

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Instalación de una planta piloto para la producción de
biodiesel a partir de aceite girasol dentro del laboratorio de
operaciones unitarias de la Universidad del Valle de
Guatemala

Trabajo de investigación presentado por
Diego Estuardo Ayala Leiva
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2008

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Instalación de una planta piloto para la producción de
biodiesel a partir de aceite girasol dentro del laboratorio de
operaciones unitarias de la Universidad del Valle de
Guatemala

Guatemala
2008

Instalación de una planta piloto para la producción de biodiesel a partir de aceite girasol dentro del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

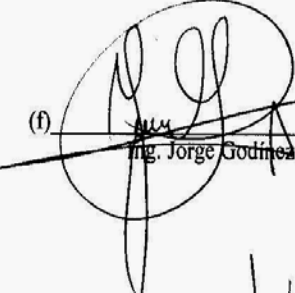
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Instalación de una planta piloto para la producción de
biodiesel a partir de aceite girasol dentro del laboratorio de
operaciones unitarias de la Universidad del Valle de
Guatemala

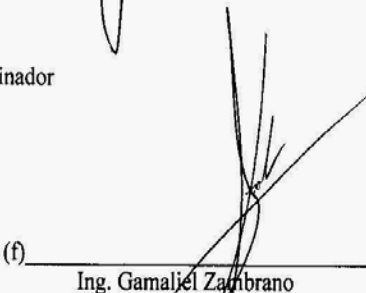
Trabajo de investigación presentado por
Diego Estuardo Ayala Leiva
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Química

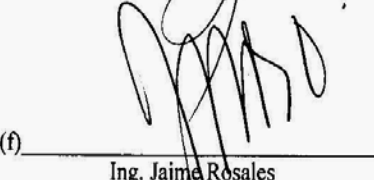
Guatemala
2008

Vo.Bo. Asesor

(f) 
Ing. Jorge Godínez

Vo.Bo. Tribunal Examinador

(f) 
Ing. Gamaliel Zambrano

(f) 
Ing. Jaime Rosales

(f) 
Ing. Jorge Godínez

Fecha de aprobación: Guatemala, 24/06/2008

PREFACIO

Mi interés en el desarrollo sostenible y las energías renovables surge del entendimiento de integrar el desarrollo en tres pilares básicos: económico, social y ambiental. Es necesario plantear la posibilidad de mejorar la tecnología y la organización social de forma que el medio ambiente pueda recuperarse al mismo ritmo que es afectado por la actividad humana. El concepto de utilizar aceites vegetales, grasas animales o incluso aceites de desecho como un combustible renovable y sostenible me parece fascinante.

El momento que definió mi motivación a la investigación en el biodiesel fue en una conversación con el Ing. Jorge Godínez cuando me planteó la idea de construir una planta piloto para la producción de biocombustibles. Aunque el tema de los biocombustibles renovables ya no es algo nuevo globalmente, en Guatemala actualmente este campo de investigación está muy poco desarrollado.

Esta investigación es un intento para explicar las variables y la metodología que conlleva la producción del biodiesel. Espero que el lector encuentre en este trabajo información útil, clara y estimulante en cuanto al proceso de conversión de aceites vegetales en combustibles.

Este proyecto es el resultado de la contribución de varios cooperadores a los cuales sostengo un gran agradecimiento y alta estima. Para el Ing. Jorge Emilio Godínez por su orientación y asesoría para la realización de este trabajo, al Ing. Gamaliel Zambrano quien como director del departamento de ingeniería química brindo su apoyo desde el inicio y a los señores Moisés Vásquez y Cristian García, técnicos de laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Dedico este trabajo a mi padre Rony Estuardo Ayala Jiménez por la inspiración que me brinda con su ejemplo de vida, a mi madre Sonia Mireya Leiva de Ayala por el amor, la confianza y el apoyo incondicional que me da cada día y finalmente a mi abuelo Jorge Ayala quien con sus palabras llenas de sabiduría me ayudó sin yo darme cuenta.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO.....	v
LISTA DE CUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x

Capítulos

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. JUSTIFICACIÓN.....	25
IV. OBJETIVOS.....	26
A. Objetivos generales.....	26
B. Objetivos específicos.....	26
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	27
VI. METODOLOGÍA.....	28
VII. RESULTADOS.....	38
VIII. DISCUSIÓN.....	42
IX. CONCLUSIONES.....	48
X. RECOMENDACIONES.....	49
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	51
XII. APÉNDICE.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Emisiones de biodiesel.....	17
2. Resultados obtenidos de pruebas a nivel laboratorio.....	38
3. Resultados obtenidos del experimento 1 a nivel planta piloto.....	38
4. Resultados obtenidos del experimento 2 a nivel planta piloto.....	38
5. Resultados de análisis de la muestra de pruebas a nivel de laboratorio.....	38
6. Resultados de análisis de la muestra del experimento 2 en la planta piloto.....	39
7. Especificaciones del equipo utilizado en la planta piloto de biodiesel.....	41
8. Dimensiones del equipo utilizado para la instalación de la planta piloto.....	41
9. Costos de elaboración de biodiesel en la planta piloto a partir de distintas fuentes.....	41
10. Standard de biodiesel ASTM D6751 (Estados Unidos de Norteamérica).....	52
11. Comparación de estándares para el uso de diesel y biodiesel.....	52
12. Estándar de biodiesel EN 14214 (Unión Europea).....	53
13. Estándar de biodiesel según la Agencia Nacional de Petróleo de Brasil.....	54
14. Estándar de biodiesel según el Reglamento Técnico Centroamericano.....	55
15. Propiedades relacionadas a los combustibles para algunos aceites y grasas.....	55
16. Propiedades relacionadas a los combustibles para algunos esteres.....	56
17. Relaciones estequiométricas metanol:aceite para aceites.....	56
18. Análisis del Ministerio de Energía y Minas de muestra de biodiesel de planta piloto.....	57
19. Análisis del Ministerio de Energía y Minas de la muestra de biodiesel a nivel laboratorio.....	58
20. Descripción de costos de materiales para la instalación de planta piloto.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Reacción de transesterificación.....	6
2. Conversión vrs tiempo en una reacción de transesterificación progresiva.....	6
3. Diagrama de producción industrial de biodiesel.....	9
4. Diagrama de bloques del proceso.....	28
5. Tanque para preparación de metóxido de sodio.....	31
6. Reactor donde se produce la reacción de transesterificación.....	31
7. Llaves reguladoras de flujo de vapor.....	32
8. Agitador mecánico de reactor.....	33
9. Bomba del tanque de almacenamiento.....	33
10. Llave de decantación de glicerina.....	34
11. Separación de fases biodiesel glicerina.....	35
12. Separación biodiesel y agua en primer lavado.....	36
13. Biodiesel final obtenido.....	37
14. Elevación frontal planta piloto de biodiesel.....	40
15. Balance de masa de planta piloto de biodiesel.....	41
16. Planta piloto de biodiesel vista frontal.....	59
17. Planta piloto de biodiesel vista trasera.....	59

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto de investigación fue la instalación de una planta piloto para la producción de biodiesel basada en la reacción de transesterificación catalizada por una base dentro del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

La primera parte de este proyecto se fundamentó en la realización de pruebas a nivel laboratorio con el fin de determinar las variables óptimas del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal refinado, una vez que se determinó estas variables fue posible escalar la producción a nivel planta piloto.

La segunda fase de este trabajo consistió en el montaje de la planta a partir de materiales con los cuales ya contaba el laboratorio de operaciones unitarias pero se encontraban sin utilización. La planta fue construida sobre una base metálica móvil de 3 m x 0.90m x 1.80 m (largo x altura x profundidad) respectivamente, cuenta con un reactor de acero inoxidable con chaqueta de vapor, un tanque de almacenamiento de acero inoxidable, un sistema de tubería para conectar a ambos, un suministro de calor que utiliza vapor proveniente de la caldera de laboratorio, agitadores mecánicos tanto en el reactor como en el tanque de almacenamiento, una bomba para desplazar los líquidos y los controles de temperatura y presión respectivos.

La tercera parte de este proyecto consistió en la operación experimental de la planta piloto, en esta experimentación se definió las variables óptimas del proceso y se especificó detalladamente la metodología a seguir para obtener el biocombustible deseado.

Con el fin de evaluar la calidad del biodiesel obtenido a partir del aceite de girasol nuevo de la producción en planta piloto se envió muestras del producto al laboratorio técnico de hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas para que se realizara el análisis de las propiedades fisicoquímicas requeridas por los estándares internacionales de biodiesel, ASTM D-6751 para Estados Unidos y EN14214 para la Unión Europea. A partir de los resultados obtenidos se concluye que la planta piloto instalada, así como las variables y metodologías establecidas para su operación, producen un biodiesel con buenas características, las cuales cumplen con los estándares internacionales de calidad.

ABSTRACT

The main objective of this research project was the installation of a pilot plant for biodiesel production based on alkali-catalyzed transesterification inside the unitary operations laboratory of Guatemala's Del Valle University.

The first part of this work was the construction of the plant using materials of the laboratory that were not used at the present time. The plant was built on a metallic structure with the following dimensions: 3 m x 90 cm x 1.80 m (long x high x wide) respectively, it has a stainless steel reactor with a steam jacket, a stainless steel storage tank, a pipe system that connects the tank with the reactor, a heating system that provides steam coming from the boiler of the laboratory, mechanic mixers for the reactor and the tank, a bomb to pump the liquids and the temperature and pressure indicators.

The second step in this project was the experimental operation of the plant, in this step we defined the basis of the industrial production of biodiesel, including the main variables and detailed methodology.

Looking forward to evaluated the quality of the biodiesel obtained from the production process, samples of the product were send to technical laboratory of the Mines and Energy Ministry to be analyzed and compared to the Biodiesel Standard ASTM D6751 (United States) and to the Biodiesel Standard EN 1424 (Europe). From the results, we can conclude that the installed pilot plant, along with process variables and methodology, produced a biodiesel that meets the international standards for biodiesel

I. INTRODUCCIÓN

Para obtener biodiesel, el aceite vegetal o la grasa animal se somete a una reacción química llamada transesterificación. En esta reacción, el aceite vegetal reacciona en presencia de un catalizador (usualmente una base) con un alcohol (usualmente metanol) para producir biodiesel (metil éster) y glicerol.

El biodiesel puede ser producido de una gran variedad de materias primas, éstas materias incluyen los aceites vegetales más comunes (aceite de soya, aceite de piñón, aceite de canola, aceite de coco, aceite de girasol), grasas animales y aceites de desperdicio (aceites fritos usados). La selección de la materia prima depende principalmente del lugar geográfico donde se encuentre. Dependiendo del origen y la calidad de la materia prima es necesario realizar cambios en el proceso de producción.

El biodiesel es miscible con el petrodiesel, en muchos países, esto ha llevado al uso de mezclas de biodiesel con petrodiesel en lugar de biodiesel puro. Es importante distinguir que estas mezclas con petrodiesel no es biodiesel. Comúnmente las mezclas con petrodiesel son denotados por acrónimos como B20, que indica una mezcla de 20% de biodiesel con petrodiesel.

Otra de las materias primas utilizadas para la producción del biodiesel de este trabajo es el metanol, el cual se usa como el alcohol para producir biodiesel debido a que es el alcohol más económico, sin embargo otros alcoholes como el etanol o el isopropanol pueden producir un biodiesel con mejores propiedades de combustible.

El biodiesel tiene varias ventajas comparándolo con el petrodiesel en adición de ser completamente competitivo con el petrodiesel en la mayoría de aspectos técnicos:

- Se deriva de una fuente doméstica renovable, así reduce la dependencia sobre el petróleo y beneficia a su preservación.
- Es biodegradable.
- Reduce la mayoría de emisiones contaminantes (con la excepción de óxido de nitrógeno, NO_x).
- Flash point más alto, lo que lleva a manejo y almacenamiento más seguro.
- Excelente lubricidad, un hecho que esta ganando importancia con el advenimiento de los combustibles de petrodiesel con bajo contenido de azufre.

Algunos problemas asociados con el biodiesel son su inherente alto precio, que en algunos países se compensa por la legislación y la regulación de incentivos o subsidios para reducir o suprimir impuestos, un pequeño incremento de las emisiones de NO_x, estabilidad al ser expuesto al aire (estabilidad oxidativa), y propiedades de flujo en climas fríos. El alto precio de este combustible puede

ser parcialmente compensado por el uso de materias primas más económicas lo cual ha despertado un interés en materiales como aceites desecho (aceites de freimiento usados).

La principal razón por la cual los aceites vegetales y las grasas animales son transesterificadas a metil éster (biodiesel) es porque la viscosidad cinemática del biodiesel es muy cercana a la del petrodiesel, para la norma estándar internacional EN ISO3104 la viscosidad del biodiesel debe estar en un rango de 3.5 – 5 mm²/s y la del diesel debe ser 2.0 – 4.5 mm²/s. La alta viscosidad de aceites y grasas no transesterificados lleva a problemas operacionales en el motor diesel como los depósitos de aceite en varias partes del motor. Aunque existen motores y quemadores que pueden usar aceites que no han sido refinados, la gran mayoría de motores requiere de combustibles de baja viscosidad.

El hecho de que los aceites vegetales, grasas animales, y sus derivados como metil éster son convenientes para utilizar como combustibles de diesel demuestra que debe de existir cierta similitud con el petrodiesel, o al menos algunos de sus componentes. La propiedad de combustibles que mejor muestra esta afinidad es el octanaje. En adición a la calidad de ignición como lo muestra la escala de octanaje, otras propiedades son importantes para determinar la conveniencia de utilizar el biodiesel como combustible. Calor de combustión, pour point, cloud point, viscosidad cinemática, estabilidad oxidativa y lubricidad son algunas de las propiedades más importantes.

II. ANTECEDENTES

El biodiesel es un combustible sustituto del gas-oil para motores diesel, el cual puede ser producido partiendo de materias primas agrícolas (aceites vegetales y/o grasas animales) y metanol (el cual también puede ser producido a partir de residuos de la agricultura).

El biodiesel posee las mismas propiedades del combustible diesel empleado como combustible para automóviles, camiones, ómnibus y puede ser mezclado en cualquier proporción con el diesel obtenido de la refinación del petróleo.

No es necesario efectuar ninguna modificación en los motores para poder emplear este combustible. Importantes fabricantes de vehículos europeos efectuaron pruebas con resultados satisfactorios en automóviles, camiones y ómnibus.

El biodiesel, desde el punto de vista de la inflamabilidad y toxicidad, es más seguro que el gas-oil proveniente del petróleo, no es peligroso para el ambiente y es biodegradable.

Entre otras ventajas respecto del gas-oil derivado del petróleo son:

➤ Emisiones

- Monóxido de carbono (CO) : la emisión durante la combustión del biodiesel en motores diesel es del orden del 50% inferior (comparada con aquella que produce el mismo motor con combustible diesel). Es conocida la toxicidad del monóxido de carbono sobre todo en las ciudades.
- Dióxido de azufre (SO₂) : no se produce emisión de dióxido de azufre por cuanto el biodiesel no contiene azufre. El dióxido de azufre es nocivo para la salud humana así como para la vegetación.
- Material particulado: esta emisión con el empleo del biodiesel se reduce del 65% respecto del combustible diesel. Las partículas finas son nocivas para la salud.
- Productos orgánicos aromáticos: el biodiesel no contiene productos aromáticos (benceno y derivados) siendo conocida la elevada toxicidad de los mismos para la salud.
- Balance de dióxido de carbono (CO₂) : el dióxido de carbono emitido durante la combustión del biodiesel es totalmente reabsorbido por los vegetales. Por lo tanto el biodiesel puede ser considerado un combustible renovable.

El biodiesel no es nocivo para la salud humana, para la vegetación, los animales vivos y no daña monumentos y/o edificios. Por tal motivo su empleo es ventajoso frente al combustible diesel sobre todo para el transporte público en las grandes ciudades. Es seguro y fácil de transportar debido a que es biodegradable y posee un punto de inflamación de 150°C contra 64°C del combustible diesel.

➤ Balance energético

El balance energético del biodiesel, considerando la diferencia entre la energía que produce 1 Kg. de biodiesel y la energía necesaria para la producción del mismo, desde la fase agrícola hasta la fase industrial es positivo al menos en de 30%. Por lo tanto O sea desde el punto de vista energético no agota los recursos de la naturaleza.

Además de las consideraciones favorables desde el punto de vista ecológico y energético merece destacarse la posibilidad del empleo inmediato en los motores

El biodiesel quema perfectamente no requiriendo ningún tipo de modificación en motores existentes pudiendo alimentarse alternativamente con este o combustible diesel o la mezcla de ambos. Esta es una diferencia importante respecto de otras experiencias de sustitución de combustibles como la brasileña con el etanol, donde era necesario efectuar en los motores modificaciones irreversibles.

El empleo de biodiesel aumenta la vida de los motores debido a que posee un poder lubricante mayor mientras el consumo de combustible además la auto ignición, la potencia y el torque del motor permanecen inalterados.

El biodiesel fue asimismo probado por fuerzas armadas de diversos países europeos siendo empleado en tanques de combate y otros vehículos militares con muy buenos resultados.

Hoy en Europa varios centenares de miles de toneladas del mismo se producen y vuelcan en el mercado consumidor. La especificación del producto fue acordada, emitida y aprobada por todos los gobiernos de la Comunidad Económica Europea. Los principales países productores son: Alemania, Francia, Italia, Bélgica y Austria. Hoy en día este combustible no es una alternativa experimental es una realidad en el mercado europeo.

Es asimismo de particular interés para aquellos países que poseen una gran potencialidad agropecuaria con la posibilidad de producir oleaginosas, con costos reducidos, ya que les permite mantener o aumentar el área sembrada, mantener el precio de las oleaginosas y de este modo crear una nueva actividad agroindustrial que expande ya sea la producción agraria y la aceitera creando puestos de trabajo y favoreciendo en definitiva al ambiente.

Desde el punto de vista químico el biodiesel es una mezcla de los esterres metílicos de los ácidos grasos triglicéridos de los aceites vegetales y o grasas animales empleados como materia prima. En Europa la materia prima fundamental es la colza, ya que es la oleaginosa existente más económica, pudiendo emplearse otros aceites vegetales como ser: girasol, palma, soja. Otras posibilidades son emplear grasas animales de bajo costo y el aceite exhausto empleado para frituras.

Para la producción de 1 (una) t. de biodiesel son necesarios: 1 t. de aceites vegetales y/o grasas animales, 0,1 ton. de alcohol metílico. Otros productos necesarios en menor medida para su

producción son productos químicos de fácil obtención en el mercado local o internacional. Es importante subrayar que la planta de biodiesel produce además glicerol bruto como subproducto (10 % aprox. De la producción de biodiesel). La glicerina producida una vez refinada puede ser empleada en distintos campos como ser: industria química (plásticos, pinturas, conservantes), cosmética, farmacéutica, explosivos.

Como se mencionara precedentemente los esteres metílicos de los ácidos grasos son además un valioso intermedio útil para preparar:

- Alcoholes grasos (materias primas para la preparación de detergentes aniónicos, emulsionantes, plastificantes, retardantes en la evaporación del agua en cosméticos).
- Esteres de ácidos grasos que no es posible obtener por esterificación directa.

Representando por lo tanto un producto muy valioso para producir derivados oleoquímicos. Desde el punto de vista del impacto ambiental y seguridad el proceso no es contaminante. Una elevada productividad, bajos costos de inversión hacen que sea factible encarar este emprendimiento teniendo en cuenta además la posibilidad de construir localmente aquello que la industria del país en condiciones de competitividad y calidad pueda fabricar (tanques, reactores, bombas, instrumental, etc).

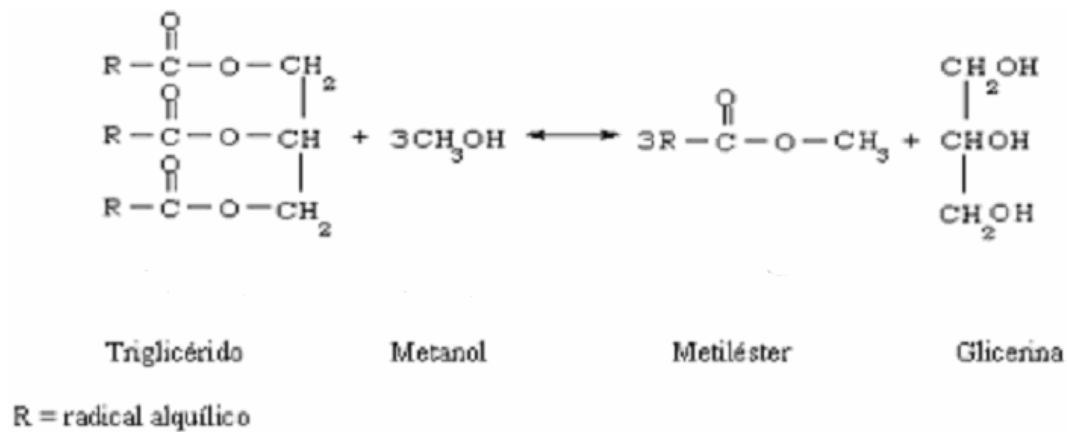
A. Producción de biodiesel

1. Bases de la reacción de transesterificación. Se han investigado cuatro métodos para reducir la alta viscosidad de aceites vegetales para que puedan ser utilizados en motores diesel comunes sin que produzcan problemas operacionales como depósitos en el motor, los cuales son los siguientes: mezcla con petrodiesel, pirolisis, microemulsificación y transesterificación. La transesterificación es el método más común y esta es la única reacción que lleva al producto conocido como biodiesel, llamado también ésteres metílicos de aceites y grasas.

Los esteres más comúnmente preparados son los ésteres metílicos, esto se debe a que el metanol es el alcohol mas económico, aunque existen algunas excepciones en países como Brasil, donde el precio del etanol es mas bajo. Además del metanol y el etanol, se están investigando otros alcoholes con pesos moleculares bajos con potencial para la producción de biodiesel, las propiedades de varios esteres se presenta en tablas en el apéndice A.

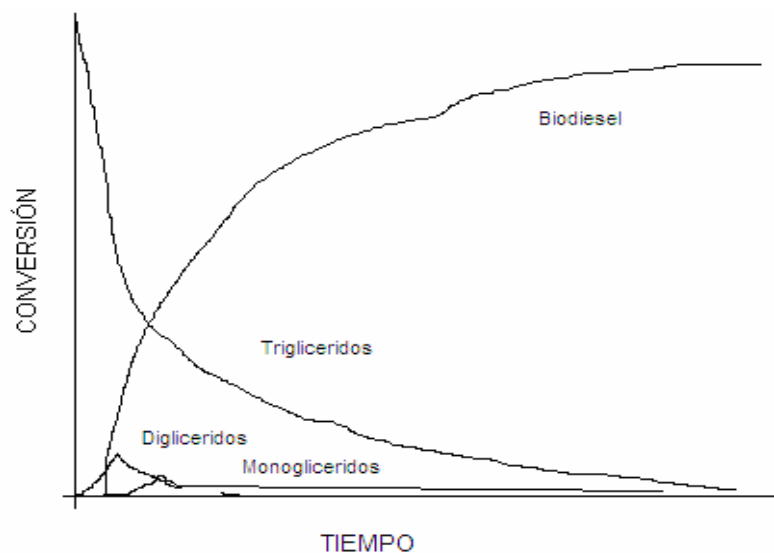
Además de aceites vegetales y grasas animales, otros materias primas como aceites de desecho pueden ser útiles para la producción de biodiesel, sin embargo, cambios el procedimiento de la reacción deben ser hechos debido a la presencia de agua o ácidos grasos libres en la materia prima. El esquema general de la reacción de transesterificación se presenta en la Figura 1.

Figura 1: Reacción de transesterificación.



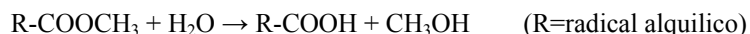
Mono- y diglicéridos se forman como intermediarios durante la reacción de transesterificación. La Figura 2 muestra cualitativamente la conversión vs. Tiempo de reacción para la reacción de transesterificación tomando en cuenta estos intermediarios. En esta figura, detalles como el orden de concentración de los glicéridos y sus concentraciones máximas al final de la reacción pueden ser variables dependiendo de las condiciones.

Figura 2: Conversión vs tiempo en una reacción de transesterificación progresiva.



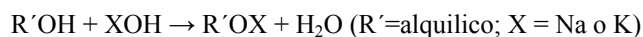
En general la reacción de transesterificación puede realizarse por medio de un catalítico básico o ácido. Sin embargo, en una catálisis homogénea, usar un catalítico básico como hidróxido de sodio o de potasio resulta en un proceso más rápido que con una catálisis ácida.

Además del tipo de catalítico (básico vs. ácido), existen otros parámetros en la reacción de transesterificación que deben considerarse, incluyendo la relación molar del alcohol:aceite vegetal, la temperatura, tiempo de reacción, grado de refinamiento del aceite vegetal, el efecto de la presencia de humedad y ácidos grasos libres (FFA, free fatty acids). Para obtener el máximo rendimiento de la reacción de transesterificación, el alcohol debe estar libre de humedad y el contenido de ácidos grasos libres en el aceite debe ser menor al 0.5%. La ausencia de humedad en la reacción de transesterificación es importante porque acorde a la ecuación para esteres metílicos siguiente,



La hidrólisis de los esteres alquílicos (biodiesel) formados puede convertirlos a ácidos grasos libres. Similarmente ya que los triglicéridos son esteres, la reacción de estos con agua puede formar ácidos grasos libres.

A 32⁰C la reacción de transesterificación se puede completar en un 99% después de 4 horas usando un catalítico alcalino (NaOH o NaOMe). A T ≥ 60⁰C, usando una relación molar alcohol:aceite de al menos 6:1, aceite completamente refinado la reacción se completa produciendo éster metílico en 1h. Los parámetros (temperatura de reacción = 60⁰C y relación molar 6:1 metanol:aceite) se han convertido en estándares para la transesterificación basada en metanol. Otros alcoholes como etanol y butanol requieren temperaturas de reacción mas altas (75 y 114⁰C respectivamente) para obtener la conversión. El uso de alcóxidos en solución con el alcohol correspondiente (metóxido de sodio) tienen la ventaja que la reacción de formación de agua no ocurre en el sistema,



Esto asegura que el sistema de la reacción de transesterificación se mantenga lo más libre de agua como sea posible. El catalítico es higroscópico, por lo cual se deben tomar precauciones para prevenir contactos con humedad.

En principio, la reacción de transesterificación es reversible, aunque en la producción de biodiesel la reacción inversa no ocurre o es en gran medida insignificante porque la glicerina que se forma no es miscible con el producto, lo cual lleva a un sistema con dos fases. La transesterificación del aceite de soya con metanol o 1-butanol reporta una reacción con cinética de segundo orden o una reacción de pseudo-primer orden, dependiendo de la relación molar del alcohol:aceite de soya (30:1 reacción de pseudo-primer orden, 6:1 reacción de segundo orden). Sin embargo, la cinética original de la reacción fue reinvestigada y se encontraron algunas diferencias. La metanólisis de aceite de girasol a un radio molar metanol: aceite de girasol de 3:1 se encontró que inició con cinética de segundo orden pero luego la tasa disminuyó debido a la formación de glicerina. La razón es que el aceite vegetal y el metanol no son idealmente miscibles. El fenómeno de la miscibilidad resulta en una variación de tiempo en la formación de esteres metílicos como se indica en la figura 2. La formación de glicerina a partir de triglicéridos procede ordenadamente desde di- y monoglicéridos con una molécula de ácidos grasos formados en cada paso. Desde la observación que los di-glicéridos alcanzan su máxima concentración antes que los monoglicéridos se concluye que el último paso, la formación de glicerina a

partir de monoglicéridos ocurre más rápido que la formación de monoglicéridos a partir de diglicéridos.

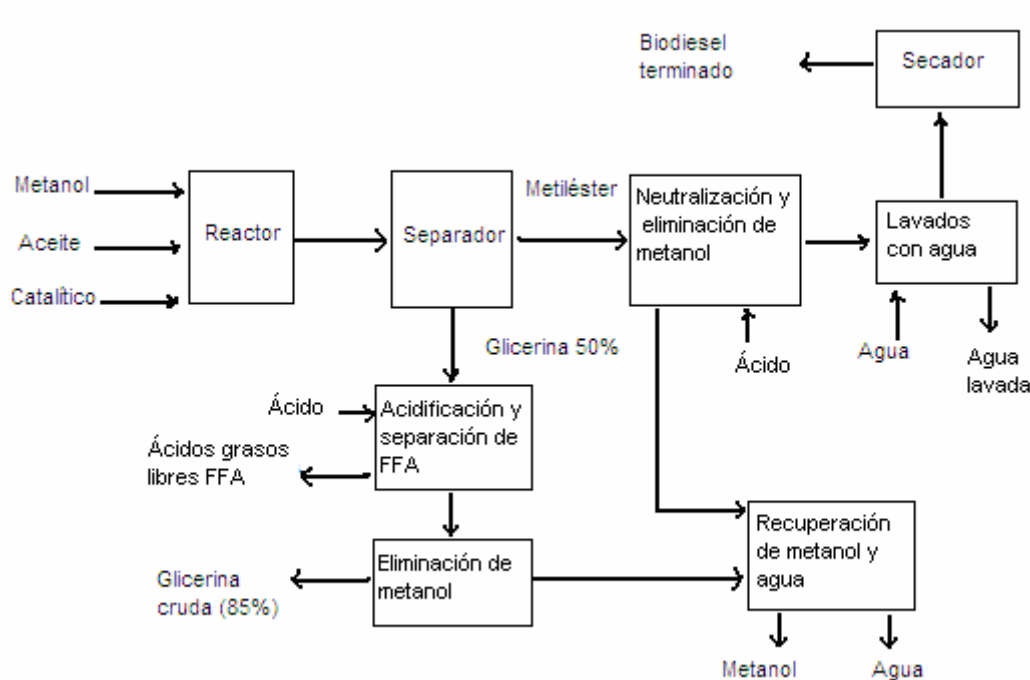
Se ha encontrado que el uso de solventes como el tetrahidrofurano (THF) o el metil terbutil eter (MTBE) pueden acelerar la reacción de la metanólisis de aceites vegetales debido a la solubilización del metanol en el aceite a una tasa comparable a la de la reacción de butanólisis. Esto se hace con el fin de superar la limitada miscibilidad del alcohol y el aceite en la etapa inicial de la reacción creando una sola fase. Esta técnica es aplicable al uso de otros alcoholes y para catalíticos ácidos con ácidos grasos libres altos. Sin embargo, los radios molares del alcohol: aceite y otros parámetros son afectados por la adición de estos solventes. Además existe mayor dificultad en la recuperación y reciclaje del solvente aunque esto puede ser simplificado escogiendo un solvente con un punto de ebullición cercano al del alcohol en uso.

2. Producción industrial. La química descrita anteriormente forma la base de la producción industrial de biodiesel. Es importante considerar que el proceso de producción del biodiesel y su calidad están estrechamente relacionados. El proceso utilizado para refinar la materia prima y convertirla a biodiesel determina si el combustible cumplirá con las especificaciones deseadas.

Para la transesterificación basada en un catalítico básico, la figura 3 muestra un diagrama de flujo para el proceso de producción de biodiesel a partir de materias primas que contienen bajos niveles de ácidos grasos libres. Estas materias primas incluyen el aceite de soya, aceite de canola, y los aceites de desecho de restaurantes. El metanol, el catalítico y el aceite son combinados en un reactor donde se agitan por 1h a 60 °C. Las plantas mas pequeñas utilizan reactores por lotes, para probar procesos nuevos que todavía no se han perfeccionado, para probar productos de alto costo, y en procesos que son difíciles de convertir en operaciones continuas. El reactor por lotes tiene la ventaja de que se pueden obtener conversiones elevadas de si se deja el reactivo en el reactor durante periodos largos de tiempo, pero también tiene la desventaja de que los costos de mano de obra por lote son elevados, y de que es difícil efectuar producción a gran escala. La mayoría de plantas con operaciones a mayor escala (4, 000,000 L/año) utilizan procesos de flujo continuo para los que se emplean reactores de tanque con agitación continua (CSTR). La reacción puede realizarse en dos pasos, en el primero se agrega el 80% del alcohol y el catalítico al aceite en una primera etapa en el reactor CSTR. Luego el producto pasa por un paso de separación de glicerina antes de que se lleve el producto a una segunda etapa CSTR, en la cual el 20% de alcohol y catalítico restante es agregado a l segundo reactor CSTR. Este procedimiento produce una reacción muy completa con la potencial ventaja de utilizar menos alcohol que el procedimiento de un solo paso.

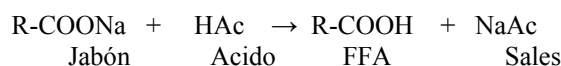
Una vez la reacción se ha completado, la glicerina se separa del metilester, debido a la baja solubilidad de la glicerina con los esterés, la separación generalmente ocurre rápido y puede completarse por gravedad utilizando un tanque de almacenamiento o por medio de una centrífuga.

Figura 3: Diagrama de producción industrial de biodiesel.



El exceso de metanol actúa como un solvente y puede demorar la separación, sin embargo, este exceso de metanol no debe ser removido hasta después de que la glicerina y el metiléster han sido separados debido a la posibilidad de reversión de la reacción de transesterificación. El agua debe ser agregada hasta después de que se ha completado la reacción para mejorar la separación de la glicerina. Es posible hacer reaccionar el aceite y el metanol sin utilizar el catalítico, lo cual elimina la necesidad de los lavados con agua, sin embargo, para ello son necesarias altas temperaturas y grandes cantidades de metanol en exceso.

Después de la separación de la glicerina, el metiléster entra a un paso de neutralización, en el cual se mezcla con ácido mineral en la cantidad necesaria. El ácido se agrega al producto de biodiesel para neutralizar todos los residuos de catalítico y cortar el jabón que se pudo haber formado durante la reacción. Los jabones reaccionan con el ácido para formar sales solubles en agua y ácidos grasos libres según la siguiente ecuación:



Posteriormente en una unidad de destilación flash FC o un evaporador de simple efecto se despoja al producto de los volátiles, compuestos fundamentalmente por metanol en exceso. Las sales se removerán durante los lavados con agua y los ácidos grasos libres se quedarán en el biodiesel. El paso de los lavados con agua se realiza para remover cualquier resto de catalítico, jabón, sales, metanol, o glicerina del biodiesel. La neutralización antes de los lavados reduce la cantidad de agua requerida y minimiza las posibles emulsificaciones que se pueden formar al agregar agua al biodiesel.

El biodiesel bien hecho se separa del agua de lavado deprisa y limpiamente. Si no está bien hecho tiene más jabón de lo normal y productos intermedios de la reacción (mono- y diglicéridos), que actúan como emulsionantes. Los emulsionantes sirven para mantener estables mezclas de aceite y agua, como la mahonesa. El jabón también lo hace. Si hay mucho jabón en el biodiesel, no se separa del agua de lavado, o lo hace muy despacio. De hecho la separación es una prueba de calidad. Si no se separa del agua de lavado no sirve como combustible. El biodiesel bueno, que ha completado la reacción, no forma emulsiones. Después del procedimiento del lavado el agua restante es removida del biodiesel por medio de una evaporación o destilación.

La glicerina obtenida de la separación del biodiesel es aproximadamente un 50% de glicerina, también contiene un poco del exceso de metanol y la mayor parte de catalítico y jabón. Esta glicerina tiene un bajo valor comercial y su desecho puede ser dificultoso. El contenido de metanol en la glicerina debe ser tratado como un desecho tóxico. El primer paso para refinar la glicerina es agregar ácido para convertir el jabón a ácidos grasos libres y sales. Los ácidos grasos libres no son solubles en la glicerina y ascenderán a la superficie de donde pueden ser removidos y reciclados. Las sales permanecen en el glicerol dependiendo de los compuestos químicos presentes algunas sales pueden precipitar. Una opción es utilizar hidróxido de potasio como catalizador de la reacción y ácido fosfórico para la neutralización, de esta forma la sal producida es fosfato de potasio, la cual puede utilizarse como fertilizante. Después de agregar ácido y separar los ácidos grasos libres, el metanol presente en la glicerina puede ser removido por destilación flash FC u otro tipo de evaporador. En este punto, la glicerina debe tener un 85% de pureza y puede ser vendida a un refinador de glicerina. El proceso de refinación de glicerina la lleva a una pureza de 99.5 a 99.7% utilizando destilación. El metanol que se remueve de las corrientes de metilester y glicerina tienden a recolectar agua, ésta debe ser removida utilizando una columna de destilación antes de reingresar el metanol al proceso, este paso puede ser más complicado si se utilizan alcoholes como etanol o isopropanol ya que estos forman azeótropos con el agua.

La glicerina procedente de la transesterificación es un estupendo desengrasante industrial. Una manera de purificarla es calentarla hasta 65.5 °C (150 °F) para que se evapore el metanol, haciéndola segura para el contacto con la piel. Mucho cuidado con el vapor de metanol. Cuando se enfría, las impurezas se hunden hasta el fondo y queda de un color marrón oscuro más uniforme. Añadiendo agua queda del color de la canela, más diluida, y es más fácil limpiarla de las manos.

Otra forma de aprovechar la glicerina es transformarla en gas metano en un digestor de metano, o mejor aún, mediante pirolisis. La pirolisis se empleó mucho durante la Segunda Guerra Mundial para que los coches funcionaran con leña. El reactor calienta la materia prima (madera o glicerina) en un recipiente hermético sin oxígeno. En estas condiciones la materia prima no arde, sino que desprende metano. El metano se almacena en una bolsa expandible o comprimido en un depósito.

En el biodiesel también hay jabón. Cuando el metanol se une a los ácidos grasos se forma agua. El aceite también puede contener agua. El jabón se forma porque el ion Na^+ del hidróxido de sodio (NaOH) reacciona con los ácidos grasos en presencia de agua. Si hay un exceso de agua en la mezcla durante la reacción, se forman más jabones de lo normal. El aceite que ha sido cocinado puede contener agua y hay que quitársela.

3. Emulsiones. No deberían formarse si el combustible está bien preparado. Cuando se forma una emulsión en lo primero que hay que pensar es en el motivo, para encontrar una solución y que no vuelva a ocurrir. Lo segundo que hay que pensar es cómo salvar el lote. Un solo lote de mala calidad y con impurezas no hará daño al motor, si no dura mucho tiempo, es posible reparar el lote y aprovecharlo.

Una emulsión de poca importancia consiste en una tercera capa entre la de biodiesel y la de agua después del reposo del primer lavado. Una capa intermedia delgada como una hoja de papel es normal, puedes continuar con el segundo lavado. Si la capa intermedia es más gruesa, algo va mal. Drena esa capa dejando salir también un poco del biodiesel que tiene por encima y un poco del agua que tiene por debajo. Calienta la emulsión y deja que repose, cuando se separe la emulsión mezcla el biodiesel defectuoso con el siguiente lote de aceite para reprocesarlo. Mientras tanto continúa lavando el biodiesel que no se emulsionó en el primer lavado y ya no debería emulsionarse. Una emulsión grave no ocupa una capa intermedia, si no todo el tanque de lavado la cual se parece a una sopa de pollo.

Si se deja toda la noche o un día entero normalmente se separará y volverá a tener una capa intermedia como en el caso anterior. Puede tardar más en separarse, hasta una semana, especialmente si hace frío. Mientras se espera el tanque está ocupado y no se puede lavar el siguiente lote.

Las emulsiones pueden separarse de muchas maneras distintas. Calentar hasta $50\text{-}60\text{ }^\circ\text{C}$ ($122\text{-}140\text{ }^\circ\text{F}$) suele ser suficiente. Al secar el aceite, pueden formarse burbujas de vapor que luego estallan violentamente. Otra forma es añadir agua caliente a la mezcla, si hay suficiente espacio en el depósito, cuanto más caliente mejor. Por lo menos debería empezar la separación: dejar que repose, drenar toda el agua que se separe, poner más agua caliente hasta que el biodiesel quede limpio. También se puede probar con sal común, es decir, cloruro de sodio. Diluye la sal en agua, añadirla mientras se agita con suavidad, y sigue añadiendo mientras empieza a separarse. De esta manera se separa la emulsión, con el problema de que la sal es una impureza y quitar toda la sal del combustible es difícil. El agua salada no es tan inocua como el agua normal del lavado, así que tener cuidado cuando se deshaga de ella.

4. Calidad del combustible. El criterio principal para evaluar la calidad del biodiesel es su adherencia a los estándares apropiados. Estos estándares se presentan en el apéndice A. Generalmente la calidad del biodiesel puede ser influenciada por varios factores incluyendo la calidad de materia prima, la composición de ácidos grasos en el aceite vegetal o grasa animal, el proceso de producción, otros materiales usados en su proceso y los parámetros de postproducción.

Cuando las especificaciones se cumplen, el biodiesel puede utilizarse en la mayoría de motores modernos sin ninguna modificación y manteniendo la durabilidad y confiabilidad del motor. Aun cuando se usa en mezclas bajas con petrodiesel, el biodiesel debe cumplir los estándares antes de ser mezclado. Aunque algunas propiedades de los estándares como el número de cetano reflejan las propiedades de los compuestos químicos que componen el biodiesel, otras propiedades proveen indicadores de la calidad de su proceso de producción. Generalmente los parámetros dados en ASTM D6751 se definen por otros estándares ASTM, y los EN14214 por otros estándares internacionales europeos (ISO). Sin embargo otros métodos de análisis como aquellos desarrollados por organizaciones químicas profesionales como la American Oil Chemyst Society (AOCS) también pueden ser adecuados (o incluso más apropiadas ya que estos fueron desarrollados para aceites y no para derivados de petróleo a los que se refieren los ASTM).

La calidad del producto acabado puede comprobarse visualmente y midiendo su pH. El pH puede medirse con papel tornasol o con un medidor electrónico. Debe ser neutro (pH 7). Debe tener el aspecto del aceite vegetal, pero con un matiz marrón, parecido a la sidra.

Es malo que haya una película sobre la superficie, partículas o turbiedad. La película superficial puede ser de restos de jabón, y se quita lavándolo de nuevo o pasándolo por un filtro de cinco micrones (o más fino). La turbiedad puede ser agua y se quita calentando. Las partículas pueden ser cualquier cosa y aparecen cuando los filtros fallan.

5. Factores de post-producción

a. Agua y sedimentos. Estos dos factores son de gran importancia de gran para el almacenaje del biodiesel. El agua puede presentarse en dos formas, como agua disuelta o como agua suspendida. Aunque el biodiesel es generalmente insoluble en agua, realmente puede absorber más agua que el petrodiesel. El biodiesel puede contener hasta 1,500 ppm de agua disuelta en contraste con el diesel que solamente puede contener aproximadamente 50 ppm de agua disuelta. Los estándares para el petrodiesel (ASTMD975) y biodiesel (ASTMD6751), ambos limitan la cantidad de agua a 500 ppm. Para el petrodiesel este estándar permite una cantidad de agua suspendida, sin embargo el biodiesel debe mantenerse seco. Este es un desafío debido a que muchos tanques de almacenamiento de diesel mantienen agua en su fondo debido a la condensación. El agua suspendida es un problema en los equipos de inyección de combustible ya que contribuye a la corrosión de las partes instaladas en el sistema de inyección de combustible. El agua también puede contribuir al crecimiento de microbios en

el combustible, este problema puede ocurrir en el biodiesel como en el petrodiesel y puede producir una acidificación del combustible y lodos que pueden tapar los filtros de combustible.

Los sedimentos consisten en partículas de suciedad y oxidaciones suspendidas o pueden originarse del combustible como compuestos insolubles formados durante la oxidación del mismo. Algunos usuarios del biodiesel han notado que el intercambio de petrodiesel a biodiesel causa un incremento de sedimentos originándose en las paredes de los tanques de combustible que han almacenado petrodiesel previamente. Debido a que sus propiedades de solvente son diferentes a las del petrodiesel el biodiesel puede perder sedimentos y causar bloqueo de los filtros de combustible durante el período de transición.

b. Estabilidad de almacenamiento. La estabilidad de almacenamiento se refiere a la habilidad del combustible para resistir cambios químicos durante un período largo de almacenamiento. El problema principal del biodiesel en este sentido es su contacto con el aire (estabilidad oxidativa) y el agua (estabilidad hidrolítica). La oxidación es usualmente acompañada por un incremento en la acidez y viscosidad del combustible. Esto, se acompaña por un cambio en el color del biodiesel, éste es de un amarillo a un café, y el desarrollo de un olor a pintura en el biodiesel. En la presencia de agua, los ésteres pueden hidrolizarse para formar largas cadenas de ácidos grasos libres, lo que produce un aumento en la acidez del biodiesel. Los métodos aplicados generalmente al petrodiesel para analizar este problema son el ASTM D2274 y se ha demostrado que son incompatibles con el biodiesel por lo cual este tema está abierto a investigación.

Aditivos antioxidantes como el hidroxitolueno y el T-butilhidroquinona se ha encontrado que mejoran la estabilidad de almacenaje del biodiesel. El biodiesel producido de aceite de soya contiene naturalmente algunos antioxidantes como la vitamina E los cuales proveen protección contra la oxidación. Cualquier combustible que se vaya a almacenar por un período extendido de tiempo ya sea petrodiesel o biodiesel debe ser tratado con un aditivo antioxidante.

6. Propiedades del combustible. Los componentes básicos de los combustibles son los 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 biodiesel con unas cualidades u otras. En el apéndice A se presentan diferentes composiciones de ácidos grasos con diferentes orígenes.

Si se hace una comparación entre las propiedades de un diesel y un biodiesel, se observan algunas muy parecidas, pero otras difieren bastante, estas últimas son las causantes de la mayor parte de los problemas asociados al motor por el uso de biocombustibles.

A partir de la comparación de las propiedades del diesel con las del biodiesel se puede concluir lo siguiente:

- La densidad y la viscosidad cinemática aumentan notablemente con respecto al gasoil.
- El punto de fusión es más favorable para el gasoil frente al biodiesel. Esto es sobre todo importante en las regiones frías.
- El índice de cetano, que se relaciona al funcionamiento de los motores, es superior en el metil éster respecto al gasoil. Esta diferencia se hace más notable en aquellos metilesteres con mayor cantidad de ácidos grasos saturados y se constituyen en buenos aditivos para mejorar el índice de cetano.
- La destilación en general no se toma en cuenta en las normas de especificación porque el metilester tiene un rango muy estrecho.
- El punto de inflamación es muy superior al del gasoil, por lo que le garantiza un manejo mucho más seguro en su manipulación y almacenaje.
- El azufre no está presente.
- El poder calorífico no se modifica notablemente, aunque es menor en el biodiesel.

Los usuarios de biodiesel, tanto sea los constructores de motores como de las demás partes intervinientes, necesitan del desarrollo de normas confiables que den seguridad para facilitar su comercialización.

Los países donde residen estos usuarios, exigen otros beneficios además de los económicos como medio ambientales y de salud. Naciones desarrolladas como Austria (ORORM C 1190), Alemania (DIN V51606) y EE.UU. (ASTM PS121) han establecido normas similares para el biodiesel con especificaciones particulares como por ejemplo, la cuantificación de glicerol, que no están dadas en las normas para DF.

La normativa europea tiene la particularidad de incluir el número de Yodo (Iodine Value) ya que generalmente, en dicho continente se utiliza aceite de colza en la fabricación de biodiesel. El valor máximo aceptable es $IV = 115$ que excluiría al aceite de soja y sus ésteres, puesto que estos exceden dicho límite. Los usuarios de Biodiesel, tanto sea los constructores de motores como de las demás partes intervinientes, necesitan del desarrollo de normas confiables que den seguridad para facilitar su comercialización.

Se encuentran distintos tipos de biodiesel. Por un lado existen los derivados de aceites vegetales con un alto contenido de compuestos saturados, (bajos IVs) estos poseen un CN (Centane number) mayor, mientras que sus propiedades a bajas temperaturas son peores. Por otro lado se conocen biodiesel procedentes de aceites vegetales con un alto contenido de compuestos insaturados, (alto IVs) que poseen un menor CN, mientras que sus propiedades a bajas temperaturas son mejores. Consiguientemente, los CN y los IVs son inversamente proporcionales. Al agregar a las normas un máximo de IVs, se estaría restringiendo el mínimo CN. Considerando que la mayoría de los ésteres tienen un CN mayor que los aceites vegetales y los combustibles diesel convencionales, los mismos superan sin ningún tipo de inconvenientes el mínimo impuesto por ASTM (CN mín. = 40).

Un argumento contrario a la inclusión del IV en las normas de biodiesel, es que distintas composiciones de ácidos grasos dan un mismo IV. Por ejemplo, metil oleato puro tiene un mismo IV que la mezcla 1 a 1 de metil esteareato y metil linoleato. El IV desconoce factores estructurales en los compuestos grasos donde el CN depende de la posición del doble enlace, longitud de la cadena, etc. Aumentar el CN de los aceites de algunas plantas mediante el desarrollo de nuevos aditivos que son más efectivos a pesar de su alto grado de insaturación, es una alternativa posible.

7. Estándares del biodiesel. La American Society for Testing and Materials (ASTM) ha especificado para asegurar el correcto funcionamiento de los combustibles, distintas pruebas como las que se detallan a continuación:

a. Flash point. El punto de inflamabilidad de una sustancia generalmente de un combustible es la temperatura más baja en la que puede formarse una mezcla inflamable en contacto con el aire. Para medir el punto de inflamabilidad se usa el aparato de Pensky-Martens. Inflamable es la sustancia no metálica que sufre cambios al estar en contacto con el fuego, o al ponerse en combustión.

Es la temperatura mínima necesaria para que un combustible desprenda vapores que, al mezclarse con el oxígeno del aire u otro oxidante capaz de arder, originan una inflamación violenta de la mezcla. Esta inflamación no suele mantenerse, por lo que se origina un llama instantánea produciéndose el fenómeno que se conoce como centelleo

Resulta importantísimo por los requerimientos legales en lo que respecta a la seguridad en el manejo y almacenamiento del mismo.

b. Punto de enturbiamiento (Cloud Point). Se define así el comportamiento del combustible en condiciones climáticas a baja temperatura reconociéndose los grados a partir de los cuales comienzan a formarse dentro del combustible, pequeños cristales.

c. Viscosidad. Para algunos motores la especificación de un mínimo de viscosidad que puede generarse debido a la pérdida de potencia por parte de la bomba inyectora y pérdidas de combustible en el inyector, puede llegar a ser un gran beneficio.

Por cuestiones de diseño y tamaño de los motores, y las características propias del sistema de inyección resulta necesario un límite admisible máximo que el del gas oil, por lo que las mezclas de este último con biodiesel, reducen la viscosidad del mismo.

d. Sulfuros. Afectan principalmente a la performance de los sistemas de control de emisiones. Los efectos de la presencia de sulfuros pueden variar considerablemente dependiendo en gran medida de las condiciones de operación.

e. Cenizas sulfatadas. La formación de cenizas puede presentarse en tres formas diferentes:

- Sólidos abrasivos
- Jabones metálicos solubles
- Catalizador remanente

Es importante rescatar que los sólidos abrasivos y el catalizador remanente pueden provocar un desgaste prematuro del inyector, la bomba inyectora, pistones y aros y la formación de depósitos en el motor

f. Corrosión al cobre. Es importante ya que indica la presencia de ácidos o contenido de sulfuros que puedan provocar corrosión en el motor.

g. Residuo carbonoso. Es un indicador de la tendencia del combustible a formar depósitos de carbono.

h. Número ácido. Determina el nivel de ácidos grasos libres que se encuentran en el combustible. Los depósitos y la corrosión son evitables con la eliminación de los mismos.

i. Número de cetanos. Para evaluar la calidad de ignición del combustible y la presencia de humos negros y rudeza de marcha, es imprescindible observar el número de cetanos.

Que se requiera mayor o menor número de cetanos depende por un lado del diseño, tamaño, variación de carga y velocidad y por otro lado de las condiciones atmosféricas.

j. Glicerina libre. Un alto contenido de la misma dentro del combustible bloquea los inyectores y obstruye los conductos del mismo combustible.

k. Glicerina total. Es una señal del total de glicerina en el combustible, tanto libre como no libre. Si su nivel es bajo, asegura que ha habido una alta conversión de aceites o grasas en esteres monoalquílicos. Si su nivel de mono (VWER)-, di- y triglicéridos es alto, puede bloquear los inyectores y afectar la performance en climas fríos.

l. Índice de yodo. Indica la tendencia a la oxidación de un biodiesel porque da idea del grado de instauraciones que poseen sus éteres.

m. Destilación. Indica la temperatura máxima a la que se debe evaporar el combustible a unas condiciones de presión y temperatura dadas. El biodiesel a la temperatura de 360°C tiene que estar al 90% destilado, según la norma ASTM D1160. El diesel a la temperatura de 360°C tiene que estar al 95% destilado, según la norma ASTM D86.

8. Emisiones. Biodiesel 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 fueron 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 medio ambiental que la tecnología actual permite. Los resultados se describen en la siguiente tabla:

Tabla 1: Emisiones de biodiesel y diesel.

Emisiones de biodiesel respecto a 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		
**Media de todos los compuestos medidos		

El potencial de destrucción de la capa de Ozono es notablemente menor con respecto al diesel de petróleo, sobre todo si se utiliza B100. Las emisiones de Sulfatos y óxidos de azufre (componentes esenciales de la lluvia ácida) son eliminados utilizando B100. Los contaminantes críticos son notoriamente inferiores con biodiesel:

- Monóxido de carbono: Son 50% menores que el diesel convencional.
- Partículas en suspensión: Estas partículas que constituyen un gran riesgo para la salud, con biodiésel se reducen en un 30%.
- Hidrocarburos totales sin quemar: Las emisiones de hidrocarburos (un factor contribuyente en la formación localizada de smog y destrucción de la capa de ozono) es 93 por ciento más baja para el biodiesel que el combustible diésel común.
- Los Óxidos de nitrógeno: Las emisiones de NOx del biodiesel aumentan o disminuyen dependiendo de la tipo de motor y los procedimientos utilizados en los ensayos. Las emisiones de NOx (un factor contribuyente en la formación localizada de smog y destrucción de la capa de ozono) aumentan en un 13 por ciento. Sin embargo, la ausencia de azufre en el biodiesel

permite el uso de técnicas para el manejo de NOx que no pueden ser utilizadas en el diesel común. Así, las emisiones de NOx pueden ser dominadas y eliminadas para no generar una preocupación en la utilización del combustible.

El biodiesel reduce los riesgos de la salud con respecto al diésel de petróleo: Sus emisiones biodiesel mostraron niveles inferiores de PAH y nPAH, compuestos identificados como riesgosos para el cáncer. En el ensayo, los compuestos de PAH disminuyeron entre 75 y 85 por ciento, con la excepción del benzo (a) antraceno, que disminuyó en aproximadamente el 50 por ciento. Respecto a los compuestos de nPAH también fueron menores con el biodiésel: 2-nitrofluoreno y 1-nitropireno se redujeron en un 90 por ciento, y el resto de los compuestos del nPAH se redujeron sólo en pequeños valores.

9. Actualidad mundial de la industria del biodiesel. Los riesgos del calentamiento global y el potencial desabastecimiento de petróleo fueron algunos de los desencadenantes del desarrollo de la industria de biocombustibles. Hoy, los niveles de producción y consumo récord, los aleja de ser una utopía para convertirlos en una industria que no sólo protege el ambiente, sino que es una alternativa rentable para los productores y consumidores americanos.

Sucede que los biocombustibles poseen además la capacidad de crear nuevos empleos (la industria del etanol tomó 147.000 puestos de trabajo en el 2004, en forma directa e indirecta) y generar un mayor valor agregado en la producción agropecuaria y un aumento en la demanda de su materia prima (maíz y soja).

En Estados Unidos, la producción de etanol se disparó a partir de la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act), de las legislaciones de cada Estado que restringen o prohíben el uso del MTBE (Metil Tri Butil Eter, compuesto que se agrega a las naftas para elevar su octanaje y reducir las emisiones de humo), y por las ventajas impositivas. Y hay 20 Estados que promueven el etanol.

Hoy, el 30% de toda la nafta que se vende en los Estados Unidos está mezclada con etanol. Con una producción récord de casi 13 mil millones de litros, el 12% de la cosecha récord americana de maíz fue absorbida por la industria del etanol (unas 30 millones de toneladas). Estados Unidos cuenta con 81 plantas y hay otras 16 en construcción, que en conjunto podrán producir 16 mil millones de litros de etanol, un 20% más que los 13,5 mil millones de litros que se consumieron en el 2004. Cuando eso ocurra, la demanda de maíz para producir etanol aumentará a 40 millones de toneladas.

La experiencia demostró que el uso de etanol promueve el desarrollo local de un combustible renovable que disminuye el uso del petróleo; permite un sistema de producción sustentable — promueve la rotación con maíz—; es bueno para el medio ambiente—reduce la contaminación sin necesitar cambios costosos en los sistemas de transporte—; y es bueno para la economía, ya que genera nuevas oportunidades comerciales para los productores de maíz y sus comunidades.

En Estados Unidos permitió abaratar los precios de las naftas al reducir las necesidades de importación (la utilización de etanol redujo los precios de la gasolina en USA en 0,30 U\$/galón); sumó más de 25 mil millones al PBI americano, y permitió un ahorro en la ayuda federal de 3,2 mil millones de dólares (ver recuadro).

La Asociación Americana de Combustibles Renovables (Renewal Fuel Association) logró el año pasado que se promulgue la Ley que crea créditos impositivos para el etanol, y extiende los beneficios impositivos para los biocombustibles hasta el 2010, lo que sin duda fortalecerá su demanda en los próximos años.

La producción de etanol aumentó los precios internos del maíz (USA), reduciendo la ayuda federal en 3.200 millones de dólares en el 2004. Sumó más de 25 mil millones de dólares en el PBI americano a través de gastos operativos y capital invertido para la construcción de nuevas plantas. Generó 4.400 millones de dólares que fueron directamente a los consumidores gracias a una mayor actividad económica y mayor generación de empleo. La industria del etanol emplea a 147.000 trabajadores.

Los gobiernos federales y provinciales recaudaron casi U\$S 2,5 mil millones por impuestos adicionales. El déficit comercial americano se redujo en U\$S 5, 1 mil millones, mientras que las importaciones de petróleo se redujeron en 143,3 millones de barriles.

En el plano ambiental, el uso de etanol redujo en 7 millones de toneladas las emisiones de CO₂ en el 2004. La industria del biodiesel, por su parte, convierte 1 tonelada de aceite vegetal en 1 tonelada de biodiesel. La producción mundial de este biocombustible se expande rápido, superando en la actualidad los 1,5 millones de toneladas por año (fuera de Estados Unidos). Los altos precios actuales del petróleo son una ventaja atractiva, aunque los altos precios del aceite de soja los compensan en parte.

La realidad es que la producción en Europa aumentó un 35%; Brasil que tiene una amplia utilización de etanol en base a azúcar, se está volcando también a la producción de biodiesel. En Estados Unidos existen más de 20 empresas dedicadas a la producción de biodiesel, con una capacidad instalada de producción de 600 millones de litros por año, aunque no toda se destina a biocombustibles. La industria se encuentra en expansión, y existen proyectos para ampliar la capacidad de producción en 757 millones de litros adicionales en el mediano plazo.

En cuanto a la Argentina, tiene media sanción del Senado un proyecto de ley que establece el corte obligatorio del gasoil con un 5% de biodiesel y de las naftas con un 5% de etanol. El corte se hará efectivo a partir del cuarto año de vigencia de la ley. No los alcanzará el impuesto a los Combustibles Líquidos y el Gas (ex I.T.C.) y las tasas hídricas o sobre gasoil. También establece la estabilidad fiscal por quince años.

10. Actualidad nacional de la industria del biodiesel. Existen hoy cuatro empresas que producen biodiesel en Guatemala aunque en pequeña escala, y una empresa que produce aceite de palma tratado para uso en motores. Las empresas son la Guatebiodiesel, ubicada en Ciudad de Guatemala con capacidad para producir de 1.500 a 2.000 galones/día de biodiesel (5.680 a 7.570 litros/día); la Octagon, ubicada en Ciudad de Guatemala con capacidad para 1.000 galones/día (3.780 litros/día) que está ampliando su capacidad para 1.500 galones/día en junio y 3.000 galones/día de biodiesel en diciembre (11.300 litros/día); la Fuerza Verde, también ubicada en Ciudad de Guatemala con capacidad para producir 50 galones/día (190 litros/día) de biodiesel; la Comunidad Nueva Alianza, ubicada en El Palmar, Quetzaltenango con capacidad para 50 galones/día (190 litros/día) de biodiesel y la Helios, ubicada en Zacapa (Oriente) y con capacidad para producir 290 galones/día (1.090 litros/día) de aceite de palma tratado para uso en motores (no hace la transesterificación). La Guatebiodiesel (Combustibles Ecológicos SA) emplea aceites usados (soya, maíz, girasol) cuando están disponibles y busca obtener semillas de tempate (*Jatropha curcas*) para poder crecer su producción que hoy es de alrededor de 2.000 galones por mes. El biodiesel producido está siendo usado para pruebas en vehículos propios y eventualmente se hace alguna comercialización en negociación directa con el cliente.

La Empresa Octagon (o Biocombustibles de Guatemala) recibió un financiamiento de EUR 90.000 de la Alianza en Energía y Ambiente (AEA) de Finlandia para desarrollar la producción de biodiesel a partir de tempate (Asturias, 2006). El proyecto empezó en 2002 y fue definido con tres vertientes: agrícola, industrial y de investigación. En 2004-2005 fueron sembradas 10 manzanas en 10 regiones del país para estudio de influencias de clima y suelos para definir el manejo del cultivo. Hoy existen 100 hectáreas de tempate para producción de semillas y uso comercial. Desde el punto de vista de investigación, el proyecto montó un banco de germoplasma y estudia como emplear los subproductos del proceso. El proceso de producción de biodiesel se hace en una etapa de reacción, existe recuperación del metanol en exceso usado en el proceso, la fase de glicerina no recibe ningún tratamiento y se estudian alternativas para usarla en quemadores industriales. El biodiesel ya producido fue empleado en vehículos propios (B100), en una flota de camiones (mezcla B10), y probado en calderas que trabajan en ambientes cerrados, hornos de panaderías y generadores eléctricos estacionarios. La materia prima principal hasta ahora es el aceite usado pues no existe producción suficiente de *Jatropha*. Según el representante de la empresa, alrededor del 80% del biodiesel producido fue originado de aceites usados y alrededor del 20% de piñón. El área de producción de tempate es la región del Petén donde se hace el tratamiento de secado de los frutos y separación de las semillas. La etapa industrial hace la extracción del aceite de las semillas y usa calor de un pozo térmico y energía solar para precalentar el aceite que va al reactor. En el futuro, las cascarillas de las semillas también serán empleadas para producir energía.

Un problema relatado por el representante de la empresa Octagon se relaciona a la propuesta de Reglamento Técnico Centro Americano para el biodiesel (RTCA 75.02.43:06). Según el

representante las especificaciones son muy rígidas y no toman en cuenta las condiciones locales, ya que el biodiesel producido de *Jatropha* obtuvo valores de cetanaje muy bajos frente a los valores de las normas ASTM y EU usadas como bases para la norma Centroamericana. Según la empresa, el valor mínimo de cetanaje propuesto en la norma es 47 y los valores reportados para muestras de biodiesel de *Jatropha* probado en la DGH resultaron entre 42 y 43 unidades. Desde el punto de vista técnico, los resultados obtenidos pueden ser debatidos. Es importante resaltar que la DGH realizó pruebas con equipo infrarrojo (Petrospec) que trabaja con correlaciones probadas y validadas para el diesel de petróleo, pero no probadas aún para el biodiesel. De este modo, sería muy importante realizar medidas de cetanaje en ensayo específico en motor de acuerdo a la Norma ASTM D613 para obtener el cetanaje real del biodiesel de *Jatropha* y otras materias primas, obteniendo nuevas correlaciones para el análisis de biodiesel con el Petrospec.

La Empresa Fuerza Verde ya produjo biodiesel a partir de grasas animales, de aceites de cocina usados y de palma, siempre de forma experimental. No tiene clientes fijos y emplea el biodiesel producido para pruebas en un vehículo propio, en mezclas B20, B50 y puro (B100).

La Empresa Comunidad Nueva Alianza es una cooperativa de productores de macadamia que produce biodiesel para uso propio en motores estacionarios. Como materias primas emplea las semillas de macadamia rechazadas para comercialización y aceite usado, pero está empezando a desarrollar siembras de higüerillo y tempate.

La Empresa Helios produce alrededor de 2.000 a 3.000 galones por mes (de 7.570 a 11.350 litros por mes) de aceite de palma tratado para uso directo en motores (no es biodiesel) con fines de pruebas. La empresa no ve cómo producir biodiesel pues no existen aún materias primas con precios adecuados. Como estrategia, la empresa está en contacto con los productores de palma, y está desarrollando conversiones de vehículos para el empleo de aceite de palma tratado para eliminar metales y silicio que causan daños al motor. El representante de la empresa informó que ya fueron convertidos algunos motores estacionarios y que una flota de 50 minibuses ya está usando el aceite en motores convertidos desde el mes de septiembre. Él defiende que los pequeños productores deben verticalizarse para poder aumentar sus ingresos a partir de la comercialización del aceite de palma sin transesterificación para motores modificados.

Desde el punto de vista del proceso de producción, las cuatro empresas que producen biodiesel realizan la neutralización de la materia prima (cuando se emplean aceites usados o grasa animal). La reacción de transesterificación la hacen en una sola etapa la Fuerza Verde, la Comunidad Nueva Alianza y Octagon, mientras que la Guatebiodiesel hace la reacción en dos etapas. Para purificación del producto emplean lavado con agua y posteriormente secan el biodiesel. A excepción de la Octagon, las demás empresas aún no hacen la recuperación del metanol por motivos de escala de producción actual. El subproducto de la reacción, la fase de glicerina que contiene aún impurezas, agua y metanol, no es

tratada y no tiene mercado en Guatemala. Los productores afirman que están almacenando esta fase pero una solución definitiva para este problema debe aún ser desarrollada.

a. Aspectos institucionales: marcos legales y de regulación. El principal marco legal para el mercado de combustibles es el Decreto n.109-97, de 26 de noviembre de 1997 (Ley de Comercialización de Hidrocarburos). Esta Ley define los actores de la cadena de comercialización de hidrocarburos, establece las condiciones de otorgamiento de autorizaciones, las obligaciones de los agentes económicos, las infracciones y sanciones. La Ley establece la libertad de precios para todas las actividades, pero cada agente económico involucrado en el mercado debe informar mensualmente sus operaciones (volúmenes, origen, destino, calidad y precios). La Dirección General de Hidrocarburos compara la información del mercado de combustibles en Guatemala y del mercado internacional para verificar si existen distorsiones. Esta Ley fue reglamentada por el Acuerdo Gubernativo n.522-99 del 14 de julio de 1999.

Con respecto a las características y la calidad de los hidrocarburos, el Decreto n.109-97 prevé la publicación de Nóminas anuales. El Acuerdo n.170-2005 de 30 de noviembre de 2005 presenta la Nómina de Productos Petroleros con sus Respectivas Denominaciones, Características y Especificaciones de Calidad. Esta Nómina ya prevé la utilización del gasohol 90/10, es decir, la mezcla de 90% de gasolina con 10% de etanol anhidro.

Los países de América Central están elaborando acuerdos para adoptar especificaciones técnicas homogéneas para hidrocarburos, que ya ha producido resultados para algunos combustibles. El sentido es poder dotar a toda la región con las mismas especificaciones mejorando las condiciones comerciales para el intercambio de productos. Para el biodiesel ya existe un Reglamento Técnico Centro Americano (RTCA 75.02.43:06) aprobado por el Subgrupo de Medidas y Normalización y el Subgrupo de Hidrocarburos de la Región Centroamericana.

Para ser oficializado, debe ser ratificado por una resolución del Consejo de Ministros de Integración Económica. El uso de combustibles renovables actualmente cuenta con el apoyo de dos leyes de Guatemala: la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente y la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable. El Decreto Ley 68-86 y sus modificaciones (Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente) emanan del artículo 97 de la Constitución de la República y se proponen velar por el mantenimiento y equilibrio ecológico y la calidad del ambiente para los habitantes. Las operaciones de exploración y explotación de petróleo (que existen en Guatemala) requieren Estudios de Impacto Ambiental (EIA). El Decreto menciona el uso de energías renovables como una forma de reducir impactos en el medio ambiente.

El Decreto n.52-2003 (Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable) tiene como objetivo específico aumentar la participación de energías renovables en la matriz energética de Guatemala. Inicialmente propuesto para proyectos de producción de energía eléctrica, fue extendido para otros usos de energías renovables. Los incentivos que la Ley menciona

son: a) exención de derechos arancelarios (incluyendo el IVA) para importaciones de máquinas y equipos necesarios para el proyecto; b) exención del pago del Impuesto Sobre la Renta (debido al proyecto) por período de 10 años; c) exención del Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias (IEMA) por período de 10 años. La Ley y su reglamento (Acuerdo Gubernativo n.AG211-2005) determinan las condiciones en que se aplican los incentivos.

b. Escenarios para producción de biodiesel. El Grupo Nacional de Biocombustibles está formado por técnicos del Ministerio de Energía y Minas con la finalidad de acompañar, apoyar e incentivar las iniciativas de uso de combustibles renovables. Para usos en vehículos se incentiva el uso del alcohol de caña en mezcla con la gasolina y el biodiesel.

En Guatemala existe una Asociación de Generadores con Energía Renovable (AGER) que reúne generadores privados de energía con el objetivo de promover el uso de fuentes renovables para generación eléctrica.

La Asociación de Combustibles Renovables (ACR) está formada básicamente por productores de caña de azúcar y está consciente que el biodiesel debe entrar en la matriz energética de Guatemala a mediano o a largo plazo. A corto plazo, la ACR ve problemas con los precios del aceite de palma y dificultad para la obtención de otras materias primas en cantidades necesarias para despegar el uso de biodiesel. La Asociación defiende que se empleen especies de oleaginosas que no sean propias para alimentación y que se empleen tierras menos valorizadas y sin producción. A pesar que hubo un acercamiento de los productores de biodiesel con la ACR, ningún productor de biodiesel está asociado a la ACR hasta ahora.

La visión de la DGH sobre la introducción del biodiesel en Guatemala es de cautela. Varias cuestiones relevantes fueron presentadas para discusión: i) cómo superar la cuestión económica asociada a los costos del biodiesel, ii) cómo colabora el biodiesel con la cuestión ambiental (impacto de la cantidad), iii) biodiesel como nuevo combustible (B20 o más) o como aditivo al diesel (hasta el 5%), iv) el uso por flotas cautivas o distribución en gasolineras, v) necesidad de reglamentación para distribución en escala comercial, y vi) necesidad de laboratorios para hacer el análisis de calidad del biodiesel.

Los representantes del MAGA son unánimes en afirmar que sería interesante emplear otras materias primas, como el higüerillo (ya usado como sombra para el café), el tempate y otras semillas nativas que hasta ahora no tienen empleo en escala como el “aceituno”, la “piñuela”, el “jaboncillo” y el “paraíso”. El MAGA cree que el biodiesel puede ser importante para fijar poblaciones en el campo y auxiliar en la reducción de la pobreza con el cultivo de especies no tradicionales en tierras subutilizadas u ociosas. Los productores de biodiesel consultados pusieron en claro que no existe ningún problema de disponibilidad de tierras para producir materias primas para biodiesel cuando se pueden emplear tierras marginales para el cultivo de especies alternativas. Ningún productor actual ve posibilidad de

emplear palma africana en este momento frente al precio de la materia prima. Todos son unánimes en decir que el problema fundamental no es industrial (tecnología de producción de biodiesel ya es conocida) sino agrícola, obtener materias primas con precios y calidad adecuadas. Con respecto a la calidad del producto, todos concuerdan que aún no existen laboratorios en Guatemala capaces de certificar la calidad del biodiesel. Hubo críticas al Reglamento Técnico propuesto que no ha sido “tropicalizado”.

III. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad las fuentes de energía no renovables se están agotando, por esta razón la búsqueda de nuevas fuentes de energía renovables se hace más apremiante. Una muy buena alternativa en la utilización de combustibles renovables es el biodiesel, debido a que este combustible tiene un rendimiento similar al combustible diesel, no requiere nueva infraestructura, no altera el torque ni la potencia de los motores diesel. Reduce las emisiones de gases invernaderos, es biodegradable y puede obtenerse de una gran variedad de cultivos, generando una fuente de trabajo para el sector agrícola.

La producción del mismo es rentable debido a que requiere de bajas temperaturas y presiones de proceso, hay una alta conversión con reacciones laterales mínimas, conversión directa a éster metílico sin pasos intermedios, también como producto de la reacción se produce una cantidad significativa de glicerina, la cual es necesario refinarla para poder así venderla a la industria de cosméticos, comida para perros, laboratorios, etc.

Actualmente uno de los problemas asociados con el biodiesel es que su costo de producción es alto, por lo que la investigación para hacerlo un combustible más barato mediante la utilización de materias primas más económicas como los aceites de desecho (aceites de freimientos usados) o el uso de aceites como el aceite de palma africana, el cual es un producto ya industrializado en Guatemala puede ser beneficioso para los consumidores guatemaltecos y puede despertar mayor interés en la investigación y producción de este combustible a nivel nacional.

La investigación, el desarrollo y la instalación de una planta piloto para la producción de biodiesel a partir de aceites de girasol dentro del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala será de gran beneficio para los futuros estudiantes de la Universidad debido a que este trabajo puede ser utilizado como una práctica de laboratorio dentro de su programa de estudios. Para los catedráticos y futuros investigadores que deseen continuar estudiando temas relacionados con la producción de combustibles renovables y para el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad debido al equipo y los procedimientos de trabajo que se implementarán al laboratorio.

IV. OBJETIVOS

A. GENERAL

1. Instalar una planta piloto para la producción de biodiesel utilizando aceite de girasol a través de la transesterificación catalizada por una base dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

B. ESPECIFICOS

1. Instalar una planta piloto de producción para el proceso del biodiesel.
2. Establecer las condiciones de manejo y operación de la línea de producción.
3. Evaluar la calidad del producto obtenido en la planta piloto instalada.

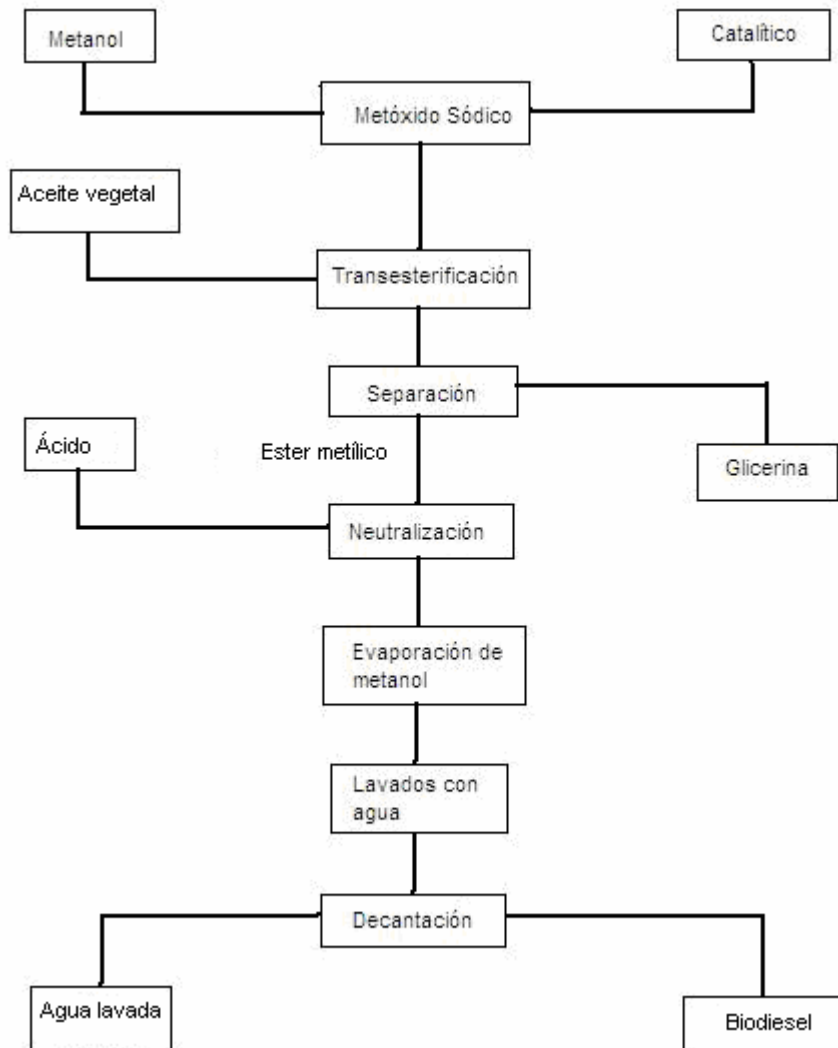
V. PROBLEMA A RESOLVER

No se ha desarrollado una línea de producción de combustible líquido renovable a partir de aceite de girasol dentro de la Universidad del Valle de Guatemala que tenga las cualidades para competir y sustituir al diesel derivado del petróleo.

VI. METODOLOGÍA

En la siguiente figura se presenta el diagrama de bloques que representa la metodología experimental para la obtención de biodiesel.

Figura 4: Diagrama de bloques del proceso



A continuación se presenta una descripción detallada de los pasos a seguir para la producción de biodiesel a partir de aceite de girasol, que fue el aceite utilizado en las pruebas realizadas en la planta piloto instalada en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Sin embargo, este procedimiento es aplicable a cualquier aceite vegetal que se desee utilizar como materia prima.

A. Filtrado y eliminación de agua

Si se utilizan aceites usados como materia prima, es necesario filtrar el aceite para quitarle los restos de comida. Se debe calentar el aceite hasta 35 °C (95 °F), aproximadamente, para que esté más fluido y pase bien por el filtro, luego se hace pasar el aceite por el filtro, que puede ser una gasa o papel para filtrar café por ejemplo.

El aceite que ha sido utilizado para cocinar suele contener agua, que afecta a la reacción y favorece la saponificación. Se calienta hasta 100 °C (212 °F) y se mantiene la temperatura mientras el agua se evapora. Se agita constantemente para evitar que se formen burbujas de vapor, que luego explotan salpicando aceite caliente. También se puede drenar el agua según se va hundiendo hasta el fondo, después se recupera el aceite que se haya ido con el agua. Cuando empiece a salir menos vapor se aumenta la temperatura hasta 130 °C (265 °F) y se mantiene durante diez minutos. Luego se deja de calentar y se espera a que se enfríe.

Debido a que para las pruebas en la planta piloto se utiliza aceite nuevo, no es necesario filtrarlo, por esta razón no se entrará en detalles en este paso.

B. Valoración

Para saber cuánto hidróxido de sodio es necesario, se debe medir la acidez del aceite que se está utilizando, con un método que se llama valoración. La valoración debe ser lo más exacta posible.

Se prepara una disolución de un gramo de NaOH en un litro de agua destilada asegurándose de que quede totalmente disuelta. Esta muestra sirve como valor de referencia en la valoración. Es importante que esta disolución no se contamine porque será utilizada en muchas valoraciones. El hidróxido de sodio se debe mantener seco, para protegerlo de la humedad se debe almacenar en un recipiente hermético y seco.

Se procede a mezclar en un recipiente pequeño 10 ml de alcohol isopropílico con 1 ml del aceite y se añade dos gotas de fenolftaleína, que es un indicador ácido-base incoloro en presencia de ácidos, y rojo en presencia de bases. La fenolftaleína se conserva bien durante un año nada más. Se degrada fácilmente con la luz y empieza a dar medidas erróneas después de un tiempo.

Utilizando una probeta, se inicia a titular la solución de aceite/isopropílico/fenolftaleína con la disolución de NaOH aplicando agitación constante. Si todo sale bien la disolución se volverá magenta (rosa) y mantendrá ese color durante diez segundos. El magenta indica un pH de entre 8 y 9. Es importante que se agregue la cantidad exacta para alcanzar ese pH, no se debe poner más gotas de las necesarias, el objetivo de la valoración es averiguar el número de ml de solución de NaOH necesarios para alcanzar un pH de entre 8 y 9. Se recomienda hacer la valoración más de una vez para comprobar que la medida sea correcta. Dependiendo del tipo de aceite la cantidad de disolución de NaOH necesaria en la valoración suele ser entre 1,5 y 3 ml, si se hacen las pruebas con aceite de cocina sin usar, se necesitará mucha menos lejía para alcanzar el pH 8-9. Para aceites nuevos, generalmente es 3.5 g de NaOH / L de aceite. El cálculo necesario para definir la cantidad de NaOH se presenta en el apéndice.

Es bueno hacer varias pruebas con distintas cantidades de NaOH para saber cuál es la cantidad más adecuada. Cuando hay demasiado NaOH a veces se forma una pasta inservible. Si no hay suficiente NaOH la reacción no se completa y queda aceite mezclado con el biodiesel y la glicerina. Cuando eso ocurre se forman tres capas: el biodiesel arriba, el aceite en medio y la glicerina en el fondo. Si hay mucha agua mezclada con el aceite se forman jabones que luego forman una capa sobre la de glicerina y es difícil separar los jabones del biodiesel y la glicerina.

C. Preparación del metóxido de sodio

Se mezcla el metanol con el hidróxido de sodio en el tanque de almacenamiento de la planta piloto y se agita con el mezclador mecánico que se muestra en la figura 5, esto produce una reacción exotérmica cuyo resultado es el metóxido de sodio. Es importante que los instrumentos que entren en contacto con el NaOH deben estar totalmente secos.

Siguiendo la estequiometría de la reacción, la cantidad de metanol necesaria para que se complete la reacción es del 12.5 % en volumen de la cantidad de aceite. Sin embargo para que se complete la reacción se recomienda usar un exceso mínimo del 100 %. Distintos aceites pueden tener distintas densidades dependiendo de su procedencia y de cómo hayan sido cocinados. No se debe usar el metóxido hasta que todo el NaOH este completamente disuelto, este procedimiento puede llevar varias horas por lo que se recomienda hacerlo con anticipación.

Es muy importante que se trate el metóxido de sodio con extremo cuidado, no se debe respirar sus vapores, si hubiera derrames sobre la piel provocará quemaduras, se debe lavar la zona con muchísima agua. Cuando se manipule metóxido de sodio tener siempre cerca agua corriente.

El metóxido de sodio también es muy corrosivo para las pinturas. El NaOH reacciona con el aluminio, el estaño y el zinc. Se debe utilizar recipientes de vidrio, de acero inoxidable, o esmaltados.

Figura 5: Tanque para preparación de metóxido de sodio



D. Calentar y mezclar

Antes de iniciar este paso se debe encender la caldera del laboratorio de operaciones unitarias para asegurarse de contar con el vapor en el momento que sea necesario (aproximadamente 30 min). Se llena el reactor que se muestra en la figura 6 con el aceite de girasol o cualquier otro aceite que desee utilizarse como materia prima, la capacidad máxima de este reactor es de 60L por lo que el lote de producción no debe ser mayor a su volumen máximo.

Figura 6: Reactor donde se produce la reacción de transesterificación



Se abren las llaves de vapor de la planta piloto, las cuales se muestran en la figura 7 regulando la presión de vapor en el manómetro a 15 psi, el aceite se debe calentar a 60 °C. Una vez alcanzada la temperatura, se enciende la bomba de la planta (ver figura 9) para traspasar el metóxido del tanque al reactor, se inicia la agitación utilizando el mezclador que se muestra en la figura 8 y se mantiene la agitación por 60 min, es importante controlar que la temperatura de la reacción se mantenga en el rango de 60 °C – 65 °C, para ello se utiliza el controlador de temperatura instalada en el sistema. En este paso se completa la reacción de transesterificación y es aquí donde se forman los ésteres metílicos (biodiesel) y la glicerina.

Figura 7: Llaves reguladoras de flujo de vapor

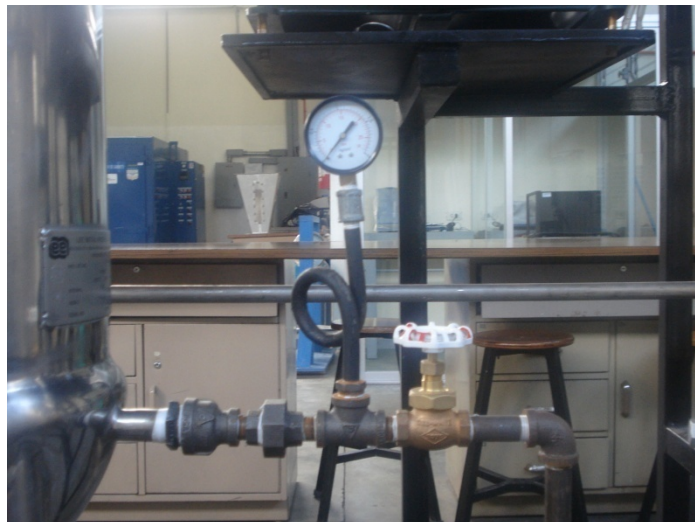
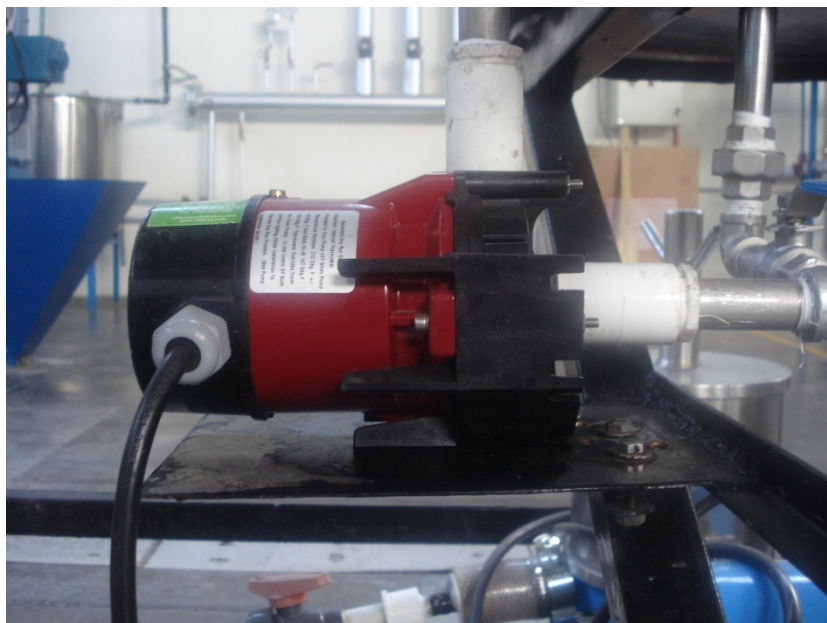


Figura 8: Agitador mecánico de reactor



Figura 9: Bomba del tanque de almacenamiento.



E. Reposo y separación

Se deja que la mezcla repose y se enfríe por lo menos durante ocho horas, preferiblemente más tiempo. Después de este tiempo por acción de la densidad de ambas fases, se separa la glicerina que tiene una apariencia color marrón oscuro y se deposita en el fondo del reactor, de los metilésteres (biodiesel), que es un líquido color ambar y flota encima de la glicerina.

Se separa el biodiesel de la glicerina por decantación utilizando la llave de decantación que se muestra en la figura 10, es importante hacer esta operación con cuidado para no tener pérdidas de biodiesel, se debe observar la salida de biodiesel todo el tiempo, cuando termine de decantarse la glicerina e inicie a salir el biodiesel color ambar se debe cerrar la llave y cambiar de recipiente para recibir los esteres metílicos. En la figura 11 se muestra cómo debe quedar el producto obtenido en esta etapa, el biodiesel obtenido se regresa al reactor para el siguiente paso y la glicerina se almacena en un recipiente seco.

Figura 10: Llave de decantación de glicerina.



Lo que queda después de la transesterificación no es sólo glicerina, sino una mezcla de glicerina pura, metanol y cera. Estas tres sustancias pueden separarse por destilación, el proceso de refinamiento de la glicerina obtenida no es descrito en esta metodología.

Figura 11: Separación de fases biodiesel glicerina



F. Neutralización

Luego de haber separado la glicerina del biodiesel, se procede a neutralizar el producto, en este paso se mezcla el producto con ácido, éste puede ser ácido fosfórico, acético, cítrico, sulfúrico o clorhídrico en una concentración del 10 %, la cantidad a utilizar es aproximadamente un 0.5 % de la cantidad de aceite usado. El ácido se agrega al producto de biodiesel para neutralizar todos los residuos de catalítico y cortar el jabón que se pudo haber formado durante la reacción. Los jabones reaccionan con el ácido para formar sales solubles en agua y ácidos grasos libres. La neutralización antes de los lavados reduce la cantidad de agua requerida y minimiza las posibles emulsiones que se pueden formar al agregar agua al biodiesel. Es importante que después que el ácido se agrega, se agite el producto de cinco a diez minutos y luego se deje reposar por 30 minutos.

G. Eliminación de metanol

El exceso de metanol actúa como un solvente y puede demorar la separación, sin embargo, este exceso de metanol no debe ser removido hasta después de que la glicerina y el metiléster han sido separados debido a la posibilidad de reversión de la reacción de transesterificación.

El exceso de metanol se remueve por ebullición, para ello se alimenta vapor a la chaqueta del reactor hasta elevar la temperatura a 75°C, el punto de ebullición del metanol es de 65°C, dependiendo de la cantidad de metanol que se utilizó en exceso y de la transferencia de calor al reactor, se calcula el tiempo que se debe aplicar calor para eliminar el metanol en exceso del biodiesel. Para las pruebas

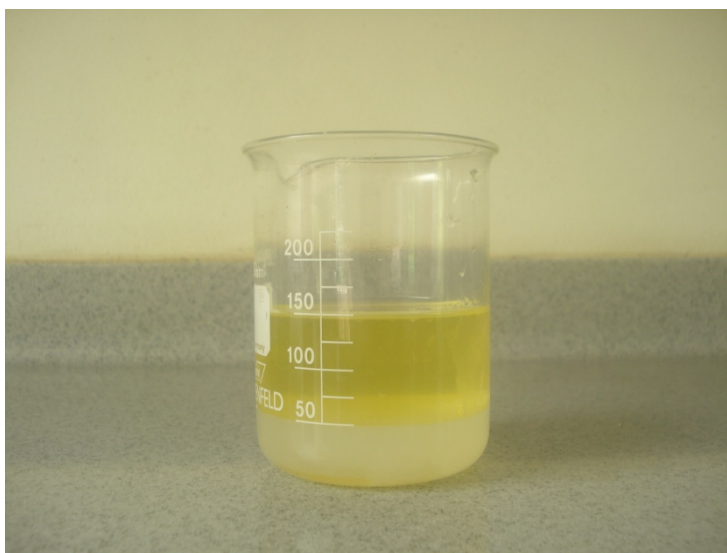
realizadas en la planta piloto se utilizó un 600% de metanol en exceso y el tiempo de evaporación fue de 30 min a la temperatura mencionada.

H. Lavado y secado

Este paso es fundamental en la producción de biodiesel por dos razones principales: la primera es que este paso es una prueba de calidad, si el biodiesel no se separa del agua de lavado, éste no sirve como combustible, el biodiesel bien hecho que ha completado la reacción, no forma emulsiones. La otra importancia del lavado es la eliminación de contaminantes como el metanol, jabones, NaOH y glicerina que se encuentran aun disueltos en el combustible y si estos no son removidos la calidad del biodiesel será inferior a la requerida por el estándar internacional y aún más riesgoso, de ser utilizado en vehículos puede causar serios daños al motor.

Antes de iniciar el lavado es importante asegurarse que la reacción se ha completado, porque de lo contrario se formará una emulsión que será difícil reprocessar, para ello se toma una muestra del producto en un beaker y se mezcla con agua, se deja reposar por 30min, y si no se observan emulsiones y se obtiene una separación de fases similar a la que se muestra en la figura 12, el biodiesel está listo para ser lavado, de lo contrario la reacción de transesterificación no se ha completado y se debe revisar si se hizo algún error en el proceso para corregirlo.

Figura 12: Separación biodiesel y agua en primer lavado.



Es importante que la temperatura del reactor en este paso se mantenga no menor a 38°C para facilitar los lavados y reducir la cantidad de agua. Se agrega aproximadamente $\frac{1}{4}$ de agua sobre la cantidad de biodiesel presente en el reactor y se agita por cinco minutos, este es suficiente tiempo para obtener una mezcla homogénea, se deja reposar por una hora y luego se separa el combustible del agua de lavado (líquido de color lechoso-amarillo en el primer lavado). Se repite este procedimiento otras dos veces o idealmente hasta que el agua de lavado salga cristalina.

El agua restante presente en el biodiesel se puede dejar secar en un recipiente abierto bien ventilado hasta que ésta se evapore o puede aplicarse un calentamiento a 48°C para que se seque con mayor facilidad.

Figura 13: Biodiesel final obtenido



I. Control de calidad

Se obtuvo las propiedades energéticas y fisicoquímicas del biodiesel producido con la colaboración del Laboratorio del Ministerio de Energía y Minas. Esta información se presenta en la sección de resultados y se analiza en la discusión de este informe.

VII. RESULTADOS

Tabla 2: Resultados obtenidos de las pruebas a nivel laboratorio para producción de biodiesel a partir de aceite de girasol nuevo.

Experimento	Aceite de girasol, ml	metanol, ml	Biodiesel producido, ml (teórico)	Biodiesel obtenido, ml (Exp)	% Rendimiento
1	100	20	104.33	96	92.01
2	250	50	260.82	184	70.55
3	500	100	521.64	410	78.59

Tabla 3: Resultados obtenidos del experimento 1 a nivel planta piloto para la producción de biodiesel a partir del aceite de girasol utilizando un 800% de exceso de etanol.

Experimento	Aceite de girasol, ml	Etanol, ml	Biodiesel producido, ml (teórico)	Biodiesel obtenido, ml (Exp)	% Rendimiento
1	12,000	13,125	12,519.36	500	3.99

Tabla 4: Resultados obtenidos del experimento 2 a nivel planta piloto para la producción de biodiesel a partir del aceite de girasol utilizando un 600% de exceso de metanol.

Experimento	Aceite de girasol, ml	metanol, ml	Biodiesel producido, ml (teórico)	Biodiesel obtenido, ml (Exp)	% Rendimiento
1	15,000	11,250	15,649.55	12,638	80.76

Tabla 5: Resultados del análisis de control de calidad realizado por el Ministerio de Energía y Minas para muestra de biodiesel de pruebas a nivel de laboratorio.

Descripción	Método de análisis	Especificación (a)	Resultados (b)
Punto de inflamabilidad, °C	ASTM D-93		176
Calor de combustión superior, MJ/kg	ASTM D-240		(c) 38.40
Viscosidad cinemática, 40°C, mm ² /s (c)	ASTM D-445		5.30

Observaciones:

- a) En el acuerdo Ministerial No.192-2006, no existen especificaciones para este producto.
- b) Los resultados son válidos sólo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio.
- c) 38.40 MJ/Kg es equivalente a 9171 Kcal/Kg y a 16507 Btu/lb.

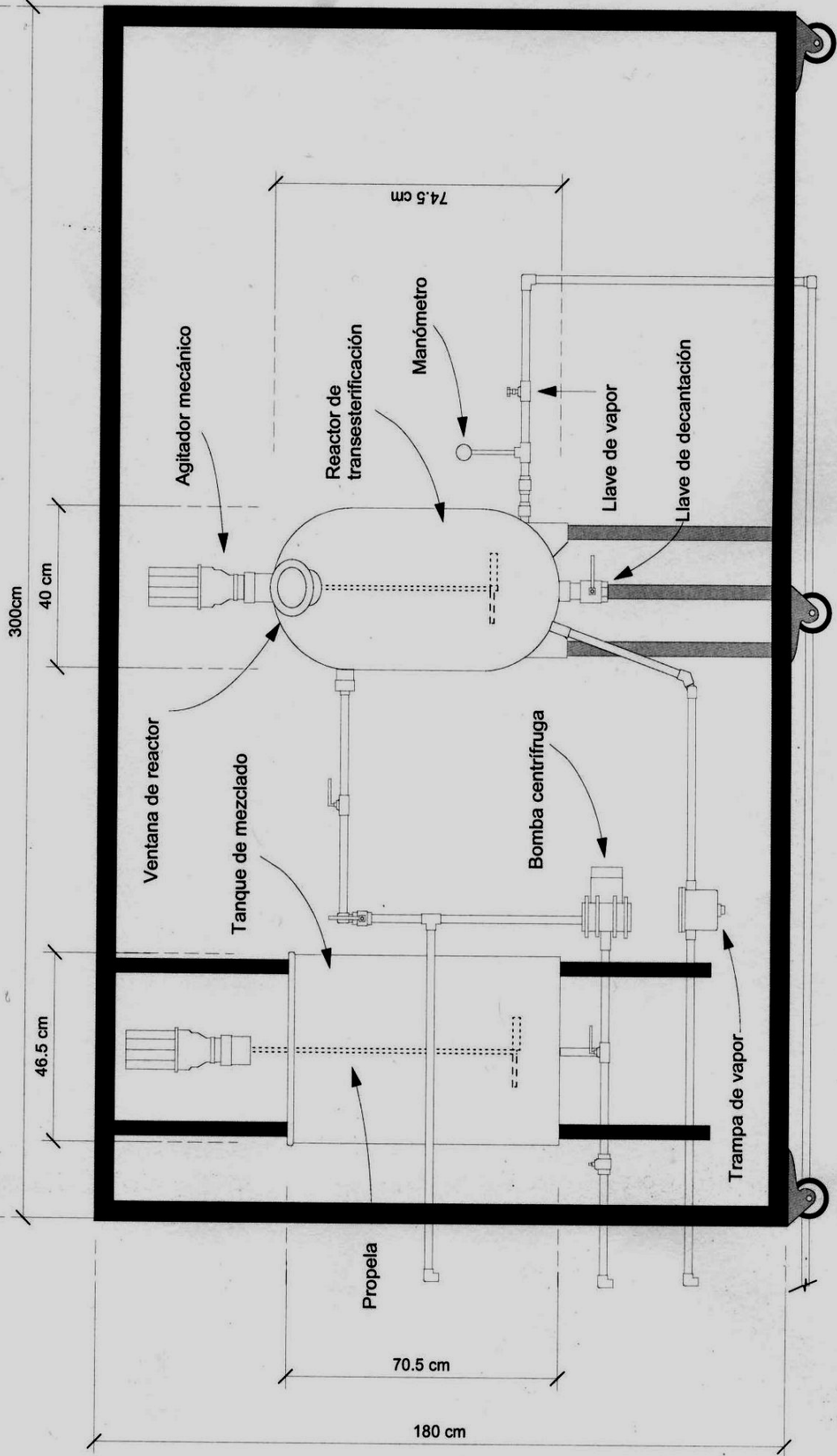
Tabla 6: Resultados del análisis de control de calidad realizado por el Ministerio de Energía y Minas para muestra de biodiesel del experimento 2 en planta piloto.

Descripción	Método de análisis	Especificación (a)	Resultados (b)	
Punto de inflamabilidad, °C	ASTM D-93		154	
Corrosión en la tira de cobre, 3 horas a 50C	ASTM D-130		1	
Calor de Combustión superior, MJ/kg	ASTM D-240		(d) 39.32	
Gravedad API, 15.56C, API	ASTM D-287		28.3	
Gravedad específica, 15.56C	ASTM D-287		0.8860	
Viscosidad cinemática, 40°C, mm ² /s (c)	ASTM D-445		4.2	
Cenizas sulfatadas, % masa	ASTM D-874		0.0	
Indice de cetano, calculado	ASTM D-976		45.5	
Destilación, 760 mmHg en base a recuperado, C	ASTM D-86		Volumen %	Recuperado, °C
			P. Inicial	324
			5	332
			10	333
			20	334
			30	335
			40	336
			50	337
			60	338
			70	341
			80	344
			85	349
			90	352
95	353			
Punto final (e)	353			

Observaciones:

- a) En el acuerdo Ministerial No.192-2006, no existen especificaciones para este producto.
- b) Los resultados son válidos sólo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio.
- c) 1 mm²/s es equivalente a 1 cSt
- d) 39.52 MJ/Kg es equivalente a 9439 Kcal/Kg y a 16991 Btu/lb.
- e) Punto final de ebullición.

Figura 14: Planta piloto de biodiesel



ELEVACIÓN FRONTAL
ESCALA 1:15

Tabla 7: Especificaciones del equipo utilizado en la planta piloto de biodiesel.

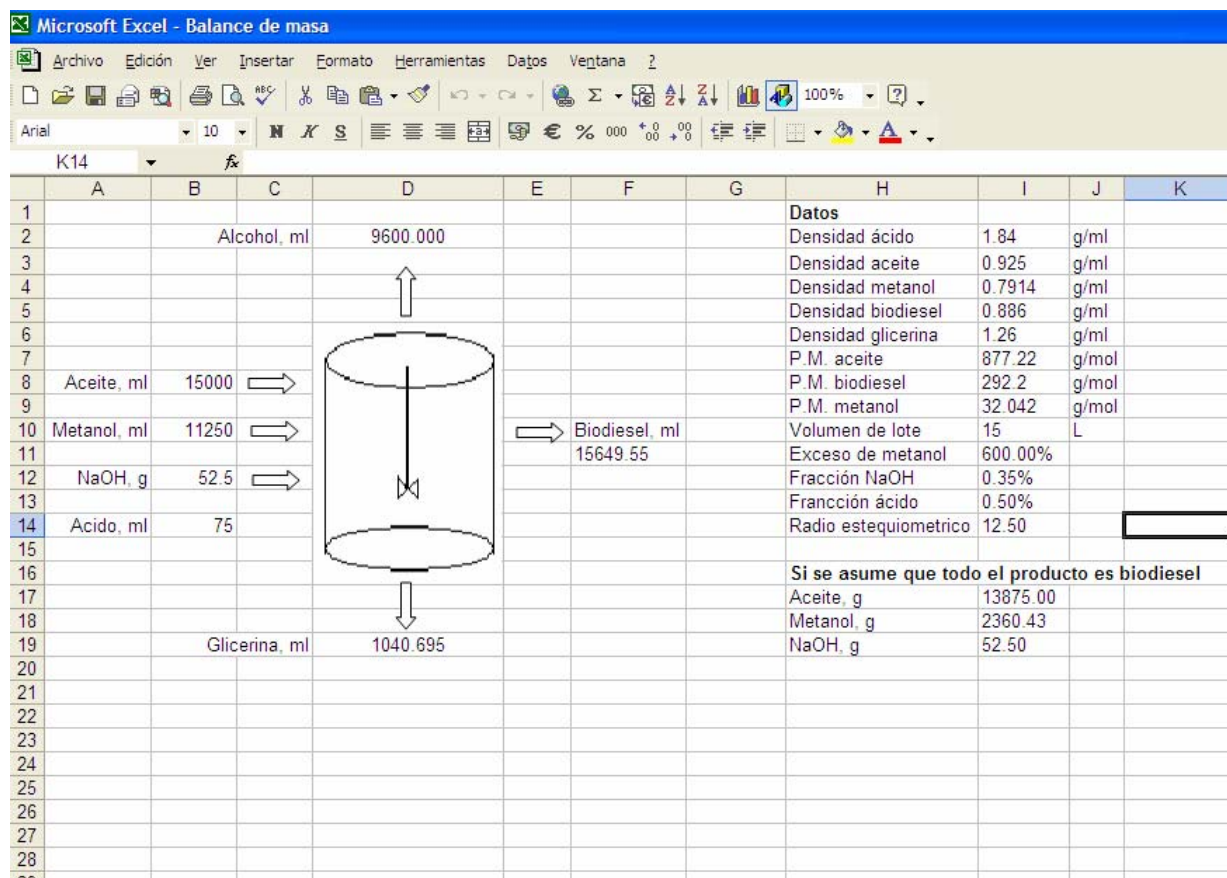
Equipo	Capacidad de Producción
Reactor	68 L
Tanque	113 L
Mixer reactor	180 L / 1725 rpm
Mixer tanque	180 L / 1725 rpm
Bomba centrífuga	20 L / min
Planta piloto	50 L / día

Tabla 8: Dimensiones de equipo utilizado para la instalación de planta piloto.

Equipo	Dimensiones
Reactor	0.40 m x 0.745 m
Tanque	0.465 m x 0.705 m
Planta piloto	3.0 m x 1.80m x 0.90 m

Tabla 9: Costos de elaboración de biodiesel en planta piloto a partir de distintas fuentes.

No.	Fuente de biodiesel	Costo de producción 1 Litro	Costo de producción 1 galon
1	Aceite refinado	Q12.93	Q48.92
2	Aceite de reciclaje	Q6.56	Q24.85

Figura 15: Balance de masa de planta piloto de biodiesel.

VIII. DISCUSIÓN

Para alcanzar los objetivos de este proyecto se inició por el estudio de la reacción de transesterificación a nivel de laboratorio. Como se observa en la tabla No. 2 de la sección de resultados, se realizó tres experimentos en pequeña escala para comprobar la funcionalidad de la producción de biodiesel a partir de aceite de girasol nuevo por medio de la transesterificación básica y utilizando metanol.

Los resultados de estos experimentos muestran que el porcentaje de rendimiento fue de 92.01 %, 70.55 % y 78.59 % para las pruebas 1, 2 y 3 respectivamente. Estequiométricamente la conversión del aceite vegetal en biodiesel por medio de una reacción de transesterificación, es decir, utilizando NaOH como catalizador mezclado con metanol, se obtiene metóxido sódico, el cual luego se mezcla con el aceite, debe ser del 99 %, sin embargo, la disminución del rendimiento de la reacción en la práctica se puede deber a las distintas causas. Siguiendo la estequiometría de la reacción, la relación molar alcohol: aceite vegetal debe ser 3.3:1, sin embargo se recomienda utilizar una relación molar metanol: aceite de 6:1, esto para que la reacción se complete, de lo contrario la reacción alcanza el equilibrio antes de que todos los triglicéridos sean convertidos a esteres, resultando en un combustible con malas propiedades de combustión. Para estos experimentos se utilizó un 80 % de metanol en exceso por lo que el rendimiento del biodiesel pudo afectarse.

La presencia de agua en el metanol y en el catalítico disminuye el rendimiento de la reacción. Es posible que en el metanol y el catalítico que se utilizó para las pruebas de laboratorio existiera un porcentaje de humedad muy alto, la presencia de agua en estos insumos disminuye el rendimiento de la reacción ya que la hidrólisis del aceite con el catalítico forma cera y jabones y la presencia de agua en los esteres metílicos forman ácidos grasos libres. Se debe señalar que aunque en menor grado, algunos otros parámetros como la temperatura y el tiempo de reacción pueden haber afectado el rendimiento de estas pruebas.

El objetivo general de este trabajo de graduación fue la instalación de una planta piloto para la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal, a partir de la reacción de transesterificación utilizando un catalítico básico, específicamente el aceite vegetal utilizado como materia prima fue el aceite de girasol nuevo, es decir aceite sin uso.

En el apéndice se presentan las fotografías de la planta piloto ya completada para su operación. Para el diseño de esta planta piloto se utilizó partes y materiales del laboratorio de operaciones unitarias que se encontraban sin uso, partiendo de un reactor y un tanque de almacenaje de acero inoxidable como base de la planta, se inició el montaje considerando criterios universales en cuenta a especificaciones para su operación, como capacidad total de biodiesel, potencia requerida, consumo de energía, peso, ancho, profundidad y altura.

La planta fue construida sobre una base metálica de 3 m x 0.90m x 1.80 m (largo x altura x profundidad) respectivamente, un reactor de acero inoxidable conteniendo una chaqueta, que es el espacio entre la pared interna y la superficie externa del reactor, en donde se hace circular el vapor que calienta la pared interna del reactor. La planta también cuenta con un suministro de calor por medio de vapor proveniente de la caldera, el cual se hace llegar al reactor por medio de tubería y una válvula que controla el flujo de vapor. Así mismo la tubería también conduce el vapor a una trampa de vapor con una llave de descarga para el condensado que se forma en la chaqueta.

El reactor cuenta también con un manómetro para controlar la presión de vapor y una termocupla para controlar la temperatura a lo largo de la reacción. En la parte superior del reactor se instaló un agitador mecánico que consta de una hélice de acero inoxidable que gira sobre un eje rotatorio a 1725 rpm, el cual se acciona por un motor eléctrico de ¼ HP. En la parte inferior del reactor se instaló una llave de bola de ¾ de pulgada de acero inoxidable para la decantación del producto y separación de la glicerina y el biodiesel.

El tanque de acero inoxidable con capacidad para almacenar 119 L cuenta en la parte superior con un agitador mecánico con una hélice de ¼ HP. Este tanque se usa para preparar la mezcla de metanol y NaOH, la cual necesita agitación para disolver todo el catalítico en el metanol. Se instaló en este tanque una bomba centrífuga de 50 psi y 1/50 HP para bombear el metóxido de sodio al reactor. Se instaló un sistema de tuberías para enviar el metóxido sódico al reactor o si se requiere se puede enviar a una línea de descarga al exterior. Este tanque también puede utilizarse para almacenar el producto terminado y dejarlo secar al ambiente.

El primer lote de producción realizado en la planta piloto fue de 18 L para este se utilizó aceite de girasol y alcohol etílico. Como se muestra en la tabla No. 3 de la sección de resultados, el porcentaje de rendimiento del experimento fue de 3.99 %, la cual se considera demasiado baja para el rendimiento teórico de la reacción. En esta prueba se obtuvo una pérdida del 96 % de los insumos utilizados por lo que nuestro balance de masa y energía fue negativo y no aceptable. Sin embargo, a partir de esta prueba se encontró y modificó algunas variables del proceso que no permitían una buena conversión para obtener el biodiesel con las propiedades buscadas.

Una variable que afectó el rendimiento fue la temperatura de la reacción. Se ha convertido en estándar para la transesterificación basada en metanol una temperatura de reacción de 60 °C, sin embargo, en esta prueba se utilizó alcohol etílico, el cual requiere una temperatura más alta (75 °C) para que se complete la reacción, el no haber alcanzado la temperatura necesaria puede conducir a una conversión incompleta, es decir, que todos los triglicéridos pueden formar monoglicéridos y diglicéridos y no llega a convertirse en esteres etílicos, lo cual puede llevar a continuar el proceso en la formación de ácidos grasos libres, jabón y emulsiones.

Es importante ser muy metódico y preciso en el control de cada variable del proceso para obtener buenos resultados. El uso de alcohol etílico tiene algunas desventajas, entre ellas requiere de una mayor cantidad de energía para completar la reacción además la relación molar alcohol: aceite es más alta (10:1) por lo que es necesario utilizar cantidades de etanol mayores. El etanol que se utilizó para esta prueba tenía un grado de pureza inferior al requerido. Es importante que el alcohol que se utilice tenga la menor cantidad de humedad posible. El uso de un alcohol en el cual hay presencia de agua es la segunda fuente de error para este lote de producción debido a que el agua puede formar jabón y ceras al reaccionar con el aceite y al entrar en contacto con el etiléster forma ácidos grasos libres, por lo que se recomienda utilizar metanol de alta pureza o etanol anhidro.

Otra variable importante en el proceso es la cantidad de catalizador, para definir esta cantidad exacta, se debe hacer una titulación del aceite, ésta indica qué tan ácido está el aceite y así no agregar suficiente catalítico puede afectar también la conversión de la misma ya que el NaOH ayuda a romper los enlaces del aceite para formar ésteres y las cadenas de éster se separan de la glicerina y se unen al sodio para formar jabón. Un exceso de catalítico puede afectar los niveles de cenizas sulfatadas en el biodiesel ya que se queda un remanente de catalítico en el biodiesel el cual puede provocar un desgaste prematuro del inyector, la bomba inyectora, pistones y la formación de depósitos en el motor.

Se observó durante el proceso de esta prueba, que todas las prácticas incorrectas mencionadas anteriormente, no son apreciables hasta el momento en que se hacen los lavados con agua del biodiesel. Este paso del procedimiento es fundamental para comprobar si hasta el momento se ha trabajado correctamente, es decir, que este paso sirve también como una prueba de calidad. Lavar el producto con agua sirve para eliminar contaminantes como metanol, jabones, NaOH y glicerina que aún se encuentren disueltos en el combustible. Cuando se agregó agua al producto obtenido se formó una emulsión color blanco en el fondo del tanque, luego al agitar el etiléster se formó una mezcla homogénea lechosa en todo el lote producido, se dejó reposar la mezcla por 24 horas pero el agua no se separó del biodiesel, teóricamente, el agua debe separarse en una hora. Esta emulsión obtenida nos lleva a la conclusión que el combustible no está bien hecho, y se debe a varias malas prácticas cometidas durante el procedimiento, nuestro biodiesel tenía más jabón de lo normal y productos intermedios de la reacción (mono y diglicéridos) que actúan como emulsificantes. El biodiesel bueno, que ha tenido una reacción completa, no forma emulsiones.

Dependiendo del tipo de emulsión que se obtuvo, se puede intentar arreglar. Una emulsión de poca importancia consiste en una tercera capa entre la del biodiesel y la del agua después del reposo del primer lavado. Sin embargo, la emulsión que se produjo en este primer lote de producción es considerada grave, ya que ésta no ocupó una capa intermedia, ni no todo el tanque de lavado, por esta razón no se intentó recuperar el biodiesel presente en la emulsión ya que de haberse podido recuperar algo de combustible, éste sería de mala calidad el cual seguiría teniendo impurezas mayores al nivel que permiten los estándares e calidad.

Aunque en el primer experimento no se obtuvo un combustible de buena calidad y el porcentaje de rendimiento fue muy bajo, se considera que fue una práctica positiva debido a que a partir del análisis de los posibles errores cometidos se corrigió variables del proceso fundamentales para obtener una reacción completa y un combustible de buena calidad. Con las variables del proceso ya afinadas, se realizó una segunda prueba en la planta piloto, esta vez utilizando aceite de girasol nuevo y alcohol metílico al 99 % de pureza como materia prima. Utilizar metanol de alta pureza en lugar de alcohol etílico viejo ya se elimina una fuente de error en la reacción, que es la presencia de agua. Otra modificación que se realizó fue la medición exacta de catalítico a utilizar por medio de una titulación del aceite. Se controló también durante toda la reacción que la temperatura se mantuviera entre 60 y 65 °C que es la temperatura requerida para que se complete la transesterificación cuando se utiliza metanol.

Para esta prueba se utilizó un exceso de alcohol del 600 % para asegurarse que se complete la reacción, este exceso de metanol es eliminado durante el proceso, paso muy importante para eliminar impurezas y formación de emulsiones. Para esta prueba, después de concluida la reacción de transesterificación se dejó reposar el producto por 24 horas para permitir una buena separación del biodiesel y la glicerina formada.

Con el fin de evitar la formación de emulsiones, en el paso de lavados con agua se tomaron varias muestras del biodiesel obtenido para lavarlo en pequeña escala y observar los resultados al agregar agua. Una vez que se aseguró que el biodiesel estaba bien hecho, se procedió a lavar el lote completo. Esta fue la primera prueba que se hizo al combustible para comprobar su calidad, y esta prueba fue satisfactoria ya que no se formaron emulsiones en el biodiesel producido y la separación de fases del agua y el metiléster fue clara. El producto fue lavado varias veces hasta que el agua de lavado salió casi cristalina.

En la tabla No. 6 de la sección de resultados se presenta el análisis de las propiedades fisicoquímicas del biodiesel obtenido de la planta piloto en este experimento, a continuación se hará un análisis de cada uno de estos resultados y la comparación con los estándares internacionales de calidad.

El primer análisis realizado al biodiesel fue el punto de inflamabilidad según el método ASTM D – 93, este análisis nos indica la temperatura mínima necesaria para que el combustible desprenda vapores que al mezclarse con el oxígeno del aire u otro oxidante capaz de arder, origine una inflamación violenta de la mezcla. Es muy importante para la seguridad y el manejo del biodiesel y también es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención del mismo. Según los estándares de biodiesel de los Estados Unidos, ASTM D6751, el valor mínimo de esta propiedad debe ser de 130 °C, el resultado obtenido para el biodiesel fue de 154 °C, por lo tanto se cumple con los estándares requeridos e indica que sí se eliminó la cantidad en exceso que se agregó de metanol en el proceso de producción.

Según la norma de calidad ASTM D130 el valor aceptado para el análisis de la corrosión en la tira de cobre es 3 como máximo, el valor obtenido para nuestra muestra de biodiesel fue de 1, lo cual supone que no existen cantidades de compuestos corrosivos o presencia de ácidos que puedan dañar el sistema de combustible de un vehículo.

Se obtuvo, para la muestra de biodiesel entregada al laboratorio técnico del Ministerio de Energía y Minas, un valor de gravedad específica de 0.886 según el método de análisis ASTM D – 287, al comparar este resultado con el estándar europeo para biodiesel EN ISO 3675, el cual establece que la densidad de un biodiesel para que éste sea aceptado debe ser de 860 – 900 kg/m³. Por lo tanto el biodiesel producido en el experimento cumple las especificaciones requeridas. Este valor indica que el biodiesel tiene buena energía térmica y por lo tanto podría tener un mejor valor comercial. Esto se reitera con el valor de gravedad API obtenida, que fue de 28.3 °API, la gravedad API es una medida de densidad que describe qué tan liviano o pesado es un combustible, generalmente un mayor valor de gravedad API en un producto representa que éste tiene un mayor valor comercial. Es importante señalar que la gravedad API es un parámetro en inglés que significa *American Petroleum Institute* sin embargo, debido a que el biodiesel es un biocombustible alternativo que puede sustituir el diesel derivado del petróleo, es útil hacer la comparación de este parámetro para tomar mayor información que sustente el uso de biodiesel como combustible que cumple con las propiedades necesarias para sustituir al diesel. En la clasificación de grados API para el petróleo, nuestro biodiesel estaría clasificado como crudo mediano (22.3 – 31.1 °API) lo cual es un excelente indicador del poder calorífico del combustible que se traduce en la economía del combustible y poder.

Una propiedad que puede afectar directamente al motor de un vehículo es la viscosidad, el resultado del análisis de viscosidad cinemática, según el método ASTM D – 445 para el biodiesel obtenido en planta fue de 41.2 mm²/s este resultado cumple el estándar de calidad de Estados Unidos y Europa que establecen límites de viscosidad de 1.9 – 6.0 mm²/s y 3.5 – 5.0 mm²/s, respectivamente. Entre mayor sea la viscosidad, mayor es la tendencia del combustible a causar pérdidas de potencia debido a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector y formación de depósitos en el motor.

Para fines del proceso de producción es recomendable utilizar metanol en lugar de alcohol etílico ya que la viscosidad de los ésteres etílicos tiende a ser mayor que la de los éster metílicos. La viscosidad también le da al combustible propiedades de lubricidad la cual beneficia al motor diesel en un mejor desempeño.

El porcentaje de masa de cenizas sulfatadas fue de 0.0 %, este análisis fue realizado según el método ASTM D – 874, este resultado nos indica que el biodiesel producido está libre de sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles y catalizadores no eliminados en el proceso. Esta propiedad es un indicador de la pureza del biodiesel y está estrechamente relacionado con los lavados con agua, paso del proceso de producción en el cual se elimina las impurezas remanentes en el éster metílico, hacer los lavados con agua nos asegura un porcentaje de cenizas sulfatadas a casi cero. El estándar de calidad

para esta propiedad del biodiesel permite un límite máximo de 0.020 %, por lo que el resultado obtenido para nuestra muestra es satisfactorio. La presencia de estas impurezas en el combustible pueden causar desgaste del inyector, la bomba de inyección pistón y anillos, además contribuyen a la formación de depósitos en el motor y la contaminación de filtros.

El índice de cetano es un descriptor de la calidad de ignición de un combustible. La escala del índice de cetano, conceptualmente es similar al octanaje en la gasolina. Esta escala va de 0 a 100 y se han establecido estándares internacionales para su determinación. La norma ASTM D – 613 para los Estados Unidos establece que el límite mínimo para el cetanaje de biodiesel es de 47. Según los resultados obtenidos por el laboratorio técnico del Ministerio de Energía y Minas, nuestra muestra de biodiesel tiene un índice de cetano calculado de 45.5. Este valor indica que el producto está levemente debajo del estándar internacional. Sin embargo, considerando que el índice de cetano estándar para el diesel es de 41, nuestro biodiesel tiene un cetanaje aceptable para ser utilizado en cualquier motor diesel. Para el biodiesel, índice de cetano mayor está correlacionado con una reducción en las emisiones de óxidos de nitrógeno. A pesar del alto índice de cetano para aceites vegetales, las emisiones de NO_x se incrementan un poco cuando se opera un motor diesel utilizando biodiesel. En adición al índice de cetano, el calor de combustión es una propiedad que muestra la calidad del biodiesel, según los resultados este combustible presenta un calor de combustión de 39.32 MJ/kg el cual es un valor aceptable según las propiedades mostradas en la tabla No. 12 del apéndice.

La última propiedad analizada de la muestra de biodiesel fue la destilación, ésta indica la temperatura máxima a la que se debe evaporar el combustible, según los resultados obtenidos, a los 352 °C se había destilado el 90 % del biodiesel y a los 353 °C se había destilado el 95 % de la muestra, esta temperatura fue el punto final de destilación, estos resultados indican que se cumple con la norma ASTM D – 1160 que especifica una temperatura de destilación máxima de 360 °C.

A partir de los resultados obtenidos por el análisis de propiedades fisicoquímicas se puede confirmar el proceso de producción de biodiesel en la planta piloto instalada cumplió con los parámetros establecidos y el producto final obtenido llena los requisitos de calidad internacionales para ser utilizado como un biocombustible en cualquier motor diesel.

IX. CONCLUSIONES

- A. A partir del análisis de propiedades fisicoquímicas de la muestra de biodiesel producido, se concluye que éste cumple con los estándares requeridos para ser utilizado en motores diesel.
- B. El porcentaje de rendimiento para el experimento en planta piloto fue de un 80.76 %.
- C. El porcentaje de rendimiento para las pruebas a nivel de laboratorio fue de 80.38 %.
- D. Según las normas ASTM D 6751 y EN 14214, el producto obtenido de la planta piloto está aceptado por las normas internacionales de calidad ya que en las siguientes propiedades, su valor está dentro de los rangos estándar: punto de inflamabilidad, 154 °C, gravedad específica, 0.8860, viscosidad cinemática, 4.2 mm²/s, y cenizas sulfatadas, 0.0%.
- E. Se obtuvo un índice de cetano para el biodiesel producido en planta de 45.5, el límite mínimo establecido por la norma ASTM D613 para la agencia nacional del petróleo de Brasil es de 45, por lo que se concluye que nuestro biodiesel cumple con la norma.
- F. El punto final de destilación para el biodiesel obtenido fue de 353 °C, este valor cumple con la regulación establecida por la norma ASTM D6751 para los Estados Unidos.
- G. La capacidad de producción de la planta piloto es de 50L / día de biodiesel.
- H. El costo final de la instalación de la planta piloto ascendió a Q87,451.00.

X. RECOMENDACIONES

- A. Para obtener un biodiesel de buena calidad siguiendo la metodología especificada en este informe se recomienda utilizar alcohol metílico en lugar de etanol como materia prima.
- B. Para reducir la cantidad necesaria de alcohol para completar la reacción, se recomienda hacer pruebas en la planta piloto variando la cantidad de metanol en exceso utilizado iniciando las pruebas con un exceso de metanol del 100%.
- C. Se recomienda hacer pruebas con distintos aceites vegetales para observar la disminución o aumento del índice de cetano y su correlación con los triglicéridos utilizados.
- D. Con el fin de poder utilizar aceites de desecho como materia prima, se recomienda la instalación de un filtro para limpiar aceites usados y observar rendimientos de producción en planta piloto.
- E. Para mejorar el proceso de obtención del biodiesel y la recuperación de materias primas como el metanol, se recomienda la instalación de un condensador en el reactor de la planta, esto con el fin de recuperar el metanol evaporado en el paso de la eliminación de alcohol.
- F. Para eliminar todas las impurezas presentes en el biodiesel se recomienda antes de hacer los lavados con agua, tomar una muestra del lote y hacer los lavados a nivel laboratorio, una vez los resultados de este paso sean satisfactorios proseguir a realizar el lavado del tanque completo.
- G. Si se observa que la reacción no se ha completado por la presencia de emulsiones, jabones, ceras, etc. Revisar cada variable del proceso (tiempo de reacción, temperatura, cantidad de insumos, ausencia de agua en materias primas, mezclado, separación de fases, lavados, materias primas utilizadas) hasta el momento, antes de continuar al siguiente paso, con el fin de corregir y evitar graves errores.
- H. Antes de iniciar un lote de producción, se recomienda repasar la metodología presentada en este informe y ser muy detallista en el seguimiento de cada variable del proceso, para obtener buenos resultados.
- I. Se recomienda evitar en toda medida la presencia de humedad en el proceso desde el posible contenido de agua en materias primas y catalizador hasta el almacenaje del producto final.

- J. Se recomienda hacer un filtrado de la glicerina obtenida para poder utilizarla en operaciones del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad o usarla para fines comerciales.
- K. Se recomienda hacer una mezcla B20 de biodiesel con diesel en el momento de hacer pruebas directas en motores de combustión.

XI. BIBLIOGRAFÍA

Knothe, G. y Krahl, J. 2005. *The Biodiesel Handbook*. United States of America. Editorial AOCS. 302 págs.

McCabe, W.L., 1998. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México, Editorial McGraw-Hill. 1122 págs.

Perry, R.H y D. Green.1984. *Perry`s Chemical Engineer`s handbook*. 5ta. Ed. Nueva York, Editorial McGraw-Hill. 1500 págs.

Teybal, R.E.1998. *Operaciones de transferencia de Masa*. 2a.Ed. México. Editorial McGraw- Hill. 858 págs.

Referencias de internet:

Austria: Austrian Biofuels Institute.. <<http://www.deh.gov.au/atmosphere/biodiesel/>> [15enero 2007]

Biodiesel en Argentina. Buenos Aires: enero 2007. <<http://www.biodiesel.com.ar/>> [10 enero 2008]

Canada: Biodiesel Association of Canada. <www.biodiesel-canada.org> [7 enero 2007]

Canada: Canadian Renewable fuels Association.. <<http://www.greenfuels.org/bioindex.html>> [23 enero 2007]

Journey to forever (Organización Viaje al Infinito). Elaboración de biodiesel [en línea]. Estados Unidos: 1997. <http://journeytoforever.org/es/biodiesel_fabricar.html> [7 enero 2008].

United States: EPA biodiesel fact sheet.

<<http://www.epa.gov/otaq/consumer/fuels/altfuels/biodiesel.pdf>> [12 febrero 2007]

United States: Iowa State University. <<http://www.me.iastate.edu/biodiesel/>> [18 enero 2007]

United States: Nacional Biodiesel Borrada. <www.biodiesel.org> [10 febrero 2007]

XII. APÉNDICE

Tabla 10: Standard de biodiesel ASTM D6751 (Estados Unidos de Norteamérica)

PROPIEDAD	MÉTODO ASTM	LÍMITES	UNIDAD
Calcio y Magnesio Combinado	EN 14538	5 max	ppm (ug/g)
Punto de inflamabilidad (closed cup)	D 93	130 min.	°C
Contenido de metanol	EN14110	0.2 Max	% vol.
Agua y sedimentos	D 2709	0.05 max.	% vol.
Viscosidad Cinemática, 40 C	D 445	1.9 - 6.0	mm ² /sec.
Cenizas Sulfatadas	D 874	0.02 max.	% masa
Azufre			
Grado S 15	D 5453	0.0015 max. (15)	% masa (ppm)
Grado S 500	D 5453	0.05 max. (500)	% masa (ppm)
Corrosión en la tira de cobre	D 130	No. 3 max.	
Indice de cetano	D 613	47 min.	
Punto de nube	D 2500	Reportar	°C
Residuo de carbón 100% de muestra	D 4530	0.05 max.	% masa
Número ácido	D 664	0.50 max.	mg KOH/g
Glicerina libre	D 6584	0.020 max.	% masa
Glicerina total	D 6584	0.240 max.	% masa
Contenido de fósforo	D 4951	0.001 max.	% masa
Destilación, al 90% recuperado	D 1160	360 max.	°C
Sodio/Potasio combinado	EN 14538	5 max	ppm
Estabilidad de oxidación	EN 14112	3 min	horas

Tabla 11: Comparación de estándares para el uso de diesel y biodiesel.

PROPIEDAD	MÉTODO	LÍMITES		UNIDAD
		Diesel	Biodiesel	
Densidad a 15°C	EN ISO 3675	820 -845	860 - 900	kg/m ³
Viscosidad a 40°C	EN ISO 3104, ISO 3105	2.0 - 4.5	3.5 - 5	mm ² /s
Punto de inflamabilidad	EN ISO 3679	55 min	120 min	°C
Azufre	EN ISO 20846	350 max	10 max	mg/kg
Residuo de carbón 100% de muestra	EN ISO 10370	0.3 max	0.3 max	% (m/m)
Indice de cetano	EN ISO 5165	46 min	46 min	-----
Cenizas Sulfatadas	ISO 3987	0.01 max	0,02 max	% (m/m)
Contenido de agua	EN ISO 12937	200 max	500 max	mg/kg
Contaminación total	EN 12662	24 max	24 max	mg/kg
Corrosion en la tira de cobre (3h a 50°C)	EN ISO 2160	1 min	1 min	-----
Estabilidad de oxidación, 110°C	EN 14112	25 max	6 min	min

Tabla 12: Estándar de biodiesel EN 14214 (Unión Europea)

PROPIEDAD	MÉTODO	LÍMITES		UNIDAD
		min.	max.	
Contenido de ester	EN 14103	96,5		% (m/m)
Densidad a 15°C	EN ISO 3675	860	900	kg/m ³
Viscosidad a 40°C	EN ISO 3104, ISO 3105	3,5	5	mm ² /s
Punto de inflamabilidad	EN ISO 3679	120		°C
Azufre	EN ISO 20846		10	mg/kg
	EN ISO 20884			
Residuo de carbon 100% de muestra	EN ISO 10370		0,3	% (m/m)
Indice de cetano	EN ISO 5165	51		
Cenizas Sulfatadas	ISO 3987		0,02	% (m/m)
Contenido de agua	EN ISO 12937		500	mg/kg
Contaminación total	EN 12662		24	mg/kg
Corrosion en la tira de cobre (3h a 50°C)	EN ISO 2160	1		
Estabilidad de oxidación, 110°C	EN 14112	6		Min
Valo ácido	EN 14104		0,5	mg KOH/g
Valor de yodo	EN 14111		120	g iodine/100g
Acido linoleico estér metílico	EN 14103		12	% (m/m)
Contenido FAME (>=4 enlaces dobles)			1	% (m/m)
Contenido de Metanol	EN 14110		0,2	% (m/m)
Contenido de monogliceridos	EN 14105		0,80	% (m/m)
Contenido de digliceridos	EN 14105		0,20	% (m/m)
Contenido de trigliceridos	EN 14105		0,20	% (m/m)
Glicerina libre	EN 14105		0,02	% (m/m)
	EN 14106			
Glicerina total	EN 14105		0,25	% (m/m)
Metales alcalinos (Na+K)	EN 14108, EN 14109		5,0	mg/kg
Calcio y Magnesio Combinado	EN 14538		5,0	mg/kg
Contenido de fósforo	EN 14107		10	mg/kg

Tabla 13: Estándar de biodiesel según la Agencia Nacional de Petróleo de Brasil.

PROPIEDAD	MÉTODO	LÍMITES		UNIDAD
		min.	max.	
Gravedad específica	D 1298/4052		ANP 310	
Viscosidad a 40°C	EN ISO 3104	3,5	5	mm ² /s
Punto de inflamabilidad	EN ISO 3679	100		°C
Azufre	EN ISO 14596		0.001	% (m/m)
Residuo de carbón 100% de muestra	EN ISO 10370		0.05	% (m/m)
Índice de cetano	EN ISO 5165	45		
Cenizas Sulfatadas	ISO 3987		0.02	% (m/m)
Contenido de agua y sedimentos	D 2709		0.02	% (m/m)
Corrosion en la tira de cobre (3h a 50°C)	EN ISO 2160		1	
Estabilidad de oxidación, 110°C	EN 14112	6		min
Valo ácido	EN 14104		0.80	mg KOH/g
Valor de yodo	EN 14111		Reportar	g iodine/100g
Contenido de Metanol	EN 14110		0.5	% (m/m)
Contenido de monoglicéridos	EN 14105		1	% (m/m)
Contenido de diglicéridos	EN 14105		0.25	% (m/m)
Contenido de triglicéridos	EN 14105		0.25	% (m/m)
Glicerina libre	EN 14105		0,02	% (m/m)
	EN 14106			
Glicerina total	EN 14105		0.38	% (m/m)
Metales alcalinos (Na+K)	EN 14108, EN 14109		10	mg/kg
Calcio y Magnesio Combinado	EN 14538		5,0	mg/kg
Destilación, al 90% recuperado	D 1160		360	°C

Tabla 14: Estándar de biodiesel según Reglamento Técnico Centroamericano.

PROPIEDAD	MÉTODO	LÍMITES		UNIDAD
		min.	max.	
Contenido de ester	EN 14103	96,5		% (m/m)
Densidad a 15°C	ASTM D 287/ D1298			Reportar
Viscosidad cinemática 40°C	ASTM D 445	1.9	6.5	mm ² /s
Punto de inflamabilidad	ASTM D93	130		°C
Azufre	ASTM D 5453		15	mg/kg
Residuo de carbón 100% de muestra	ASTM D 4530		0,05	% (m/m)
Indice de cetano	ASTM D 613	47		
Cenizas Sulfatadas	ASTM D 874		0,02	% (m/m)
Agua y sedimentos	D 2709		0.05	% vol.
Corrosion en la tira de cobre (3h a 50°C)	ASTM D130		3	
Estabilidad de oxidación, 110°C	EN 14112	6		min
Valor ácido	ASTM D 664		0,5	mg KOH/g
Destilación, al 90% recuperado	D 1160		360	°C
Contenido de alcohol	EN 14110		0,2	% (m/m)
Glicerina libre	ASTM D 6584		0,02	% (m/m)
Glicerina total	ASTM D 6584		0,240	% (m/m)
Metales alcalinos (Na+K)	EN 14108, EN 14109		5,0	mg/kg
Calcio y Magnesio Combinado	EN 14538		5,0	mg/kg
Contenido de fósforo	ASTM D 4951		0.001	% (m/m)

Tabla 15: Propiedades relacionadas a combustibles para algunos aceites y grasas.

Aceite o grasa	Valor de Yodo	NC	HC (kJ/kg)	Viscosidad (mm 2/s)	PN (°C)	PE (°C)	PI (°C)
Babassu	10 - 18	38	-	-	-	-	-
Castor	82-88	?	39500	297 (38 C)	-	-31.7	260
Coco	6-12	-	-	-	-	-	-
Maiz	103-140	37.6	39500	34.9 (38 C)	-1.1	-40.0	277
Semilla de algodón	90-119	41.8	39468	33.5 (38 C)	1.7	-15.0	234
Crambe	93	44.6	40482	53.6 (38 C)	10.0	-12.2	274
Linaza	168-204	34.6	39307	27.2 (38 C)	1.7	-15.0	241
Oliva	75-94	-	-	-	-	-	-
Palma	35-61	42	-	-	-	-	-
Nuez	80-106	41.8	39782	39.6 (38 C)	12.8	-6.7	271
Colza	94-120	37.6	39709	37.0 (38 C)	-3.9	-31.7	246
Cártamo	126-152	41.3	39519	31.3 (38 C)	18.3	-6.7	260
Cártamo alto en oleinas	90-100	49.1	39516	41.2 (38 C)	-12.2	-20.6	293
Sesame	104-120	40.2	39349	35.5 (38 C)	-3.9	-9.4	260
Soya	117-143	37.9	39623	32.6 (38 C)	-3.9	-12.2	254
Girasol	110-143	37.1	39575	37.1 (38 C)	7.2	-15.0	274
Sebo	35-48	-	40054	51.15 (40 C)	-	-	201
No. 2 DF	-	47	45343	2.7 (38 C)	-15.0	-33.0	52

NC = Número de cetano, HC = Calor de combustión, PN= Punto de Nube, PE = Punto de enturbamiento, PI = Punto de inflamación.

Tabla 16: Propiedades relacionadas a combustibles para algunos ésteres.

Ester	NC	HC (kJ/kg)	Viscosidad (mm ² /s)	PN (°C)	PE (°C)	PI (°C)
<i>Metílico</i>						
De algodón	51.2	-	6.8 (21 C)	-	-4	110
Colza	54.4	40449	6.7 (40 C)	-2	-9	84
Cártamo	49.8	40060	-	-	-6	180
Soya	46.2	39800	4.08 (40 C)	2	-1	171
Girasol	46.6	39800	4.22 (40 C)	0	-4	-
Cebo	-	39949	4.11 (40 C)	12	9	96
<i>Etílico</i>						
Palma	56.2	39070	4.5 (37.8 C)	8	6	19
Soya	48.2	40000	4.41 (40 C)	1	-4	174
Cebo	-	-	-	15	12	-

NC = Número de cetano, HC = Calor de combustión, PN= Punto de Nube, PE = Punto de enturbamiento, PI = Punto de inflamación.

Tabla 17: Relaciones estequiométricas metanol:aceite para aceites

Aceites y grasas	Peso molecular	Densidad	Densidad @ 50°C	Volumen aceite (ml)	Volumen metanol (ml)	Relación estequiométrica methanol : aceite %
Sebo	858.54	0.895	0.88	981.18	121.52	12.4
Manteca de cerdo	863.73	0.92*	0.9*	959.7*	121.52	12.7
Mantequilla	797.64	0.91	0.89	896.73	121.52	13.6
Coco	674.51	0.926	0.91	744.57	121.52	16.3
Palma kernel	704	0.912	0.89	789.33	121.52	15.4
Palma	847.28	0.923	0.9	938.29	121.52	13
Cártamo	879.1	0.927	0.91	966.44	121.52	12.6
Maní	885.02	0.919	0.9	984.45	121.52	12.3
De algodón	867.38	0.918	0.9	963.76	121.52	12.6
Maiz	872.81	0.923	0.9	966.57	121.52	12.6
Oliva	870.65	0.923	0.9	964.17	121.52	12.6
Girasol	877.22	0.925	0.91	969.3	121.52	12.5
Soya	882.82	0.925	0.91	975.5	121.52	12.5
Colza/Canola	959.04	0.914	0.89	1072.75	121.52	11.3
Mustaza	925.43	0.916	0.9	1032.85	121.52	11.8
De hígado de bacalao	908.81	0.929	0.91	1000.34	121.52	12.1
Linaza	872.4	0.934	0.91	954.48	121.52	12.7
Tung	873.68	0.944	0.92	945.54	121.52	12.9

Tabla 18: Análisis del Ministerio de Energía y Minas de muestra de biodiesel de planta piloto.

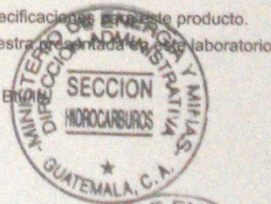
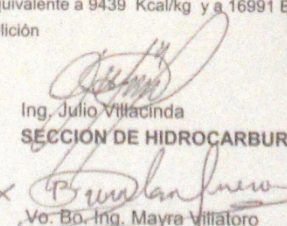
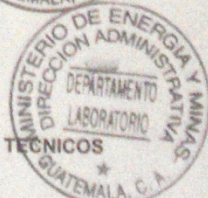
LABORATORIO TECNICO		MEM		
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DE GUATEMALA		PAGINA 1 DE (1)		
		LAB-REP-1321-07		
		ORDEN No. L-606-07		
		GUATEMALA, 03-12-07		
RESULTADOS DE ANALISIS				
MUESTRA: Biodiesel				
PRESENTADA POR: Diego Ayala				
RESPONSABLES DEL MUESTREO: Diego Ayala				
PROCEDENCIA: Diego Ayala. Muestra No. 2				
LOCALIZACION: Boulevard Los Próceres 9-73 Zona 10, Guatemala				
FECHA DE MUESTREO: Desconocida				
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 23-11-07				
FECHA DE ANALISIS: del 27 al 30-11-07				
PRECIO DE ANALISIS: \$ 58.40				
ANALISTA: Edgar Sandoval				
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)	
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93		154	
CORROSION EN LA TIRA DE COBRE, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130		1	
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/kg	ASTM D-240		(d) 39.32	
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287		28.3	
GRAVEDAD ESPECIFICA, 15.56°C	ASTM D-287		0.8860	
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm ² /s (c)	ASTM D-445		4.2	
CENIZAS SULFATADAS, % masa	ASTM D-874		0.0	
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-976		45.5	
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86		VOLUMEN	RECUPERADO
			%	°C
			P. INICIAL	324
			5	332
			10	333
			20	334
			30	335
			40	336
			50	337
			60	338
			70	341
			80	344
			85	349
90	352			
95	353			
PUNTO FINAL (e)			353	
OBSERVACIONES:				
a) En el Acuerdo Ministerial No. 192-2006, no existen especificaciones para este producto.				
b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio				
c) 1 mm ² /s es equivalente a 1 cSt				
d) 39.52 MJ/Kg es equivalente a 9439 Kcal/kg y a 16991 Btu/lb				
e) Punto final de ebullición				
Ing. Julio Villacinda SECCION DE HIDROCARBUROS				
 Ver. Bto. Ing. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS				

Tabla 19: Resultados de análisis muestra biodiesel de experimento a nivel laboratorio.

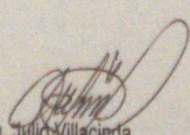
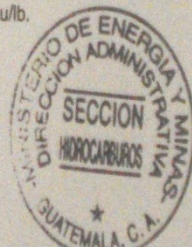
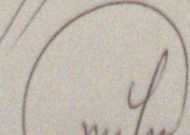
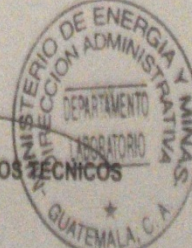
RESULTADOS DE ANALISIS			
MUESTRA: Biodiesel			
PRESENTADA POR: Diego Ayala			
RESPONSABLES DEL MUESTREO: Diego Ayala			
PROCEDENCIA: Diego Ayala. Muestra No. 1			
LOCALIZACION: Boulevard Los Próceres, 9-73 Zona 10, Guatemala			
FECHA DE MUESTREO: Desconocida			
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 23-11-07			
FECHA DE ANALISIS: del 27 al 28-11-07			
PRECIO DE ANALISIS: \$ 23.60			
ANALISTA: Oscar Lara			
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93		176
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/kg	ASTM D-240		(c) 38.40
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm ² /s (c)	ASTM D-445		5.30
OBSERVACIONES:			
a) En el Acuerdo Ministerial No. 192-2006, no existen especificaciones para este producto.			
b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio			
d) 38.40 MJ/Kg es equivalente a 9171 Kcal/kg y a 16507 Btu/lb.			
 Ing. Julio Villacinda SECCION DE HIDROCARBUROS			
 Vo. B. Ing. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS			

Figura 16: Planta piloto de biodiesel vista frontal



Figura 17: Planta piloto de biodiesel vista trasera



A. Cálculos

1. Cantidad de NaOH para valoración. Para definir la cantidad de NaOH necesaria para la reacción, se multiplica el número de ml medidos en la valoración por el número de litros de aceite que se va a convertir en biodiesel. En el cálculo hay que incluir algo más, cada litro de aceite que no ha sido cocinado (aceite nuevo) necesita 3.5 g de NaOH para la reacción. Por eso hay que sumar 3.5 g de NaOH por cada litro de aceite cocinado que se vaya a transesterificar. Normalmente hacen falta entre seis y siete gramos de NaOH por cada litro de aceite.

Por ejemplo: si en la valoración fueron necesarios 2.4 ml para alcanzar el pH 8-9 y se va a usar 150 litros de aceite.

$$2.4 \text{ g NaOH} \times 150 \text{ l aceite} = 360 \text{ g NaOH}$$

$$3.5 \text{ g NaOH} \times 150 \text{ l aceite} = 525 \text{ g NaOH}$$

$$360 \text{ g} + 525 \text{ g} = 885 \text{ gramos de NaOH}$$

2. Análisis de costos de producción. Para la elaboración de un lote de 50L de biodiesel obtenido a partir de aceite de girasol refinado, metanol y NaOH.

a. Costo de aceite. Se utiliza 50L de aceite refinado para la producción de 1 lote de biodiesel, el precio corresponde a 1 un tonel de aceite refinado de girasol.

$$50L \times \left(\frac{1 \text{ gal}}{3.785L} \right) \times \left(\frac{1 \text{ ton}}{55 \text{ gal}} \right) \times \left(\frac{Q1435.00}{1 \text{ tonel}} \right) \equiv Q344.66$$

b. Alcohol metílico. Para un lote de 60L de biodiesel se utiliza 6.25L de metanol, sin embargo debido a que se utilizó un exceso se estima el costo sobre el total de metanol utilizado.

$$12.5L \times \left(\frac{1 \text{ gal}}{3.785L} \right) \times \left(\frac{1 \text{ tonel}}{55 \text{ gal}} \right) \times \left(\frac{Q1345.00}{1 \text{ tonel}} \right) \equiv Q80.76$$

c. Hidróxido de Sodio. El costo de 1 lb de soda cáustica es de Q5.50, para el lote de biodiesel el costo de NaOH fue de,

$$175 \text{ g NaOH} \times \left(\frac{1 \text{ lb}}{454 \text{ g}} \right) \times \left(\frac{Q5.5}{1 \text{ lb}} \right) \equiv Q2.10$$

d. Diesel de la caldera. La caldera del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala utiliza 6.0 galones de diesel por cada hora de producción de vapor, para la producción del lote de biodiesel se utilizó 60 min de vapor, por lo que se tiene,

$$1.5h \times \left(\frac{6.0 \text{ gal}}{1h} \right) \times \left(\frac{Q22.80}{\text{gal}} \right) \equiv Q205.20$$

e. Agitadores mecánicos. El motor del reactor y el del tanque de mezclado utilizan cada uno 0.184 KW de potencia, si se considera que se utilizó cada uno por 60 min para la producción de un lote de biodiesel, entonces tenemos,

$$0.368KWh \times \left(\frac{Q1.37}{1KWh} \right) \equiv Q0.50$$

f. Bomba centrífuga. La bomba utilizada para bombear el metóxido de sodio del tanque de mezclado al reactor utiliza 0.065 KW de potencia, si se considera que se utilizó por 1h para la producción de un lote de biodiesel, tenemos,

$$0.065KWh \times \left(\frac{Q1.37}{1KWh} \right) \equiv Q0.09$$

g. Costo finales de producción. El costo de la materia prima y energía consumida para producir 49L de biodiesel fue de Q633.31, esto valor representa que el precio para elaborar un galón de biodiesel en planta piloto es de Q48.92.

$$(Q344.66 + Q80.76 + Q2.10 + Q205.20 + Q0.50 + Q0.09 \equiv Q633.31)$$

$$\left(\frac{Q633.31}{49L} \right) \times \left(\frac{3.785L}{1gal} \right) \equiv Q48.92 / gal$$

3. Análisis de costos de instalación. A continuación se presenta un análisis de los materiales utilizados para instalación de la planta y el costo de cada uno de ellos.

Tabla 20: Descripción de costos de materiales para instalación de planta piloto.

Cantidad	Descripción	Precio unitario Q	Precio total Q
1	Tanque de mezclado de inox con capacidad en volumen de 113L	Q1,100.00	Q1,100.00
1	Reactor de tranesterificación de inox y chaqueta de vapor con capacidad de 50-98PSI, 300 ⁰ F, y volumen de 68L	Q80,000.00	Q80,000.00
2	Agitadores mecánicos de ¼ HP, 115 Volts, 60Hz, 1725RPM	Q1,163.00	Q2,326.00
1	Manómetro	Q160.00	Q160.00
1	Bomba centrífuga de 50 PSI, 3450 RPM, 65 Watt, 1/50 HP, 0.6 Amp, 115 Volt	Q535.00	Q535.00
1	Válvula de asiento	Q120.00	Q120.00
1	Válvula de bola de inox de 2.5pulg.	Q350.00	Q350.00
6	Válvula de bola de 0.5pulg	Q50.00	Q300.00
3	Uniones universals de inox de ¾ pulg.	Q30.00	Q90.00
2	Reducidor campana de 1 a ¾ pulg.	Q150.00	Q300.00
1	Tuberia de inox. (6m) de 0.5pulg	Q320.00	Q320.00
5	Codos de 90 ⁰ de ¾ pulg de inox.	Q30.00	Q150.00
3	Te de inox. de ¾ pulg	Q30.00	Q90.00
1	Trampa de vapor	Q830.00	Q830.00
2	Tuberia de metal de 2pulg	Q200.00	Q400.00
1	Tuberia de hierro negro (6m) de 0.5pulg	Q380.00	Q380.00
	TOTAL DE MATERIALES		Q87,451.00

4. Análisis de costos de producción. Para la elaboración de un lote de 50L de biodiesel obtenido a partir de aceite de reciclaje, metanol y NaOH.

a. Costo de aceite. Se utiliza 50L de aceite refinado para la producción de 1 lote de biodiesel, el precio corresponde a 1 un tonel de aceite refinado de girasol.

$$50L \times \left(\frac{1gal}{3.785L} \right) \times \left(\frac{1ton}{55gal} \right) \times \left(\frac{Q137.50}{1tonel} \right) \equiv Q33.02$$

b. Alcohol metílico. Para un lote de 60L de biodiesel se utiliza 6.25L de metanol, sin embargo debido a que se utilizo un exceso se estima el costo sobre el total de metanol utilizado.

$$12.5L \times \left(\frac{1gal}{3.785L} \right) \times \left(\frac{1tonel}{55gal} \right) \times \left(\frac{Q1345.00}{1tonel} \right) \equiv Q80.76$$

c. Hidróxido de Sodio. El costo de 1 lb de soda cáustica es de Q5.50, para el lote de biodiesel el costo de NaOH fue de,

$$175gNaOH \times \left(\frac{1lb}{454g} \right) \times \left(\frac{Q5.5}{1lb} \right) \equiv Q2.10$$

d. Diesel de la caldera. La caldera del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala utiliza 6.0 galones de diesel por cada hora de producción de vapor, para la producción del lote de biodiesel se utilizó 60 min de vapor, por lo que se tiene,

$$1.5h \times \left(\frac{6.0gal}{1h} \right) \times \left(\frac{Q22.80}{gal} \right) \equiv Q205.20$$

e. Agitadores mecánicos. El motor del reactor y el del tanque de mezclado utilizan cada uno 0.184 KW de potencia, si se considera que se utilizó cada uno por 60 min para la producción de un lote de biodiesel, entonces tenemos,

$$0.368KWh \times \left(\frac{Q1.37}{1KWh} \right) \equiv Q0.50$$

f. Bomba centrífuga. La bomba utilizada para bombear el metóxido de sodio del tanque de mezclado al reactor utiliza 0.065 KW de potencia, si se considera que se utilizó por 1h para la producción de un lote de biodiesel, tenemos,

$$0.065KWh \times \left(\frac{Q1.37}{1KWh} \right) \equiv Q0.09$$

g. Costo finales de producción. El costo de la materia prima y energía consumida para producir 49L de biodiesel fue de Q321.68, este valor representa que el precio para elaborar un galón de biodiesel en planta piloto es de Q24.85.

$$(Q33.02 + Q80.76 + Q2.10 + Q205.20 + Q0.50 + Q0.09 \equiv Q321.68)$$

$$\left(\frac{Q321.68}{49L}\right) \times \left(\frac{3.785L}{1gal}\right) \equiv Q24.85 / gal$$