disolución debe mantenerse frío para evitar que se evapore el alcohol.

- **Hidróxido de potasio (KOH):** Muy similar al hidróxido de sodio, el hidróxido de potasio viene también en forma de cristales que deben ser disueltos antes de la transesterificación. Es un producto barato y disponible en la mayoría de lugares.

Debido a su mayor peso molecular, se necesita mayor cantidad de KOH que de NaOH para hacer el mismo trabajo, lo cual puede elevar costos. Las dificultades de operación y riesgos son similares a los que existen con NaOH, sin embargo, algunos estudios han demostrado que utilizando KOH se obtienen mejores rendimientos de transformación que con NaOH. Además, ***el KOH se disuelve más fácilmente que el NaOH en el etanol***, lo cual facilita el primer paso previo a la transesterificación.

Los jabones de potasio son líquidos, a diferencia de los de sodio que son sólidos. Esto hace que el glicerol crudo sea más fácil de drenar luego de la separación del biodiésel cuando se trabaja con KOH. Por otra parte, las sales de potasio obtenidas como subproducto de la purificación de la glicerina pueden ser utilizadas como fertilizante agrícola. *(Referencia 18)*

- **Metilato de sodio:** El metilato de sodio no está disponible en estado puro, debido a que es muy inflamable. Se presenta entonces comercialmente como una solución al 30% en metanol.

Esta solución es un líquido, lo cual constituye la principal ventaja: su manipulación (pese a su alta inflamabilidad y toxicidad) es sencilla, puede ser adaptada a un proceso continuo y realizarse mecánicamente sin necesidad de intervención de los operarios. El metilato de sodio parece ser un muy buen catalizador con materias primas adecuadas, pero su costo es alto y su disponibilidad limitada. *(Referencia 18)*

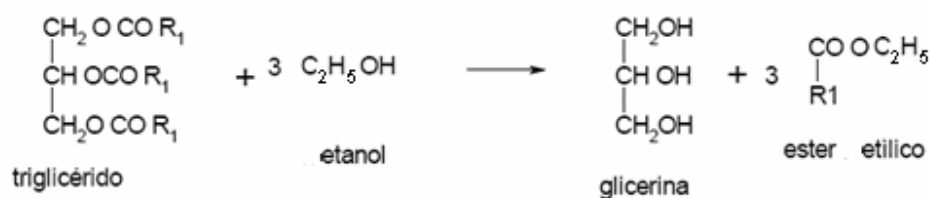
3.4 Mecanismo de la reacción de transesterificación

La reacción, denominada **transesterificación**, substituye el alcohol (metanol o etanol) por la glicerina en los triglicéridos (grasas, aceites) para elaborar metil-esteres o etil-ésteres también denominados biodiésel.

En general, la transesterificación es una reacción característica de los ésteres y consecuentemente de los lípidos y consiste en la transformación de un tipo de éster en otro.

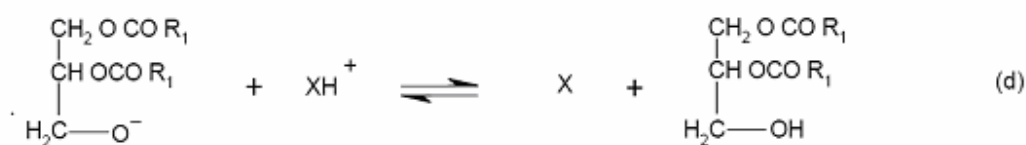
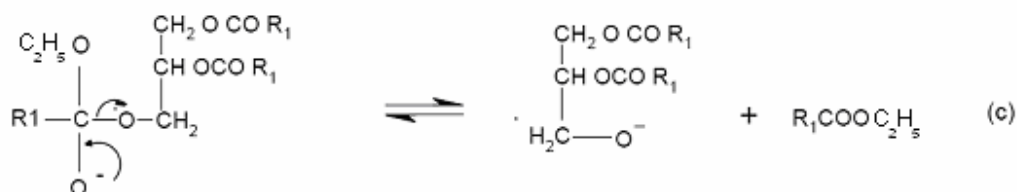
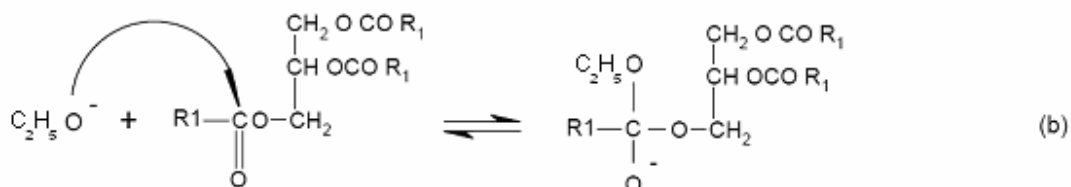
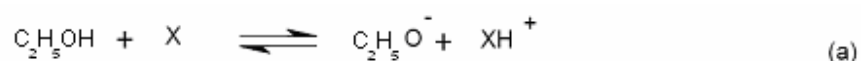
Cuando el éster original reacciona con un alcohol, la reacción de transesterificación se denomina **alcoholólisis**. En el caso de la alcoholólisis de un aceite o grasa, las moléculas de triglicérido se combinan con un alcohol alifático de bajo peso molecular en presencia de un catalizador. **Los productos de la reacción química son alquilésteres de los ácidos grasos del aceite o grasa y glicerol**. Los alquilésteres una vez purificados mediante procesos de lavado y secado constituyen el biodiésel. El glicerol se puede beneficiar para obtener glicerina de alta pureza.

La reacción de alcoholólisis de un triglicérido es la siguiente utilizando etanol:



La transesterificación es catalizada por ácidos (H_2SO_4 o HCl seco) o por bases (generalmente un ión alcóxido). (Referencia 5). **Estos son llamados catalizadores ya que se regeneran al final de la reacción** y, aunque forman parte de ella, el efecto neto de ellos sobre la reacción podría considerarse como una catálisis.

El mecanismo de la reacción estudiada se representa de esta manera:



En el paso (a) de la reacción el etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) reacciona con el catalizador básico dando paso a la formación del nucleófilo. **R1 es el grupo alquilo** que forma parte de la cadena del ácido graso del triglicérido.

En el paso (b) el radical cargado negativamente ($\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^-$) reacciona con el doble enlace del grupo carbonilo del triglicérido.

En el paso (c) se forma una molécula del ester alquílico ($R_1COO C_2H_5$) – en nuestro caso específico se trata del etilester.

En el paso (d) se regenera el catalizador formándose un diglicérido. Los pasos (a) al (d) se repiten hasta la desaparición del triglicérido y la formación del monoalquilester y glicerina como productos. (Referencia 16)

La transesterificación es una reacción de equilibrio, para desplazarlo a la derecha es necesario utilizar un gran exceso del alcohol cuyo éster queremos, o bien eliminar uso de los productos de la mezcla reaccionante. Este último enfoque es preferible siempre que sea aplicable; de esta manera puede llevarse la reacción hasta la conversión total. (Referencia 5)

Las principales **variables que influyen en el rendimiento, conversión y cinética** de la reacción de transesterificación son la calidad de la materia prima, el tipo y cantidad de catalizador, el tipo de alcohol, la relación molar alcohol/aceite y las condiciones de reacción como temperatura, presión y agitación. (Referencia 15)

Los ácidos grasos libres están presentes en el aceite vegetal cuando ha sido utilizado o almacenado. Cuando estos ácidos están presentes se necesita mayor cantidad de hidróxido para neutralizarlos y mejorar el biodiésel.

El hidróxido utilizado como catalizador convierte una pequeña cantidad de aceite en jabón y cuando esta reacción ha concluido, el biodiésel flota en la parte superior y la glicerina y el jabón sedimentan en el fondo pudiendo ser descartados luego de un tratamiento de lavado.

3.5 Biodiésel de aceites vegetales usados u oxidados por almacenamiento

Los aceites vegetales usados u oxidados son una fuente atractiva de biodiésel, pero son más difíciles de convertir porque **contienen un 2-10% de ácidos grasos** libres (causa de sabor y olor rancio) y provocan problemas.

Para trabajar con ellos, primero es necesario retirar cualquier agua presente, y luego, es necesario valorar el aceite para determinar qué cantidad de ácidos grasos libres contiene.

Según los cálculos estequiométricos, si se va a trabajar con etanol, por cada litro de aceite vegetal usado u oxidado se necesitará un gramo de hidróxido de sodio granular sólido por cada mililitro (mL) de solución de hidróxido de sodio al 0,1% utilizada para valorar los ácidos grasos libres, adicionando 7 g como catalizador necesario para el aceite virgen (no usado).

No es fácil procesar un aceite muy ácido con el método alcalino de una sola etapa (base – base). La mitad de las veces se consigue sólo un 50% de biodiésel (puede que no de muy buena calidad), y el resto de las veces una pasta inservible. Se pueden obtener buenos resultados si se hace todo muy bien, llegando a una producción del 75% de buena calidad y fácil de lavar.

3.6 Triglicéridos como combustibles

Los aceites sin procesar y las grasas también pueden ser utilizados por los motores diesel, pero requieren ajustes en los motores y en los hábitos de conducción. Son demasiado densos, por lo que no se inyectan bien y se vuelven sólidas a temperaturas próximas a los 10° C.

Si la máquina se arranca con diesel convencional, se pasa a aceites vegetales después de que haya sido calentado a conciencia y se cambia de nuevo a diesel para el apagado, se aumenta la vida de los motores.

3.7 Oxidación de los aceites y grasas

Las sustancias grasas sufren, por la acción del aire, el agua y las bacterias, fenómenos complejos de descomposición llamados de **rancidez o enranciamiento**.

Ocurren reacciones de hidrólisis lentas, catalizadas por enzimas, que dan lugar a la formación de aldehídos y cetonas. El oxígeno del aire ataca a los dobles enlaces y, en un proceso progresivo, termina por romper la cadena de carbonos produciendo compuestos de mal olor. En la manteca, esta alteración provoca la aparición del ácido butírico o butanoico, causante del sabor y del olor que toma esta sustancia cuando se altera.

Existen compuestos antioxidantes, como el 3-*t*-butil-4-hidroxianisol (BHA), que retardan la reacción de oxidación. Suelen ser agregados a los aceites empleados en la fritura de papas y otros alimentos.

La oxidación de aceites vegetales altamente no saturados en aire ***puede provocar también la polimerización en películas duras, tenaces y secas.*** A causa de esta reacción los aceites vegetales no saturados (aceites secantes) se emplean en la manufactura de pinturas y barnices. Para la manufactura de linóleo y hule se agrega a la tela una mezcla de aceites secantes, pigmentos y rellenos (corcho, resina).

Por lo tanto ***el almacenamiento prolongado de un aceite permite su descomposición natural,*** provocando en él un olor y sabor rancio característico, cambiando sus propiedades físicas y disminuyendo su capacidad de ser utilizado en la producción de alimentos, medicinas, etc.

Además de esto, la degradación de los aceites se puede provocar por agentes externos que favorezcan la oxidación, por ejemplo: reacciones con medios oxidantes, escasez de preservantes, trasiego sucesivo en procesos, uso indirecto como lubricante, etc.

4. PIÑÓN (*JATROPHA CURCAS L.*)

El piñón (*Jatropha Curcas L.*) es una planta nativa de mesoamérica. Sus plantaciones pueden llegar a ser una excelente vía de reforestación, contribuyendo a la conservación de los suelos y evitando la erosión; esto la convierte en una alternativa para la recuperación de suelos marginales y áreas en proceso de desertificación ya que puede crecer en suelos pobres y soportar largas sequías.

Crece relativamente rápido (según el clima, en entre tres y seis años) y vive más de 30, prefiriendo una temperatura media de más de 25 °C; durante los cuales produce **semillas con un contenido en aceite de 28 - 36 %**. **El del grano, sin cáscara, es aproximadamente un 55 - 60 %**.

Por ser una planta venenosa que crece de forma natural y silvestre en los países tropicales. Con el piñón (*Jatropha Curcas L.*) desaparecen algunos inconvenientes que poseen otras plantaciones, como por ejemplo: Plantaciones monocultivo, tala voraz o encarecimiento del precio de los alimentos, tal y como ya ha sucedido con el maíz.

El piñón (*Jatropha Curcas L.*) se cree originario de Centro América, pero crece en todos los países tropicales. En Birmania este cultivo se extiende sobre 800.000 hectáreas y en China sobre 20.000. El aceite que se extrae de ella puede ser destinado para la producción de biodiésel, así como la elaboración de jabones.

Otra de las ventajas naturales de esta planta, de la familia de las Euphorbiaceae, frente a otros carburantes renovables es su **capacidad para resistir en condiciones climatológicas extremas.**

Puede crecer en suelos pobres en nutrientes o soportar largas temporadas de escasez hídrica. Si bien para su óptimo crecimiento requiere más de 600 mililitros de agua al año, salvo en zonas donde la humedad del aire sea muy elevada, podría crecer con sólo 250 mililitros.

Existen otras plantas venenosas de las que se puede extraer su aceite. Pero no son muchas y además el piñón (*Jatropha Curcas L.*) parece tener más ventajas frente al resto de especies de flora consideradas venenosas.

Los litros de biodiésel que se obtienen por hectárea, dependerán del cultivo que da origen al aceite vegetal, y en la Tabla III se puede observar que **el piñón es uno de los cultivos con mejor rendimiento promedio por hectárea cultivada** (Ver Tabla III).

Tabla III. Rendimiento promedio de biodiésel a partir de diferentes cultivos y sus porcentajes de aceite por semilla.

Nombre común del cultivo	Nombre científico	Parte oleaginosa	Rendimiento estimado de aceite en plantación (kg/ha/año)	Contenido de aceite del fruto o semilla (%)
Palma aceitera	<i>Elaeis guineensis</i>	Pulpa de fruto Semilla	5000 800	45 – 55 44 – 57
Soya	<i>Glycine max</i>	Semilla	280 – 580	18 – 20
Colza y canola	<i>Brassica napus</i> <i>Brassica rapa</i>	Semilla	700 – 1500	40
Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Semilla	600 – 950	45 – 55
Algodón	<i>Gossypium hirsutum</i>	Semilla	300	18 – 25
Ricino o higuera	<i>Ricinus communis</i>	Semilla	1200	45 – 55
Piñón	<i>Jatropha curcas</i>	Semilla Con cáscara	1590	50 – 60 24 – 34
Aguaje	<i>Mauritia flexuosa</i>	Pulpa	2.400	21,1
Almendro	<i>Caryocar villosum</i>	Pulpa y semilla	270	
Almendro colorado	<i>Caryocar glabrum</i>	Semilla		37
Babasu	<i>Orbignia phalerata</i>	Semilla	90 – 150	72
Bacuri	<i>Platonia insignis</i>	Semilla		46
Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i>	Semilla	1575	69,3
Chopé	<i>Gustavia longifolia</i>	Pulpa		30
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Endocarpio	610 – 732	66
Copoasu	<i>Theobroma grandiflorum</i>	Semilla	482 – 808	
Hamaca Huayo	<i>Couepia dollicopoda</i>	Semilla	70 – 80	
Huasaí	<i>Euterpe precatoria</i>	Pulpa y semilla		
Inchi	<i>Caryodendron orinocense</i>			41 – 59

Continúa

Marañón	<i>Anacardium occidentale</i>	Nuez		46,3
Olla de Mono	<i>Lecythis pisonis</i>	Almendra		
Pijuayo	<i>Bactris gasipaes</i>	Pulpa y semilla	2.000	23
Poloponta	<i>Elaeis oleifera</i>	Pulpa y semilla	1.800	16,2
Sacha Inchi	<i>Plukenetia volubilis</i>	Almendra	51,4	
Sacha Mangua	<i>Grias neuberthii</i>	Pulpa	165	
Sinamillo	<i>Oenocarpus mapora</i>	Pulpa		
Totali	<i>Acrocomia totai</i>	Pulpa y semilla	12-15 (pulpa)	60 (almendra)
Tucuma	<i>Astrocaryum vulgare</i>	Pulpa y semilla		43,7
Umari	<i>Poraqueiba sericea</i>	Pulpa	530	21,2
Ungurahui	<i>Oenocarpus bataua</i>	Pulpa	240 - 525	19, mesocarpo 14,5 (epicarpo)
Uxi	<i>Dickesia verrucosa</i>	Pulpa	20,2	

Fuentes: Adaptada de Coello, 2006; Tratado de Cooperación Amazónica, 1997; Villachica, 1996. **Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú.** Referencia 18.

5. MÉTODO BASE-BASE PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

En muchos países se está experimentando con la transesterificación utilizando etanol en lugar de metanol. ***Las ventajas de este proceso serían la procedencia renovable del alcohol (caña de azúcar, remolacha, maíz, etc.) y su mucha menor toxicidad.***

Sin embargo, la producción de ésteres etílicos es difícil en comparación con la de ésteres metílicos, debido principalmente a la fácil formación de emulsiones estables que dificultan severamente la separación del biodiésel y el glicerol y la purificación del biodiésel. Se requiere mucho mayor cuidado con la pureza de los insumos así como con los parámetros de reacción – tiempo, temperatura, agitación – para asegurar el éxito.

En Brasil, se ha experimentado con un método que usa dos catalizadores para permitir la transesterificación con etanol, con un tiempo de reacción de sólo 30 minutos (*Referencia 18*).

5.1 Filtrado

Se realiza con el fin de quitarle restos sólidos en suspensión al aceite crudo. Para mejorar esta operación se calienta el aceite a 37 °C (100 °F) para disminuir su viscosidad. Esto se realiza a manera de limpieza y por lo tanto se puede utilizar cualquier papel filtro o manta para el filtrado.

5.2 Secado

El aceite suele contener agua y la presencia de ésta baja la velocidad de la reacción y favorece la saponificación, formando una mayor cantidad de jabón indeseable. (*Referencia 6*)

Si el aceite crudo está libre de agua no se realiza la operación de secado y con esto se logrará un ahorro significativo en tiempo y en energía. Por el contrario, si existe un gran porcentaje de agua en el aceite, se puede drenar según se va depositando en el fondo, recuperando después el aceite que se haya ido con ella.

A través del calentamiento se busca minimizar la cantidad de agua presente en el aceite. Para ello se calienta el aceite hasta 100° C (212° F) y se mantiene la temperatura mientras el agua se evapora. Durante el calentamiento se agita constantemente el aceite para evitar la formación de burbujas de vapor, que puedan explotar y salpicar el aceite caliente.

Luego de un tiempo de calentamiento, cuando disminuya la evaporación, se aumenta la temperatura hasta 130 °C aproximadamente durante diez minutos para luego dejar enfriar.

Para determinar la eficiencia se pueden practicar pruebas cuantitativas para medir la cantidad de agua al inicio y al final de la operación de secado. Para los fines de esta investigación se utiliza el Método ASTM 1796 para Agua y sedimento en aceites combustibles.

5.3 Valoración

Para saber cuanto hidróxido de sodio es necesario, se debe medir la acidez del aceite con un método de valoración. ***Es la parte más importante del proceso y deberá ser lo más exacta posible ya que de ella depende la cantidad de catalizador básico (hidróxido) que se ha de utilizar.*** El hidróxido a utilizar deberá estar deshidratado para evitar problemas y reacciones alternas indeseables como la saponificación.

Se prepara una solución al 1% de hidróxido de sodio o potasio en agua destilada, la cual servirá de titulante en la valoración y por lo tanto no deberá ser contaminada. (Referencia 6)

Se mezclan 10 mL de alcohol isopropílico con 1 mL del aceite para diluirlo. Se añade el indicador ácido-base a utilizar (fenolftaleína) y se procede a titular lentamente con la solución de hidróxido al 1% agitando constantemente hasta obtener el color rosa característico del medio básico para este indicador. El objetivo es averiguar el volumen de la solución de hidróxido de sodio necesario para alcanzar un pH de entre 8 y 9.

Este procedimiento de valoración es recomendable hacerlo varias veces para descartar cualquier error de operación y comprobar que la medida es correcta. Dependiendo del tipo de aceite, de la temperatura que alcanzó al ser utilizado, del proceso de obtención y del tiempo de uso, la cantidad de solución de hidróxido en la valoración suele ser de entre 1,5 y 5 mL.

Si la valoración da más de 2 mL (usando solución de NaOH al 0,1%) puede que los ácidos grasos libres reaccionen con la glicerina formando geles.

También se puede utilizar papel tornasol y los medidores de pH digitales en sustitución de la fenolftaleína, previo conocimiento de las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos.

Para calcular la cantidad adicional de hidróxido de sodio necesario para la reacción se multiplica el número de mL obtenidos en la valoración por el número de litros de aceite que se convertirán en biodiésel.

Además, cada litro de aceite nuevo necesita 7g de hidróxido para la reacción, por lo tanto hay que sumar 7g por cada litro de aceite usado u oxidado que se vaya a transesterificar.

5.4 Preparación de etóxido

Al mezclar el etanol con el hidróxido de sodio se produce una reacción exotérmica cuyo resultado es el etóxido de sodio que es muy corrosivo. Se deben utilizar recipientes de vidrio, de acero inoxidable, o esmaltados. Además se debe agitar continuamente debido a su baja solubilidad.

Generalmente la cantidad de etanol necesaria es del 25% - 30% en masa de la cantidad de aceite. Las densidades de los dos líquidos son bastante parecidas y por lo tanto también puede funcionar como porcentaje en volumen. Teóricamente hay que usar 180 mL de etanol por litro de aceite, el resto es un exceso necesario para que la reacción se desarrolle correctamente.

La reacción de etoxilación que se lleva a cabo, es una reacción reversible y por lo tanto al llegar al equilibrio **se pueden presentar remanentes de**

alcohol o hidróxido, que pueden afectar los pasos siguientes del mecanismo de reacción. Esto hace necesario un análisis de conversión o avance de la reacción para estimar el contenido de alcohol e hidróxido en la mezcla.

Dichos análisis se pueden realizar a través de técnicas analíticas cuantitativas instrumentales como Espectrometría de Infrarrojo, Cromatografía en fase líquida o cromatografía en fase gaseosa; así como con técnicas volumétricas o valorativas.

Para los fines de esta investigación **se procura reducir el contenido de alcohol calentando la mezcla** para evaporar el alcohol remanente en el etóxido sódico; además, la valoración pretende optimizar la cantidad de hidróxido para disminuir la presencia de excesos en el producto final.

5.5 Mezclado

Se debe calentar el aceite hasta 48 - 54 °C (120 - 130 °F) a modo de preparación y mezclar firmemente ajustando la velocidad (400 rpm aproximadamente) a fin de evitar salpicaduras y burbujas que perjudiquen el resultado final. (*Referencia 6*)

El etóxido preparado anteriormente se vierte en el aceite mientras se mezcla; continuando con la agitación durante 50 ó 60 min. La reacción suele completarse en media hora, pero **es mejor mantener la agitación durante más tiempo para dejar que llegue al equilibrio.**

En el mezclado es donde se realiza la transesterificación: se separan los ácidos grasos de la glicerina y el etanol se une a los ácidos grasos formando etilésteres (biodiésel). ***El hidróxido de sodio estabiliza la glicerina.***

5.6 Separación

Para poder obtener el biodiésel se deja reposar y enfriar la mezcla por lo menos durante ocho horas (preferiblemente más). ***La glicerina y otros subproductos forman una masa gelatinosa en el fondo y los etilésteres (biodiésel) forman la fase superior.***

Otra alternativa consiste en dejar que la mezcla repose al menos durante una hora después de la reacción, manteniendo la temperatura por encima de 38 °C (100° F). Así, la glicerina se mantiene semilíquida y se hunde antes.

Luego de la separación se deberá decantar el biodiésel, eliminando la glicerina y otros subproductos. La glicerina semilíquida es de color marrón oscuro; el biodiésel es más claro. Si al separarlos cae algo de biodiésel en el recipiente de la glicerina, luego se hace fácil recuperarla cuando se solidifica.

Si la glicerina se solidifica antes de la separación del biodiésel, se deberá calentar para que vuelva a su estado semilíquido, cuidando de no agitarla por ningún motivo para evitar mezclar los productos obtenidos.

5.7 Lavado

El objetivo del lavado es separar los jabones del combustible lavándolo con agua una o varias veces. En el primer lavado es mejor añadir un poco de ácido acético diluido (5%). Con este se consigue que el pH del biodiésel sea casi neutro ya que se une a restos de hidróxido y los neutraliza.

Agregar agua al biodiésel, después de agitar con cuidado y dejar que repose entre 12 y 24 horas. El biodiésel limpio queda encima del agua y el agua con los jabones disueltos se saca por el fondo.

Puede que haya que repetir este proceso dos o tres veces para retirar todos los jabones presentes. El segundo lavado y el tercero pueden hacerse sólo con agua. Después del tercer lavado el agua que quede puede separarse calentando lentamente. El agua y otras impurezas se hundirán hasta el fondo. El producto final deberá tener pH 7.

El agua del tercer lavado puede usarse para el primer o segundo lavado del siguiente lote. Las impurezas se separarán cuando se caliente el siguiente lote. Los jabones pueden aprovecharse concentrándolos ya que lo que queda es un jabón biodegradable que tiene muchas aplicaciones industriales.

El biodiésel tiene un aspecto más limpio y cristalino después de lavarlo. También se puede enfriar el biodiésel para que los restos de jabón y de hidróxido sedimenten más rápido. Con este método el biodiésel queda bastante limpio en poco tiempo.

Otras técnicas de lavado pueden ser:

- **Lavado con niebla:** Consiste en rociar una nube de gotas minúsculas que caen sobre la superficie sin perturbar el líquido y lo atraviesan arrastrando al fondo las impurezas. Es lento y necesita mucha agua, que no suele reutilizarse.
- **Lavado con burbujas:** El lavado con burbujas fue desarrollado en la universidad de Idaho. Hace falta una pequeña bomba de aire y una piedra difusora. Se ponen agua y biodiésel en el tanque de lavado. Tiene que haber entre 1/4 y 1/2 más de agua que de biodiésel.

El agua está en el fondo, donde se encuentra la piedra difusora, y el combustible flota encima. Las burbujas de aire suben atravesando primero el agua y luego el biodiésel. Cada gota queda cubierta por una fina película de agua y la eleva através del biodiésel, lavándolo por el camino. Cuando la burbuja llega a la superficie estalla y deja una gota de agua que vuelve al fondo atravesando de nuevo el biodiésel y lavándolo más.

Hacen falta tres o cuatro lavados consecutivos, de entre seis y ocho horas de duración cada uno, con un reposo intermedio de al menos una hora entre lavado y lavado. Después del reposo el agua se saca por un desagüe del fondo para sustituirla por agua limpia. Al final del último lavado el agua debe estar cristalina, con pH 7 aproximadamente. (*Referencia 6*)

Este tipo de lavado es fácil, funciona y da pocos problemas. Los inconvenientes pueden ser la tardanza del proceso y la posible oxidación del combustible es delicado y puede ocultar una reacción incompleta, que se haría evidente agitando la mezcla.

Otro problema es que el lavado con burbujas oxida el combustible. Cada aceite tiene sus características. Algunos son aceites secantes, como el de linaza, que se usa en pinturas, cuando se seca se polimeriza y forma un sólido parecido al plástico. Con las altas temperaturas que hay en los motores de combustión interna la polimerización se acelera.

Esta polimerización ocurre cuando el oxígeno atmosférico rompe los enlaces dobles de los aceites insaturados. No sólo afecta a los aceites secantes, también a los semisecantes, muchos de los cuales se emplean como materia prima para el biodiésel.

Los aceites saturados no se polimerizan, los insaturados sí. El grado de insaturación se llama índice de iodo. El aceite de linaza, el de tung, y algunos aceites de pescado tienen el índice de iodo entre 170 y 185. El aceite de coco tiene un índice de iodo de diez. La conversión de los aceites insaturados en biodiésel reduce la polimerización, pero no la evita.

- **Lavado por agitación:** Este **es el lavado más efectivo**, aunque al mezclar mecánicamente el biodiésel con agua se formará una emulsión si se intenta lavar combustible que no ha terminado de reaccionar.

Es un lavado rápido y efectivo, no oculta las reacciones incompletas y no oxida el combustible. No tiene inconvenientes si se hace todo bien desde el principio. Es mejor tener un depósito de lavado independiente.

Otra opción para la agitación en el lavado es usar una bomba y un aspersor. No es nada delicado. La mezcla queda tan homogénea como con la agitación mecánica, aunque tarda un poco más. Este tipo de lavado será el utilizado en este trabajo de investigación.

5.8 Subproductos

5.8.1 Glicerina

La glicerina procedente del aceite usado o muy oxidado es marrón y permanece sólida por debajo de 38°C (100° F). La glicerina del aceite virgen o poco usado suele mantenerse líquida a temperaturas menores de 38° C.

La glicerina se puede compostar después de un período de ventilación de tres semanas. En ese tiempo se evapora el etanol, que es malo para el compostaje. También se puede evaporar el etanol calentando y se puede reutilizar haciendo que pase a través de un condensador.

Lo que queda después de la transesterificación no es sólo glicerina, sino una mezcla de glicerina pura, etanol y cera. Estas tres sustancias pueden separarse por destilación, pero es difícil porque para evaporar la glicerina hace falta mucha energía.

La glicerina pura tiene muchas aplicaciones: medicamentos, tintes, cremas, etc. La glicerina procedente de la transesterificación es un estupendo desengrasante industrial. Una manera de purificarla es calentarla hasta 80 °C para que se evapore el etanol. Cuando se enfría, las impurezas se depositan en el fondo y queda un color marrón oscuro más uniforme.

El glicerol crudo, que en realidad contiene solamente un 50% de glicerol, es un subproducto de poco valor en esta forma (ya que contiene gran cantidad de jabones, catalizador alcalino y etanol), y además peligroso debido al etanol.

Para poder aprovecharlo, debe ser purificado de la siguiente manera:

- *Acidulación* (se añade ácido sulfúrico o fosfórico) para separar 3 fases: el glicerol propiamente dicho (con metanol aún disuelto), ácidos grasos libres (provenientes del aceite), y una fase sólida que consiste en sales formadas entre el catalizador alcalino y el ácido agregado en esta etapa.

Si se utiliza hidróxido de potasio como catalizador de la transesterificación y ácido fosfórico para la neutralización del glicerol, la sal que se forma es fosfato de potasio, producto que puede ser utilizado como fertilizante (*Referencia 18*).

- *Evaporación*: El glicerol resultante sólo necesita ser separado del etanol (mediante evaporación – temperatura y vacío – y condensación del etanol) y así tendrá una pureza de aproximadamente 85%.
- El etanol recuperado tanto de los etilésteres como del glicerol suele contener agua derivada del proceso y por lo tanto debe ser rectificado (es decir, destilado para separarlo del agua) antes de volver a utilizarlo en el proceso. Como se está trabajando con etanol, este paso es más complejo ya que el etanol forma mezclas estables con el agua, y se requiere además de la destilación un filtro molecular para separarlos completamente.

5.8.2 Restos de jabón

Cuando el etanol se une a los ácidos grasos se forma agua. El aceite también puede contener agua. Los jabones se forman porque el ion Na^+ del hidróxido de sodio (NaOH) reacciona con los ácidos grasos en presencia de agua.

Si hay agua en la mezcla durante la reacción se forman más jabones de lo normal. El aceite puede contener demasiada agua y el fin del secado es quitársela. Es muy importante evitar la presencia de agua durante la preparación del etóxido. Todos los objetos que entren en contacto con el hidróxido deben estar totalmente secos.

Por el tal motivo, el biodiésel se obtiene de mejor manera en los días secos que en los días húmedos.

6. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE BIODIÉSELES

Además de los beneficios económicos, medio ambientales y de salud, el desarrollo de normas confiables que den seguridad a los usuarios de Biodiésel, constructores de motores y demás partes intervinientes, es de vital importancia para facilitar su comercialización.

Austria (ORORM C 1190) y Alemania (DIN V51606) han establecido similares normas para el Biodiésel y EE.UU. (ASTM D6751-07a) ha hecho lo propio (ver anexos). Las normas contienen especificaciones particulares para el Biodiésel. En Guatemala el control de calidad de biodiésel está regulado por el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:06 (*Referencia 2*).

Algunos parámetros fisicoquímicos regulados se resumen a continuación (*Referencia 14*):

- **Punto de inflamación:** Este parámetro se determina para satisfacer temas legales de seguridad. También es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención.
- **Viscosidad:** El biodiésel deberá tener una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia por fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. También se limita la viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección.

- **Densidad:** Da idea del contenido de energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor.

- **Cenizas sulfatadas:** Los materiales que forman cenizas en un biodiésel se pueden presentar de tres formas: sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles y catalizadores no eliminados en el proceso. Estos pueden favorecer el desgaste de motor. Para los fines de esta investigación no será analizado este parámetro ya que las condiciones han sido reguladas para minimizar su presencia, además del origen de la materia prima utilizada.

- **Azufre:** Contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor. También pueden afectar al funcionamiento del sistema de control de emisiones y a los límites medioambientales.

Para los fines de esta investigación no se analizará el contenido de azufre del biodiésel obtenido, partiendo del hecho que el aceite utilizado no tiene fuente azufre significativa y su determinación sería innecesaria.

- **Corrosión a la lámina de cobre:** Mediante la comprobación del desgaste de una lámina de cobre se puede observar si existen en el sistema compuestos corrosivos y/o presencia de ácidos que puedan atacar al cobre o a aleaciones de cobre como el bronce que forman parte del sistema de combustible.

- **Número de cetano:** Es una medida de la calidad de ignición de un combustible e influye en las emisiones de humo y en la calidad de la combustión. El número de cetano depende del diseño y el tamaño del motor, de las variaciones de la carga y velocidad y condiciones de arranque y atmosféricas. Un bajo número de cetano conlleva a ruidos en el motor, prolongando el retraso de la ignición y aumentando el peso molecular de las emisiones.
- **Agua y sedimentos:** El agua se puede formar por condensación en el tanque de almacenamiento. La presencia de agua y sólidos de desgaste normalmente pueden colmatar filtros y darle propiedades de lubricidad menores. El biodiésel puede absorber hasta 40 veces más agua que el diesel.

El agua puede provocar problemas en el motor:

- Corrosión en los componentes del motor, generalmente herrumbre. El agua se acidifica y acaba atacando a los tanques de almacenamiento.
- Contribuye al crecimiento de microorganismos. Forman lodos y limos que pueden colmatar los filtros. Además, algunos de estos microorganismos pueden convertir el azufre que posee el combustible en ácido sulfúrico, que corroe la superficie metálica del tanque.

El agua se puede presentar en el tanque de dos formas:

- Disuelta en el combustible. La cantidad de agua depende de la solubilidad de esta en el biodiésel.

- Separada de la fase de combustible en forma libre. La cantidad de ésta depende de cómo se transporte y manipule el combustible.

Los sedimentos pueden ser debidos principalmente a un mal proceso de purificación del combustible o contaminación. Afectan principalmente a la temperatura de cristalización y al número de cetano.

- **Residuo de carbón:** Da una idea de la tendencia del combustible a formar depósitos carbonosos. Se aproxima a la tendencia del motor a formar depósitos. Normalmente para el diesel se suele utilizar el 10% que queda en la destilación, pero debido a que el biodiésel tiene un perfil muy diferente de destilación (en un pequeño rango de temperaturas se destila toda la muestra ya que posee una distribución de moléculas diferentes muy pequeña), se debe utilizar el 100% de la muestra.

También se puede obtener información, a parte de la contaminación (glicerina libre y total), de la calidad de la purificación del biodiésel en la fabricación.

- **Destilación:** Indica la temperatura máxima a la que se debe evaporar el combustible a una condiciones de presión y temperaturas dadas. El biodiésel a la temperatura de 360°C tiene que estar el 90% destilado, según la norma ASTM D1160)
- **Número ácido (TAN):** Determina el nivel de ácidos grasos, o generados por degradación, que se presentan en el combustible. Si posee un alto grado de acidez se formará una cantidad importante de depósitos y también se producirá mayor corrosión en el sistema.

- **Índice de yodo:** Indica la tendencia a la oxidación de un biodiésel porque da idea del grado de insaturaciones que poseen sus ésteres.
- **Punto de nube:** Indica la temperatura a la cual empiezan a precipitar ciertos compuestos del combustible (parafinas, materia insaponificable, etc.). Es una medida muy importante a tener en cuenta cuando se utiliza el motor en climas fríos. El valor debe ser definido por el usuario, dependiendo del clima en el cual se utilice el motor.
- **Contenido en metales (Na, K, P, etc.) y ácidos grasos libres:** Contribuyen al aumento del residuo carbonoso de manera notable y también a las cenizas, generando residuos inorgánicos parcialmente quemados. Además, también se pueden formar jabones que colmatan los filtros del combustible.
- **Lubricidad:** es la cualidad de un líquido para proporcionar una lubricación adecuada para prevenir el desgaste entre dos superficies en movimiento. Los combustibles con un contenido bajo en azufre o baja viscosidad tienden a tener una lubricidad menor.
- **Glicerina libre:** Determina el nivel de glicerina no enlazada presente en el biodiésel. Su presencia normalmente se debe a una mala purificación del biodiésel. Niveles altos pueden causar problemas de depósitos en el inyector, así como colmatación de filtros. Pueden dañar los sistemas de inyección debido a los compuestos inorgánicos y jabones que se acumulan en la glicerina. Si la cantidad de glicerina es superior al 0,5 % esta puede afectar al contenido de residuo carbonoso.

- **Glicerina total:** Determina el nivel de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajos significan que se ha producido un alto grado de conversión en el aceite o grasa, y se han formado gran cantidad de monoésteres. Niveles altos de mono, di y triglicéridos pueden provocar la colmatación de los filtros, depósitos carbonosos en los inyectores y pueden afectar adversamente a las propiedades a bajas temperaturas. Esto es debido a que al poseer temperaturas de ebullición superiores provocan que la combustión sea mucho peor. Además aumentan la viscosidad del biodiésel.

Este parámetro se analiza por la Norma ASTM D6584, la cual requiere un análisis por cromatografía gaseosa. En esta investigación no se realiza este análisis por la carencia del equipo adecuado.

- **Contenido en alcohol:** Puede provocar problemas de lubricidad y en el Número de Cetano. Desde el punto de vista de la seguridad el punto de inflamación disminuye. Por otro lado, junto a la presencia de alcohol puede venir asociada glicerina disuelta en este con los consiguientes problemas antes mencionados.
- **Estabilidad a la oxidación:** Se determina la vida de almacenamiento y la degradación potencial de un combustible durante su almacenamiento. La oxidación de un combustible suele venir acompañada de la formación de gomas solubles (provocando problemas de formación de depósitos en la punta del inyector y fallos en las boquillas) e insolubles (provocando colmatación de filtros).

Además dicha estabilidad a la oxidación se puede ver alterada por los diversos contaminantes que pueden estar presentes en el biodiésel.

Los parámetros del biodiésel que se estudiarán en esta investigación se enumeran en la sección de metodología y aunque no se estudiarán todos (por falta de recursos y métodos implementados), éstos nos darán una idea general de las características y la calidad de los productos obtenidos (Ver *Tabla IV* y *Tabla V*).

Tabla IV. Especificación nacional de calidad para el biodiésel (B100)^A

Características	Unidades	Método de análisis	Valores
Aditivos	-	-	Reportar ^B
Contenido de ésteres	% masa	EN 14103	96.5 mín.
Contenido de metanol o etanol	% masa	EN 14110	0.20 máx.
Gravedad API a 15.56 °C (60 °F) o densidad a 15 °C	° API kg/m ³	ASTM D287 ASTM D1298	Reportar
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	h	EN 14112	6.0 mín.
Punto de inflamación	°C	ASTM D93	130.0 mín.
Agua y sedimentos	% volumen	ASTM D2709	0.050 máx.
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	ASTM D 445	1.9 – 6.5 ^C
Ceniza sulfatada	% masa	ASTM D874	0.020 máx.
Contenido de azufre total ^D	mg/kg	ASTM D5453	15 máx.
Corrosión en lámina de cobre, 3 h, 50 °C	-	ASTM D130	No. 3 máx.
Numero de cetano	-	ASTM D613	47 mín.
Punto de enturbamiento ^E	°C	ASTM D2500	Reportar
Residuo de carbón ^F	% masa	ASTM D4530	0.050 máx.
Número ácido	mg KOH/g	ASTM D664	0.50 máx.
Glicerina libre	% masa	ASTM D6584	0.020 máx.
Glicerina total	% masa	ASTM D6584	0.240 máx.

Continúa

Contenido de fósforo	% masa	ASTM D4951	0.001 máx.
Temperatura de destilación, temperatura equivalente atmosférica, 90% recuperado	°C	ASTM D1160	360 máx.
Sodio (Na) y potasio (K) combinados	mg/kg	UOP 391	5 máx.
Calcio (Ca) y magnesio (Mg) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máx.

^A Si para cumplir condiciones especiales de operación de equipos que requieran, por razones técnicas, especificaciones de calidad diferentes a las indicadas en esta tabla, el Ente Nacional Competente podrá autorizar mediante resolución razonada, la modificación de las mismas.

^B La información que se debe presentar para cada aditivo que se agregó a este producto es: Hoja de datos de seguridad, proporción agregada, propiedad del producto.

^C El límite superior de viscosidad de 6.5mm²/s, es más alta que el del diesel base petróleo y debe ser tomado en cuenta cuando sea utilizado para mezcla.

^D El B100 es esencialmente libre de azufre

^E El punto de enturbamiento del biodiésel es generalmente más alto que el del diesel base petróleo y debe ser tomado en cuenta cuando sea utilizado para mezcla

^F El residuo de carbón debe ser obtenido del 100% de la muestra.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. **Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07**. Referencia 2

Tabla V. Estándares internacionales para biodiésel (B100) para diferentes normas

Propiedad	Unidad	Austrian Standard C1190 Feb. 91	DIN 51606 Sept 1997	ASTM	Euro Standard EN 14214
Densidad a 15°C	g/cm ³	0.86 - 0.90	0.875 - 0.90		0.86 - 0.90
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	6.5 - 9.0 (20°C)	3.5 - 5.0	1.9 - 6.0	3.50 - 5.00
Flash point	°C (°F)	min. 55 (131)	min. 110 (230)	Min. 93	min. 120 (248)
CFPP	°C (°F) verano invierno	max. 0 (32) max. -8 (17.6)	max. 0 (32) max. -20 (-4)		
Azufre total	mg/kg	max. 200	max. 100	max. 500	max. 10.0
Carbón Conradson a 100% a 10%	% masa	max. 0.1 /	max. 0.05 /	max. 0.05 /	/ max. 0.30
Número de Cetano	-	min. 48	min. 49	Min. 47	min. 51
Ceniza Sulfatada	% masa	max. 0.02	max. 0.03	max. 0.02	max. 0.02
Contenido de agua	mg/kg	Libre de agua	max. 300		max. 500
Aguay y sedimento	% Vol			max. 0.05	
Contaminación total	mg/kg		max. 20		max. 24
Corrosión en lámina de cobre (3h,50°C)			1	No. 3b max.	1
Valor de neutralización	mg	max. 1	max. 0.5	Max. 0.8	max. 0.50
Estabilidad de oxidación	H				min. 6.0
Contenido de metanol	% masa	max. 0.30	max. 0.3	Max. 0.2	max. 0.20

Continúa

Contenido de ésteres	% masa				min 96.5
Monoglicéridos	% masa		Max. 0.8		max. 0.80
Diglicéridos	% masa		Max. 0.4		max. 0.20
Triglicéridos	% masa		Max. 0.4		max. 0.20
Glicerina libre	% masa	max. 0.03	max. 0.02	max. 0.02	max. 0.02
Glicerina total	% masa	max. 0.25	max. 0.25	max. 0.24	max. 0.25
Índice de yodo			max. 115		max. 120
Ácido Linolenico ME	% masa				max. 12.0
Polinsaturado (>=4db)	% masa				max. 1
Contenido de fósforo	mg/kg		Max. 10		max. 10.0
Contenido alcalino (Na+K)	mg/kg		max. 5		max. 5.0
Metales alcalinotérreos (Ca + Mg)	mg/kg				max. 5.0

Fuente: Ana C. Rafael. **Product technical data.** Referencia 19.

RESULTADOS

Tabla VI. Rendimiento volumétrico en la obtención de biodiésel respecto al grado de oxidación de los aceites crudos de piñón seleccionados

Muestra	Aceite utilizado (mL)	Biodiésel obtenido (mL)	Rendimiento volumétrico	Promedio
12M A	1000	0	0,0%	El método no se pudo evaluar
12M B	500	0	0,0%	
6M A	1000	850	85,0%	86,5%
6M B	500	440	88,0%	

Tabla VII. Parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido a partir del aceite de piñón almacenado por seis meses (6M) respecto al estándar nacional (Referencia 2)

Parámetro fisicoquímico	Método ASTM	6M A	6M B	Promedio	Respecto al estándar nacional
Destilación al 90% (°C)	D86	368	369	368,5	
Punto de inflamación (°C)	D93	174	172	173	Cumple
Corrosión en lámina de cobre	D130	1	1	1	Cumple
Calor de combustión (MJ/Kg)	D240	40,38	39,99	40,185	
Gravedad API	D287	30,6	30,5	30,55	Reportar
Gravedad Específica	D287	0,8729	0,8735	0,8732	
Viscosidad Cinemática (cSt)	D445	4,9	4,9	4,9	Cumple
Cenizas (% masa)	D482	0,01	0,01	0,01	
Índice de cetano calculado	D976	48,9	48,7	48,8	Cumple
Densidad a 15°C	D1298	872	873	872,5	
Color	D1500	1,1	1,1	1,1	
Agua y sedimento (% volumen)	D1796	< 0.05	< 0.05	< 0.05	Cumple

Tabla VIII. Análisis de varianza de repetibilidad del método para el aceite de piñón almacenado por seis meses (6M)

Parámetro fisicoquímico	Método ASTM	6M A	6M B	Varianza
Destilación al 90% (°C)	D86	368	369	0,5
Punto de inflamación (°C)	D93	174	172	2
Corrosión en lámina de cobre	D130	1	1	0
Calor de combustión (MJ/Kg)	D240	40,38	39,99	0,076
Gravedad API	D287	30,6	30,5	0,005
Gravedad Específica	D287	0,8729	0,8735	2E-07
Viscosidad Cinemática (cSt)	D445	4,9	4,9	0
Cenizas (% masa)	D482	0,01	0,01	0
Índice de cetano calculado	D976	48,9	48,7	0,02
Densidad a 15°C	D1298	872	873	0,5
Color	D1500	1,1	1,1	0
Agua y sedimento (% volumen)	D1796	< 0.05	< 0.05	0

Tabla IX. Comparación entre parámetros fisicoquímicos del biodiésel testigo y el producto obtenido (6M)

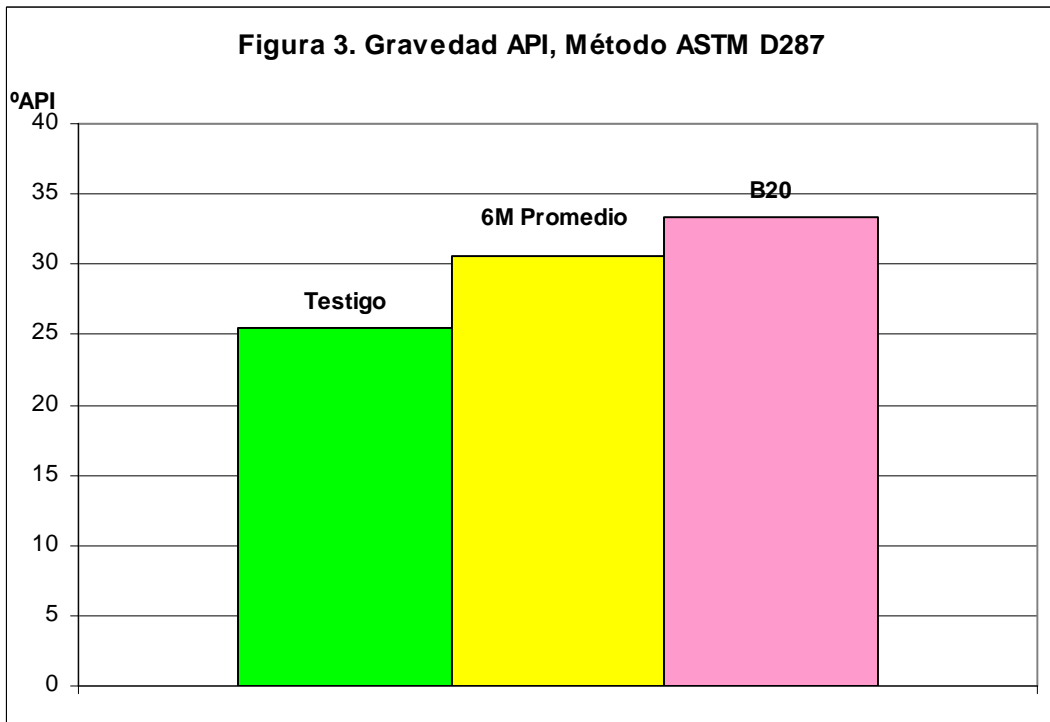
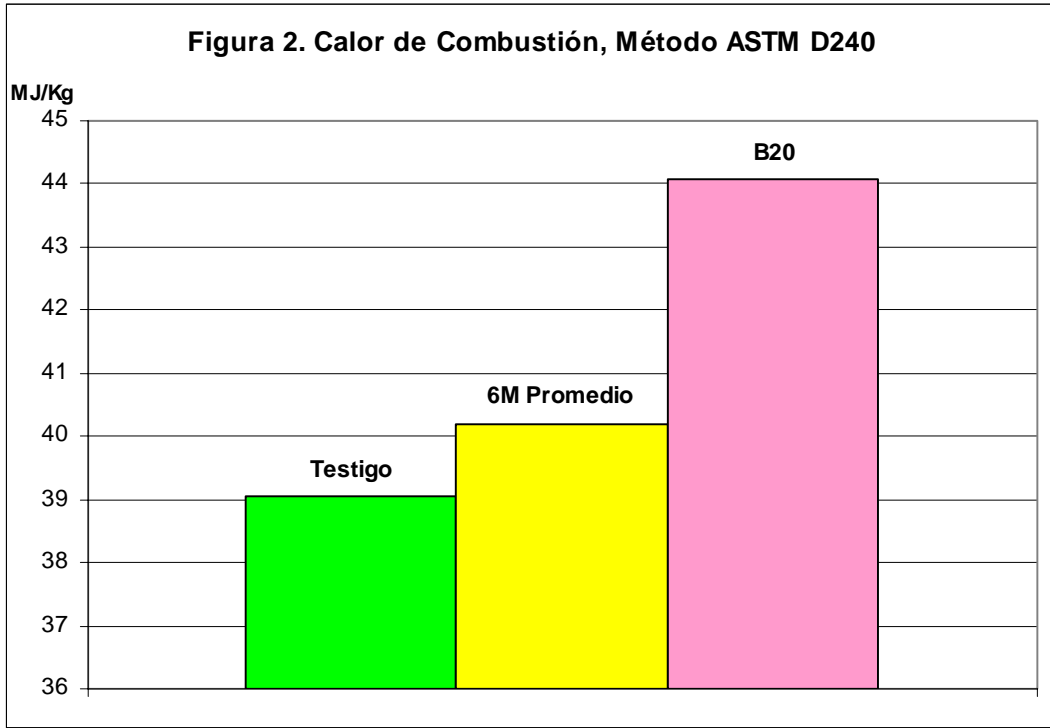
Prueba fisicoquímica	Método ASTM	Testigo	6M Promedio	Desv. estándar
Destilación al 90% (°C)	D86	361	368,5	5,3033
Punto de inflamación (°C)	D93	131	173	29,698
Corrosión en lámina de cobre	D130	1	1	0
Calor de combustión (MJ/Kg)	D240	39,06	40,18	0,7955
Gravedad API	D287	25,4	30,55	3,6416
Gravedad Específica	D287	0,9018	0,873	0,0202
Viscosidad Cinemática (cSt)	D445	10,1	4,9	3,677
Cenizas (% masa)	D482	0,01	0,01	0
Índice de cetano calculado	D976	40,5	48,8	5,869
Densidad a 15°C	D1298	901,3	872,5	20,365
Color	D1500	1,9	1,1	0,5657
Agua y sedimento (% volumen)	D1796	< 0.05	< 0.05	

Tabla X. Parámetros fisicoquímicos del biodiésel testigo, el producto obtenido (6M) y la mezcla B20 preparada

Prueba fisicoquímica	Método ASTM	Testigo	6M Promedio	B20
Destilación al 90% (°C)	D86	361	368,5	350
Punto de inflamación (°C)	D93	131	173	83
Corrosión en lámina de cobre	D130	1	1	1
Calor de combustión (MJ/Kg)	D240	39,06	40,18	44,07
Gravedad API	D287	25,4	30,55	33,4
Gravedad Específica	D287	0,9018	0,8732	0,8586
Viscosidad Cinemática (cSt)	D445	10,1	4,9	3,5
Cenizas (% masa)	D482	0,01	0,01	0,01
Índice de cetano calculado	D976	40,5	48,8	50,3
Densidad a 15°C	D1298	901,3	872,5	858
Color	D1500	1,9	1,1	1,9
Agua y sedimento (% volumen)	D1796	< 0.05	< 0.05	< 0.05

Tabla XI. Parámetros fisicoquímicos del diesel testigo utilizado en la mezcla B20 preparada

Parámetro fisicoquímico	Método ASTM	Resultado
Destilación al 90% (°C)	D86	333
Punto de inflamación (°C)	D93	78
Corrosión en lámina de cobre	D130	1
Calor de combustión (MJ/Kg)	D240	44,95
Gravedad API	D287	34,0
Gravedad Específica	D287	0,8555
Viscosidad Cinemática (cSt)	D445	3,3
Cenizas (% masa)	D482	0,01
Índice de cetano calculado	D976	49
Densidad a 15°C	D1298	855
Color	D1500	0,5
Agua y sedimento (% volumen)	D1796	< 0.05



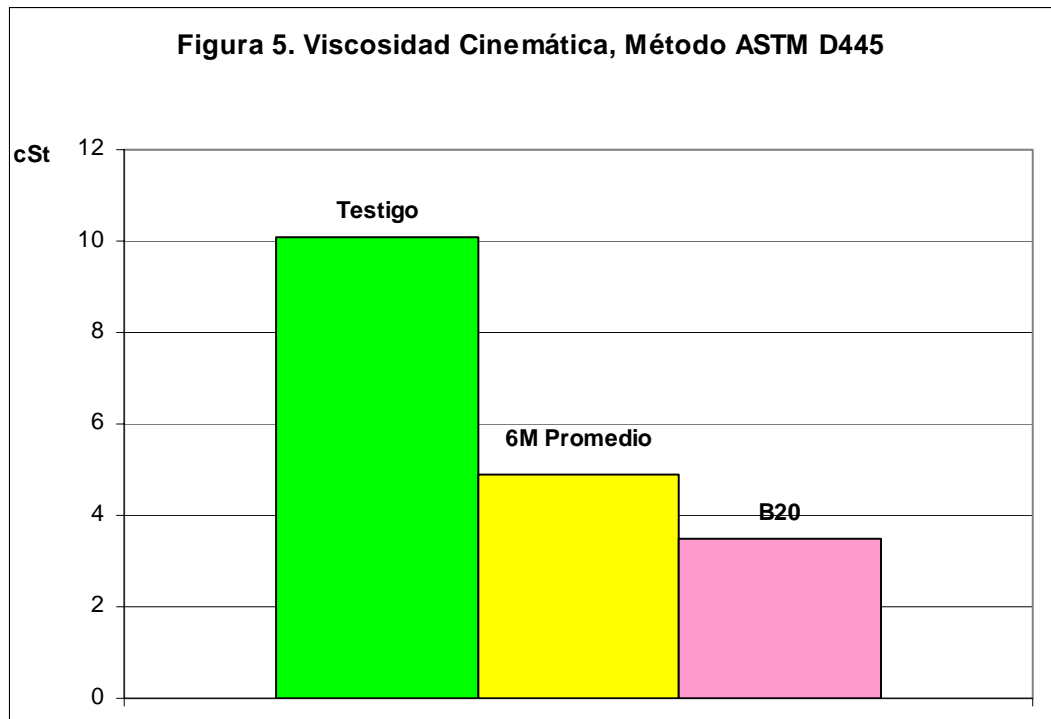
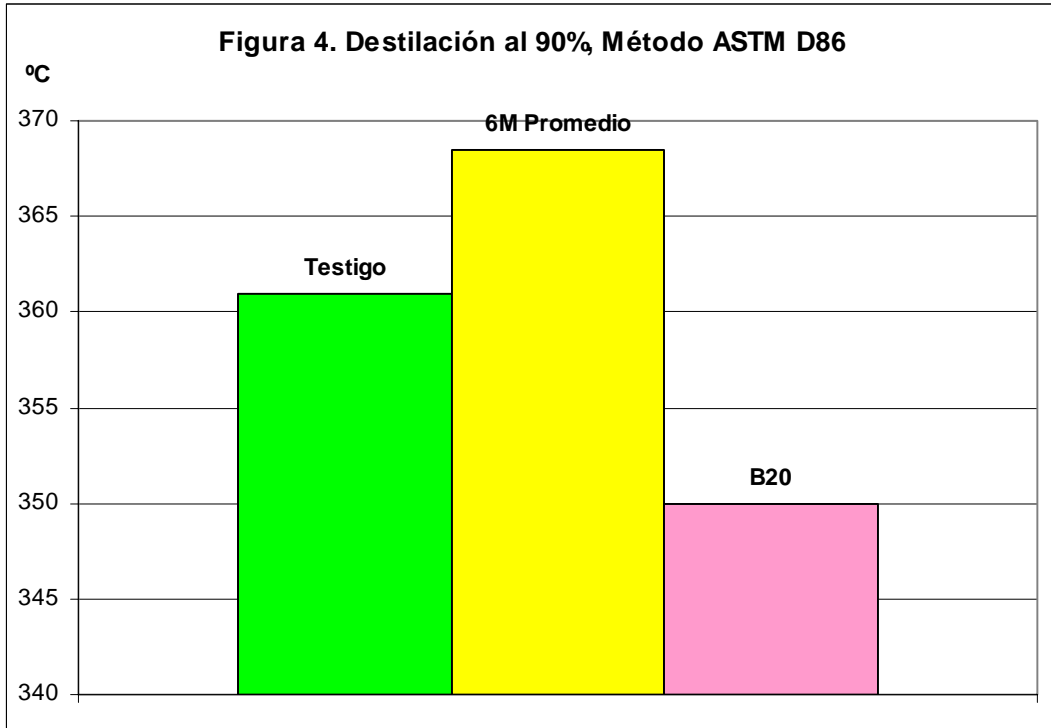


Figura 6. Punto de Inflamación, Método ASTM D93

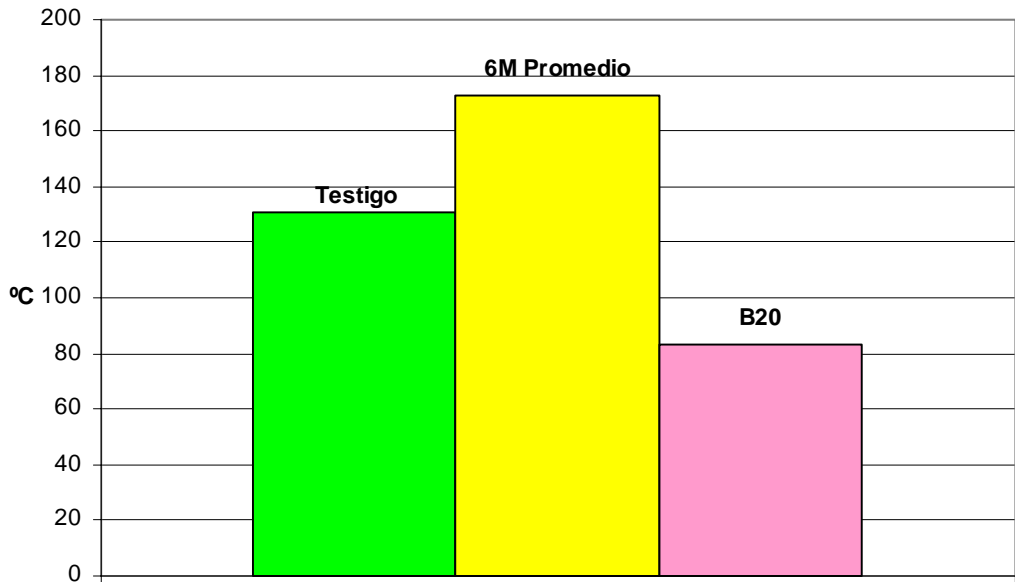


Figura 7. Color, Método ASTM 1500

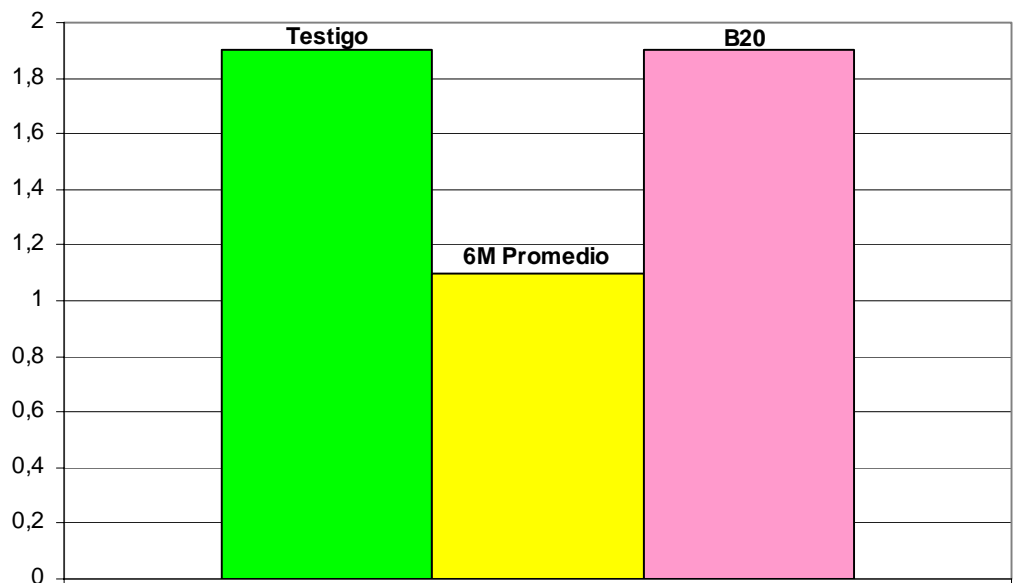
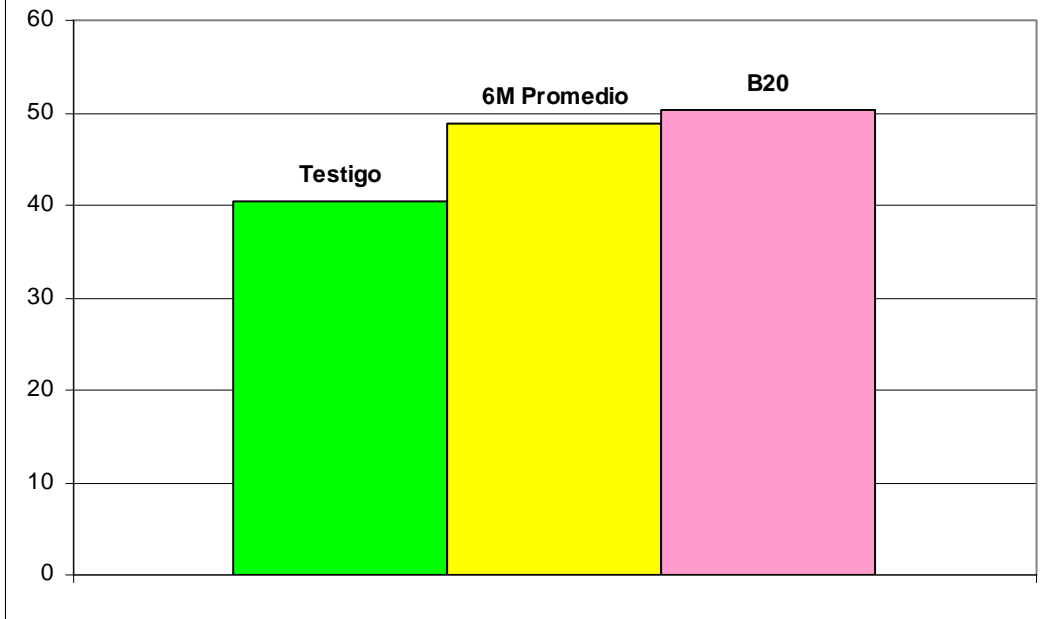


Figura 8. Índice de cetano calculado, Método ASTM D976



CONCLUSIONES

1. El rendimiento promedio de biodiésel a nivel laboratorio utilizando el método referido es de 86,5% al utilizar aceite de piñón almacenado por seis meses.
2. El aceite de piñón almacenado por doce meses presenta una demanda mayor de álcali que el aceite almacenado por seis meses en una relación de 20:1 en promedio
3. No fue posible evaluar el método para el aceite oxidado por doce meses.
4. Los parámetros fisicoquímicos del biodiésel obtenido a partir de aceite almacenado por seis meses cumplen con los estándares nacionales de calidad, según el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:06.
5. No existen diferencias significativas entre los rendimientos y parámetros fisicoquímicos de los diferentes lotes de biodiésel obtenido a partir de aceite almacenado por seis meses.
6. Las propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido a través del método referido no difieren estadísticamente de la muestra testigo de biodiésel utilizado.
7. La mezcla B20 de biodiésel a partir de aceite de piñón almacenado por seis meses no afecta negativamente los parámetros fisicoquímicos del diesel 2D.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario realizar un pretratamiento de desgomado a los aceites vegetales recién extraídos, para evitar problemas de formación de emulsiones durante el proceso.
2. Es preferible utilizar un exceso de catalizador y de alcohol en aceites que presenten una alta demanda de álcali, ya que la técnica de valoración no puede ser aplicada eficientemente.
3. Es muy importante mantener los insumos y la materia prima libres de humedad durante todo el proceso de obtención de biodiésel.
4. La valoración de cada lote de aceite vegetal que se desee tratar se deberá hacer con mucha precisión, con el fin de optimizar el uso de insumos (catalizador y alcohol).
5. Utilizar sodio metálico como catalizador en la transesterificación debería aumentar la eficiencia del proceso de obtención. Sería necesario analizar sus posibles problemas y su factibilidad operativa.
6. La utilización de hidróxido de potasio (KOH) como catalizador permitiría economizar tiempo y energía al preparar el etóxido debido a su mayor solubilidad en etanol pero se debería hacer un balance económico ya se necesitaría una mayor cantidad del mismo para llevar a cabo la reacción.

7. Es importante preparar el etóxido por aparte y agregarlo cuando ya este completamente disuelto el catalizador para evitar cualquier efecto de saponificación indeseable.
8. Para mejorar la eficiencia global del método se recomienda realizar un análisis de los parámetros físicos y operativos del proceso (agitación, temperatura y tiempo).
9. Es recomendable realizar los lavados del biodiésel utilizando ácido acético diluido solamente en el primer lavado y reutilizar el agua de los siguientes lavados.
10. Sería muy útil conocer la aplicabilidad de este método en aceites producidos a partir de otras plantas oleaginosas con potencial productivo en Guatemala, p.e. higuera (*ricinus communis*)
11. Conociendo los parámetros y resultados del método base – base, sería importante evaluar el escalamiento industrial del mismo o analizar posibles mejoras en los procesos industriales actuales.
12. Es importante evaluar y caracterizar el equilibrio ternario que se presenta en el sistema agua – glicerina – biodiésel, con el fin de observar el comportamiento y definir un índice de calidad respecto a la glicerina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cordero López, Jorge Alejandro. Evaluación de las propiedades físico-químicas del biodiésel obtenido a partir de aceite de palma y etanol, como combustible alternativo del Diesel 2D. Trabajo de Graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Guatemala, 2003.
2. Reglamento Técnico Centroamericano. RTCA 75.02.43:06. Biocombustibles. Biodiésel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel. Especificaciones. Noviembre 2006. Editado por: COGUANOR, CONACYT y otros.
3. Ministerio de Energía y Minas, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Suplemento. IX Foro Regional. Oportunidades Financieras para los Proyectos de Energía Renovable y Ambiente en Centro América. Hotel Marriot. Guatemala, 19 -21 de febrero del 2007. Anexo
4. Bolaños, Rosa María. Inversión extranjera para biocombustibles. Reportaje. Prensa Libre. 27 de Septiembre de 2007. Página 24. Anexo
5. Morrison, Robert y Robert Boyd. Química Orgánica. Quinta Edición. Pearson Educación. México, 1998. Pág. 868.
6. Addison, Keith. Biocombustibles. <http://journeytoforever.org/es/biocombustibles.html>
7. Asturias P., Ricardo. Biocombustibles de Guatemala. http://www.eep-ca.org/guatemala/documents/presentaciones/ricardo_asturias.pdf
8. Biodiésel en el mundo. <http://www.eco2site.com/informes/biodiesel-m.asp>. Febrero 2004.

9. Reportaje. La Prensa (Honduras). Jueves 07 de junio del 2007.
http://www.laprensahn.com/ediciones/2007/06/07/en_guatemala_y_honduras_se_instalaran_microplantas_de_biocombustibles
10. García Camus, Juan Manuel. Biocarburantes líquidos. Biodiésel y etanol.
http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/CITM E-biocarburantes.ppt
11. Dr. Jorge Martínez H. y otros. Biocombustible de la nueva era energética. Revista HYPATIA. Revista de Divulgación científico-tecnológica del Gobierno del Estado de Morelos. CEPROBI – IPN.
http://hypatia.morelos.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=247
12. Ing. Rodolfo J. Larosa. Proceso para la producción de biodiésel (metilester o esteres metílicos de ácidos grasos) Refinación de glicerina.
www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf
13. Ing. Agr. Jorge A. Hilbert. Empleo de los biocombustibles en motores. Biodiésel. Instituto de Ingeniería Rural. www.inta.gov.ar/balcarce/noticias/inta_expone/AuditorioGuillermoCovas/Biodiesel.pdf
14. Ciria, J. Ignacio. Propiedades y características de diesel y biodiésel.
<http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>
15. Benjumea, H. Pedro. Scientia et Technica Año X, No 24, Mayo 2004. Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma africana para a producción de biodiésel. <http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/16190169-174.pdf>
16. Dra. Gretel Villanueva Ramos. Aspectos fundamentales en la producción de biodiésel. Universidad Marta Abreu de las Villas. Conferencia dictada en el Seminario de Biocombustibles. Dirección General de Energía. Guatemala, agosto 2007.

17. Determinación de la incertidumbre en medidas químicas. Curso de especialización. Validación de métodos para el análisis de muestras de agua, ambiente y salud. San José, Costa Rica. Septiembre 2007.
18. Castro, Paula. Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú. Soluciones prácticas. Lima Perú. www.scielo.org.pe/pdf/mc/v2n2/a06v2n2.pdf
19. Rafael, Ana C. Tecnia. Product Technical data. http://www.tecna.net/products_solutions/biofuels/biodiesel/docs/TECNIA_Process4DIESEL_BiodieselSpecificationsStandards.pdf

BIBLIOGRAFÍA

1. Biodiésel Uruguay. Jatropha: Fuente de biodiésel. <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/jatropha-curcas.php>
2. Calero Cáceres, William y otros. **Síntesis y refinación de biodiésel y glicerina obtenidos a partir de grasa vegetal**. Universidad Central de Ecuador. Facultad de Ciencias Químicas. Marzo 2007.
3. Carlstein, Ricardo G. El biodiésel como solución energética. <http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodisel.htm>
4. Jatropha World. Centro para la promoción de jatropha. www.jatrophabiodiesel.org
5. Lecaros, Pablo y Hero Morales. **Biocombustibles en Chile**. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Chile, 2006.
6. Propiedades de la jatropha curcas. <http://www.biodieselpain.com/2007/05/07/propiedades-de-la-jatropha-Curcas/>
7. Romero Erazo, Heber Roberto. Elaboración, análisis y comparación de biodiésel a partir de aceite de palma mediante dos procesos a nivel de planta piloto. Trabajo de Graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Guatemala, 2005.

APÉNDICE

METODOLOGÍA

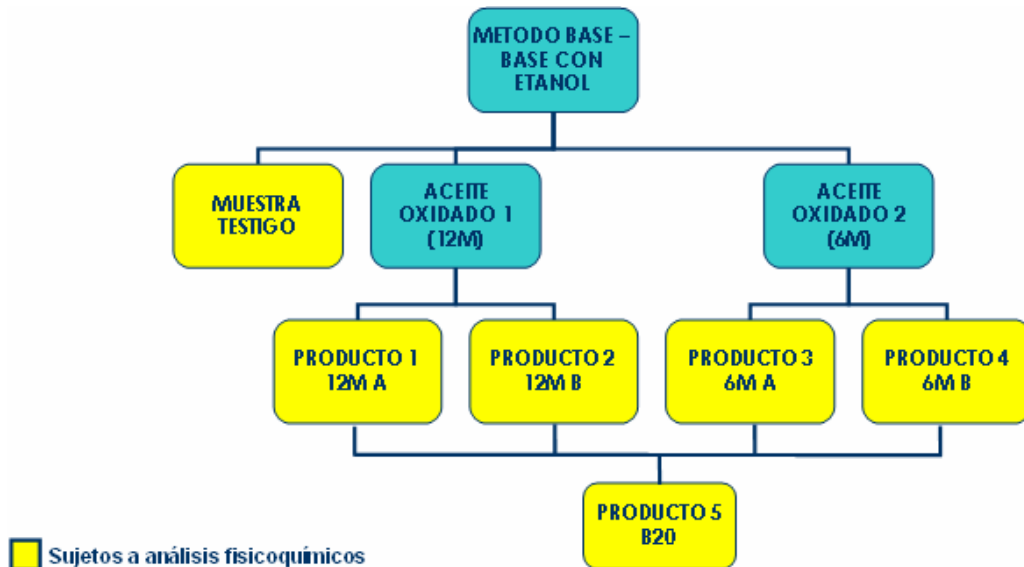
I. Diseño del experimento

Se lleva a cabo un diseño anidado completo con duplicados en las terminales de cada ramificación. Se escoge este diseño ya que cada una de las corridas experimentales serán realizadas en condiciones intermedias de precisión para cada variable (tiempo de oxidación) lo cual hace representativo el uso de duplicados.

Con este tipo de diseño (*Referencia 17*):

- Considera la variabilidad experimental del método analítico con el que analiza la muestra representativa y la muestra problema
- Se puede obtener información sobre la repetibilidad, y sobre la variabilidad entre series con análisis estadísticos adecuados.

Figura 9. Diagrama de diseño anidado del experimento



- a. **Muestra testigo:** Biodiésel producido industrialmente a partir de aceite recién extraído de piñón. Donado por la empresa Biocombustibles de Guatemala S. A. Se le realizan las pruebas fisicoquímicas que se enlistan en la siguiente sección.
- b. **Aceites oxidados 1 y 2:** Aceites de piñón (*Jatropha Curcas L.*) que han sido almacenados por diferentes períodos de tiempo: seis meses (6M) y doce meses (12M). A partir de estos aceites se obtienen dos lotes de biodiésel para cada una de ellos utilizando el método base – base (producto 1, 2, 3 y 4). Se realizan las pruebas fisicoquímicas enlistadas en la siguiente sección.
- c. **Producto 5 (B20):** Mezcla preparada con 80% de diesel 2D y 20% de biodiésel obtenido. Se realizan las pruebas fisicoquímicas a esta mezcla.

Pruebas fisicoquímicas para el biodiésel obtenido

No se estudian todos los parámetros regulados por la norma ASTM por falta de recursos y de implementación de métodos, pero los parámetros que se enlistan a continuación podrán dar una idea general de la calidad de los productos obtenidos:

- a. Calor de combustión: del calorímetro de bomba, Método ASTM D 240
- b. Corrosión en lámina de cobre, Método ASTM D 130
- c. Gravedad API, Método ASTM D 287
- d. Destilación de productos del petróleo, Método ASTM D 86: Se utiliza este método, aunque la norma ASTM estipula la utilización del método D1160, ya que permitirá observar el comportamiento aproximado de la curva de destilación de los productos obtenidos.
- e. Viscosidad cinemática, Método ASTM D 445
- f. Ceniza en productos del petróleo, Método ASTM D 482: Aunque este parámetro no está regulado para el biodiésel, nos dará una idea de la cantidad total de sodio, potasio y fósforo que se encontraban originalmente en la muestra.
- g. Agua y sedimento en aceites combustibles, Método ASTM D 1796
- h. Punto de inflamación por copa cerrada Pensky Martens, Método ASTM D93
- i. Color, Método ASTM D 1500
- j. Índice de cetano calculado para combustibles destilados, Método ASTM D 976

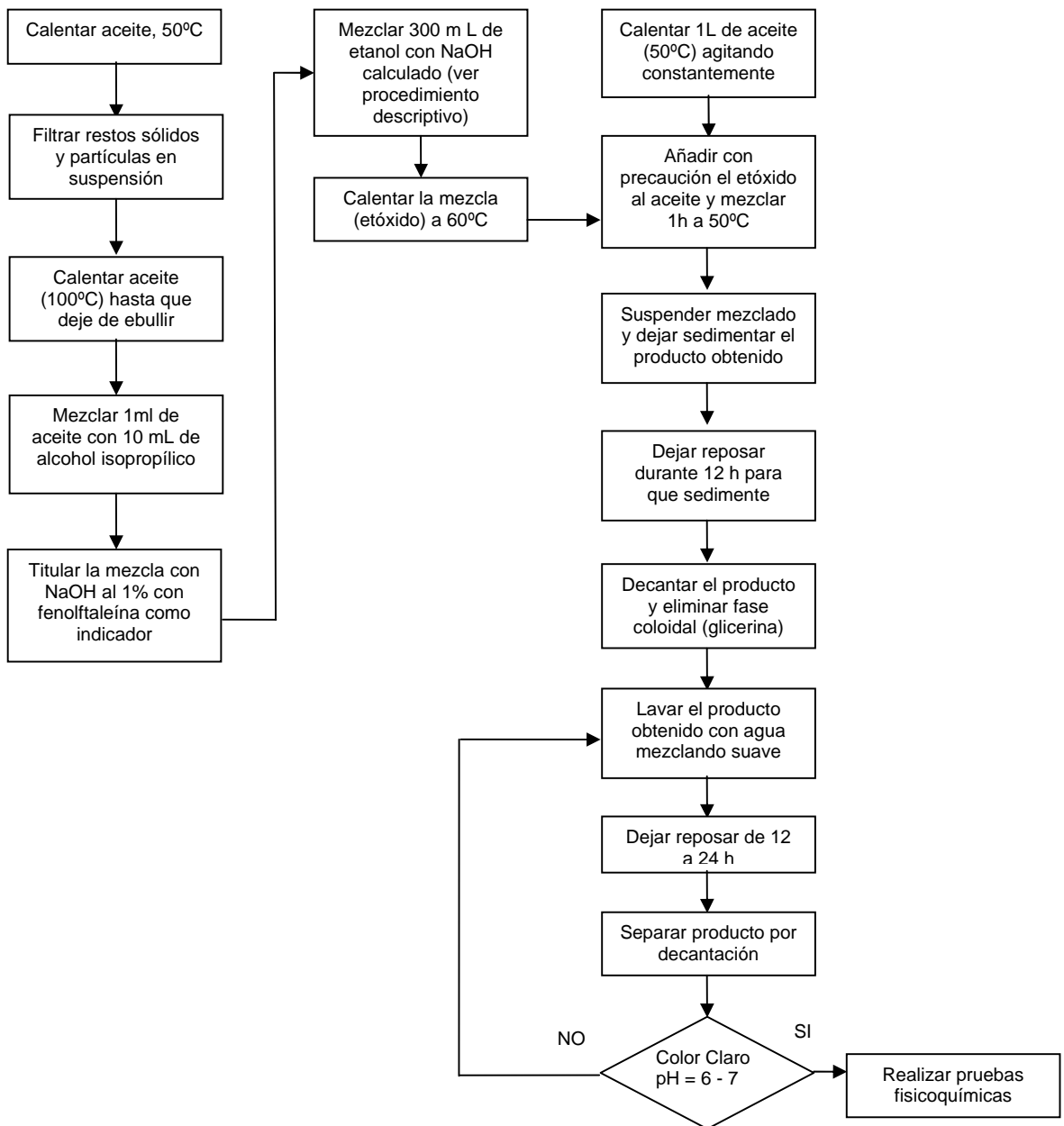
Los procedimientos detallados para cada una de estas pruebas se encuentran resumidos en la *Referencia 1* y en los métodos originales de la Norma ASTM.

Manejo de datos y análisis estadístico:

- a. Se determina el rendimiento volumétrico para cada uno de los lotes de biodiésel obtenido.
- b. Se obtienen los resultados promedios de cada una de las pruebas fisicoquímicas realizadas a cada muestra y se comparan con las especificaciones nacionales e internacionales.
- c. Se realizan tests estadísticos de análisis de varianza (ANOVA) para los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas de los diferentes lotes con el fin de conocer si existen diferencias estadísticas significativas entre las series y respecto a la muestra testigo.
- d. Se comparan gráficamente de los resultados de las pruebas fisicoquímicas del biodiésel B20 respecto a la muestra testigo y al biodiésel obtenido.
- e. Se comparan cualitativamente los resultados obtenidos de las pruebas fisicoquímicas con las especificaciones nacionales e internacionales.

II. Procedimiento del Método Base – Base para la obtención de biodiésel:

Figura 10. Diagrama de flujo del método base – base para la obtención de 1L de biodiésel



Procedimiento descriptivo:

- a. Calentar continuamente el aceite (a 50 °C aproximadamente) para disminuir su viscosidad.
- b. Filtrar los restos sólidos y partículas en suspensión presentes en el aceite si es necesario utilizando papel filtro No. 41 o manta filtrante.
- c. Calentar el aceite a 100 °C aproximadamente hasta que deje de ebullición con el fin de eliminar el agua presente.
- d. Preparar una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 0,1% en peso mezclando 1 g de NaOH en 1 L de agua destilada.
- e. Preparar fenolftaleína para utilizarla como indicador ácido – base disolviendo 1 g del indicador sólido en una mezcla de 800 mL de etanol y 200 mL de agua desionizada.
- f. Mezclar 1 mL de aceite caliente con 10 mL de alcohol isopropílico puro y titular utilizando la fenolftaleína como indicador. Realizar cinco repeticiones para descartar el posible error.
- g. Para elaborar un litro, mezclar rápidamente 0.3 L de etanol con la cantidad de NaOH calculada según la ecuación siguiente: *gramos de NaOH = litros de aceite a tratar * (volumen de NaOH (mL) utilizado en titulación + 7)*
- h. Mezclar con precaución hasta disolver completamente el hidróxido en el alcohol (Etóxido Sódico) y calentar a 60 °C.
- i. En otro recipiente, calentar 1 L del aceite a una temperatura de 40 – 50 °C para disminuir su viscosidad y homogenizar mediante agitación constante.
- j. Añadir con precaución el Etóxido Sódico al aceite y mezclarlo durante 1 h a temperatura constante (40 – 50 °C).
- k. Suspender el mezclado y dejar sedimentar el producto obtenido y los coproductos.

- l. Dejar reposar durante 12 horas o más para que sedimente.
- m. Decantar el producto obtenido para eliminar la glicerina (fase coloidal)
- n. Lavar el biodiésel obtenido para eliminar el contenido de jabones añadiendo agua y mezclando suavemente con el fin de no agitar los sedimentos de jabón.
- o. Dejar reposar de 12 a 24 horas, hasta que el agua con las impurezas se separen y se depositen en el fondo.
- p. Separar por decantación el agua que se deposita en el fondo, junto con los otros residuos.
- q. Si el biodiésel presenta un color lechoso, significa que aún contiene agua y se deberá calentar lentamente para evaporarla.
- r. Medir el pH del biodiésel
- s. Repetir el proceso de lavado hasta conseguir un pH entre 6 y 7
- t. Realizar las pruebas fisicoquímicas correspondientes para determinar la calidad del producto obtenido.

III. Recursos:

- a. Materiales y accesorios:
 - Papel filtro Whatman No. 41 y 42
 - Papel pH (Merck)
 - Láminas de cobre para prueba ASTM D130
 - Soportes y pinzas
 - Trípodes
 - Triángulos de porcelana
 - Mechero Mecker

- Pissetas de 300 ml
- Tapones de hule No. 1, 2 y 3
- Termómetros ASTM No.: 9F, 8C, 9C, 12C y 47C
- Hidrómetros ASTM: 53H, 4H, 5H

b. Cristalería:

- Beakers de 2000, 400, 250 y 150 mL
- Microbureta de 25 mL
- Balones aforados de 1000 mL
- Balones de decantación de 1000 mL
- Varillas de agitación y gendarmes
- Vidrios de reloj
- Pipetas de 1, 2, 10, 50 mL
- Balones de destilación de 150 mL
- Embudos
- Probetas volumétricas de 10, 100 y 1000 mL
- Viscosímetros capilares ASTM No. 50, 100 y 200
- Tubos de ensayo
- Tubos de 100 mL para agua y sedimento
- Crisoles y cápsulas de porcelana

c. Reactivos:

- 3 galones de aceite de piñón degradado (6 meses de almacenamiento)
- 3 galones de aceite de piñón degradado (12 meses de almacenamiento)
- Biodiesel de aceite de piñón recién extraído (fabricado industrialmente)

- Hidróxido de sodio (NaOH) grado reactivo
- Etanol absoluto
- Fenolftaleína grado indicador
- Alcohol isopropílico
- Ácido acético
- Naranja de metilo grado indicador
- Tolueno

d. Equipo:

- Balanza analítica, marca Mettler, modelo A163.
- Plancha de calentamiento – agitación, marca Thermolyne.
- Campana de extracción, marca Labconco, serie 87556.
- Bomba calorimétrica y accesorios, marca Parr, serie 7304.
- Destilador de productos del petróleo, marca Precision Scientific, modelo 14AX-2.
- Centrífuga de 8 cabezas, marca BICO INC., serie 67643.
- Mufla, marca Thermolyne, modelo FB1415M.
- Baño de viscosidad, marca Koehler, Serie No. K23400
- Flash tester, copa cerrada, marca Fisher/Tag, modelo 809N0003
- Destilador de agua, marca Barnstead, modelo MP-6A
- Baño de calentamiento para prueba de corrosión en lámina de cobre, marca Precision Scientific, modelo 10AV-11
- Colorímetro, marca Fisher/Tag, modelo A472

e. Lugar:

Instalaciones del Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas:
Diagonal 17 29-78 zona 11, Las Charcas, Guatemala, Guatemala.

f. Recursos financieros:

El financiamiento de los costos de la investigación y del análisis fisicoquímico del producto obtenido, así como otros gastos que pueda generar la investigación será cubierto con recursos propios.

ANEXOS

Tabla XII .Especificación biodiésel (B100) ASTM D6751 – 07a. Marzo 2007

Property	ASTM Method	Limits	Units
Calcium & Magnesium, combined	EN 14538	5 max	ppm (ug/g)
Flash Point (closed cup)	D 93	93 min.	Degrees C
Alcohol Control (One of the following must be met)			
1. Methanol Content	EN14110	0.2 Max	% volume
2. Flash Point	D93	130 Min	Degrees C
Water & Sediment	D 2709	0.05 max.	% vol.
Kinematic Viscosity, 40 C	D 445	1.9 - 6.0	mm ² /sec.
Sulfated Ash	D 874	0.02 max.	% mass
Sulfur			
S 15 Grade	D 5453	0.0015 max. (15)	% mass (ppm)
S 500 Grade	D 5453	0.05 max. (500)	% mass (ppm)
Copper Strip Corrosion	D 130	No. 3 max.	
Cetane	D 613	47 min.	
Cloud Point	D 2500	Report	Degrees C
Carbon Residue 100% sample	D 4530*	0.05 max.	% mass
Acid Number	D 664	0.50 max.	mg KOH/g
Free Glycerin	D 6584	0.020 max.	% mass
Total Glycerin	D 6584	0.240 max.	% mass
Phosphorus Content	D 4951	0.001 max.	% mass
Distillation, T90 AET	D 1160	360 max.	Degrees C
Sodium/Potassium, combined	EN 14538	5 max	ppm
Oxidation Stability	EN 14112	3 min	hours

Workmanship Free of undissolved water, sediment, & suspended matter
BOLD = BQ-9000 Critical Specification Testing Once Production Process Under Control

* The carbon residue shall be run on the 100% sample.

A considerable amount of experience exists in the US with a 20% blend of biodiesel with 80% diesel fuel (B20). Although biodiesel (B100) can be used, blends of over 20% biodiesel with diesel fuel should be evaluated on a case-by-case basis until further experience is available.

Fuente: Biodiésel. Marzo 2007. www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/BDSpec.PDF