

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL
BIODIESEL OBTENIDO A PARTIR DE ACEITE DE PALMA
Y ETANOL, COMO COMBUSTIBLE ALTERNO DEL DIESEL 2D**

**JORGE ALEJANDRO CORDERO LÓPEZ
ASESORADO POR Ing. JULIO VILLACINDA MALDONADO**

Guatemala, agosto de 2003

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
HIPÓTESIS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. COMBUSTIBLES	5
2.1 Combustibles sólidos	6
2.2 Combustibles líquidos	6
2.3 Utilización de los combustibles	7
3. CRITERIOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE UN COMBUSTIBLE	9
3.1 Potencia calorífica	9
3.2 Volatilidad	9
3.3 Estabilidad durante el almacenamiento	10
3.4 Seguridad	10
4. COMBUSTIBLE DIESEL	13
4.1 Motor diesel	14
4.2 Sistema de inyección diesel	15
4.3 Encendido del combustible	16
4.4 Eficiencia térmica y económica del diesel	17

4.5 Sistema de arranque	18
4.6 Sistema de apertura y cierre del combustible	19
5. BIODIESEL	21
5.1 Definición	21
5.2 Obtención	21
5.3 Producción	23
5.4 Biodiesel contra petrodiesel	27
6. ACEITE DE PALMA	29
6.1 Descripción general	29
6.2 Uso agroindustrial	29
6.3 Aplicaciones	31
6.4 La palma y el medio ambiente	32
7. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL DIESEL	33
7.1 Índice de cetano	33
7.2 Punto de inflamabilidad	35
7.3 Viscosidad	36
7.4 Destilación	37
7.5 Calor de combustión	37
7.6 Densidad	38
7.7 Corrosión en la lámina de cobre	39
7.8 Contenido de azufre	39
7.9 Agua y sedimento	40
7.10 Contenido de ceniza	41
8. RESULTADOS	43
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49

CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59
APÉNDICE	61
ANEXO	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal o grasa animal y metanol	24
2	Diagrama de elaboración de biodiesel a partir de aceite y metanol	25
3	Índice de cetano vs. Porcentaje de biodiesel	45
4	Punto de inflamación vs. Porcentaje de biodiesel	45
5	Viscosidad vs. Porcentaje de biodiesel	46
6	Destilación vs. Porcentaje de biodiesel	46
7	Poder calorífico vs. Porcentaje de biodiesel	47
8	API vs. Porcentaje de biodiesel	47
9	Corrosión vs. Porcentaje de biodiesel	48
10	Azúfre vs. Porcentaje de biodiesel	48
11	Reacción de transesterificación de oleína y etanol	85

TABLAS

I	Consumo de materiales y servicios para la producción de 1 ton de biodiesel a partir de metanol	26
II	Propiedades promedio por lote del biodiesel	43
III	Propiedades de las mezclas biodiesel-diesel 2D	43
IV	Análisis estadístico de las propiedades en los lotes	44
V	Decisión de los intervalos de Duncan	82
VI	Resumen del método ANOVA	82
VII	Valor obtenido de análisis del lote 1	83
VIII	Valor obtenido de análisis del lote 2	83
IX	Valor obtenido de análisis del lote 3	84
X	Valor de exportaciones e importaciones de aceite palma	87
XI	Importación de petróleo y productos petroleros	88
XII	Consumo de petróleo y productos petroleros	88
XIII	Balance de diesel en Guatemala	89
XIV	Acuerdo Gubernativo 207-2001	90
XV	Control de ácidos grasos en la oleina	90

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grados Celsius (Centígrados)
°F	Grados Fahrenheit
API	Acrónimo del inglés <i>American Petroleum Institute</i> ; en español Instituto Americano del Petróleo
ASTM	Acrónimo del inglés <i>American Society for Testing and Materials</i> ; en español, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
BTU/lb	Unidad de energía en el sistema inglés
cm	Abreviatura centímetros
g	Abreviatura gramo
Kp	Abreviatura de Kilo Pascales
L	Abreviatura litro
mL	Abreviatura de mililitros
psi	Acrónimo del inglés <i>Pounds per Square Inch</i> ; en español libras por pulgada cuadrada

S	Símbolo del Azúfre
cSt	Unidad de viscosidad denominada centistoke y corresponde a 1 mm ² /s
%	Símbolo de porcentaje

GLOSARIO

Agua y sedimento	Prueba que se realiza a los combustibles para determinar impurezas indeseables como agua y sedimentos.
Auto-ignición	Se refiere al momento en que vapores inflamables expuestos al aire libre hacen combustión, debido al incremento de temperatura del medio ambiente.
Biodiesel	Combustible obtenido a partir de aceites vegetales que funciona en cualquier motor diesel.
Calor de combustión	Es la cantidad de energía calorífica que puede ser obtenida de la reacción de combustión de una sustancia.
Cenizas	Está relacionado con la cantidad de materiales no combustibles que pueden estar presentes en un combustible o el porcentaje de materia que se mantiene inerte en la reacción de combustión.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
Combustible	Sustancia que reacciona químicamente en presencia de oxígeno, produce calor, CO ₂ , agua y otros componentes.

Combustible alterno	Aprovechamiento de un combustible en lugar de uno principal.
Corrosión en la lámina de cobre	Es el análisis que se hace para determinar si el producto produce corrosión en las partes metálicas de cobre bajo ciertas condiciones de temperatura.
Densidad	Es la relación de masa a volumen.
Diesel 2D	Fracción del petróleo que destila de 175 a 350 °C y se utiliza comercialmente como combustible en los vehículos de combustión por compresión o motores diesel.
Etanol absoluto	Etanol puro (100%) que puede obtenerse al eliminar el agua de la mezcla azetrópica de 95.6%.
Etanol desnaturalizado	Etanol al cual se le agrega algún (os) agente (s) químicos para hacerlo inapropiado para el consumo humano. La intención de este procedimiento es prevenir el robo, consumo indebido o fraude. El desnaturalizador más sencillo de obtener y comúnmente usado es la gasolina y se mezcla hasta en un 1%.
Gasolina	Mezcla de más de doscientos hidrocarburos que van desde el butano hasta compuestos del tipo metil-naftalenos, que son moléculas de 11 a 12 átomos de

carbono. Es un líquido inflamable y principalmente utilizado en automóviles.

Gravedad API Es la densidad de los productos derivados del petróleo.

Índice de cetano Es el cálculo de un número que indica la calidad de ignición del producto.

Método de Mike Pelly Mike Pelly publicó un método para la elaboración de biodiesel a partir de aceite vegetal usado y metanol.

Método de Charles Peterson Método para elaborar biodiesel a partir de cualquier aceite vegetal y etanol utilizando KOH como catalizador.

Parafinas Alcanos y cicloalcanos con cinco miembros o anillos mayores característicamente inertes.

Petrodiesel Fracción del destilado del petróleo utilizado como combustible en los motores diesel.

Presión de vapor Presión ejercida por las moléculas en la superficie en su intento por escapar a la atmósfera. Entre mayor la volatilidad de un líquido, mayor su presión de vapor a una temperatura específica. Por lo tanto para una temperatura dada, la presión de vapor es una medida de su volatilidad.

Punto de Inflamabilidad	Es la temperatura a la cual el producto forma mezclas inflamables bajo ciertas condiciones de aire controladas en el laboratorio.
Transesterificación	Es cuando un éster reacciona con alcoholes en condiciones ácidas o básicas para producir nuevos ésteres.
Viscosidad	Esta relacionada con el peso molecular y la capacidad de fluir de una sustancia bajo ciertas condiciones.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objeto caracterizar las propiedades fisicoquímicas del biodiesel obtenido a partir de aceite de palma (oleína) y etanol absoluto, para comparar los resultados con las especificaciones establecidas en el Acuerdo Gubernativo 207-2001 para el combustible diesel 2D, y así determinar si éste puede ser utilizado como combustible alternativo.

Se obtuvo primeramente el biodiesel mediante el procedimiento de Charles Peterson modificado (11) y se prepararon mezclas de biodiesel – diesel 2D al 20, 35 y 50% como alternativas de uso.

Para el biodiesel, el diesel 2D y para todas sus mezclas se evaluó las siguientes propiedades: índice de cetano, ASTM D-976; punto de inflamación, ASTM D-93; viscosidad cinemática, ASTM D-445; destilación, ASTM D-86; poder calorífico, ASTM D-240; densidad API, ASTM D-287; corrosión en la lámina de cobre, ASTM D-130; contenido de azufre, ASTM D-129, agua y sedimento, ASTM D-1796 y contenido de cenizas, ASTM D-482.

Se analizó estadísticamente el procedimiento empleado para la obtención del biodiesel, realizándolo tres veces concluyendo que éste es consistente y que las propiedades del biodiesel son independientes del lote del que se obtiene.

Cada propiedad se evaluó gráficamente, pudiéndose establecer finalmente que el biodiesel obtenido se puede utilizar como combustible alternativo del diesel 2D y que para una mejora en las propiedades de viscosidad y poder calorífico se pueden utilizar mezclas biodiesel-diesel 2D.

OBJETIVOS

General

Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del biodiesel obtenido a partir del aceite de palma y etanol para establecer si éste cumple con los parámetros de calidad permisibles y pueda ser usado como sustituto del diesel 2D.

Específico

1. Obtener biodiesel por el método de Charles Peterson a partir de aceite de palma (oleina) y etanol.
2. Evaluar las propiedades de mezclas biodiesel-diesel 2D en proporciones de 20, 35 y 50% de biodiesel.

HIPÓTESIS

General

El biodiesel obtenido a partir del aceite de palma y etanol cumple con las especificaciones mínimas de calidad, según regulaciones nacionales.

Experimental

Ho: El biodiesel obtenido, según sus propiedades fisicoquímicas, puede ser utilizado como combustible alternativo al diesel 2D.

Hi: El biodiesel obtenido, según sus propiedades fisicoquímicas, no puede ser utilizado como combustible alternativo al diesel 2D.

INTRODUCCIÓN

El diesel 2D es una de las fracciones en el proceso de refinación del petróleo con mayor demanda, debido al amplio uso que se le da en motores de combustión interna.

La utilización de combustibles vegetales, en motores diesel, es casi tan antigua como el mismo motor. Se han hecho numerosos trabajos experimentales sobre el uso de combustibles vegetales los cuales incluyen el empleo directo del aceite vegetal o mezclando éste con queroseno. Estos métodos tienen serias desventajas comparados con el uso del diesel 2D.

En años recientes se ha encontrado que un sustituto más ventajoso es el biodiesel, el cual se trata de esteres metílicos o etílicos obtenidos a partir de la reacción de aceites vegetales o grasas animales con alcohol metílico o etílico.

En países con alto enfoque a las energías renovables (como Estados Unidos y Francia), ya existe una producción continua de Biodiesel obtenido a partir de las materias primas que más les conviene, como aceite de soja o de girasol.

En Guatemala en el Ministerio de Energía y Minas se está implementando el fomento al desarrollo de los recursos renovables, por lo cual se considera necesario el estudio del Biodiesel como combustible alternativo al diesel 2D. Este nuevo combustible, puede obtenerse de distintas materias primas, por lo que en Guatemala es conveniente utilizar el aceite de palma y el etanol, por su alta producción en el país.

1. ANTECEDENTES

El inventor del motor diesel, Roudolf Diesel, utilizó en el año 1900 aceite de maní como combustible para una demostración de adaptabilidad del motor. Se han hecho numerosos trabajos experimentales sobre el uso de combustibles vegetales entre los años 1930- 1940. La crisis del petróleo en los fines de la década del 70 y principios del 80, reflató la idea de los biocombustibles. Estos combustibles han pasado de ser experimentales, y ya forman parte de la canasta de combustibles habituales.

Varios aceites han sido probados para obtener biodiesel. Generalmente estos aceites han sido aquellos que abundan en el país de la investigación. En Estados Unidos, el aceite de soja es el que ocupa el primer lugar en su utilización, en Europa lo es el de colza, mientras que en países de clima tropical, se está investigando el aceite de coco y el de palma. Se ha llegado a probar grasas animales y aceites de cocina usados pero no todos han tenido resultados satisfactorios, aparecieron problemas de incrustaciones y depósitos de sólidos en los conductos, problemas de temperatura y de combustión, entre otros.

El uso del biodiesel ha crecido dramáticamente durante los últimos años. En Estados Unidos el acto de política energética fue enmendado en 1,998 para incluir el uso de combustibles alternativos como el biodiesel. Esta enmienda comenzó el claro aumento en los usuarios del biodiesel que incluyen el servicio postal de Estados Unidos y los ministerios de Energía y Minas de este país, siendo este combustible alternativo el único que responde a las directivas EPA de *Clean Air Act*.

También en Europa ya existe producción del mismo, por lo cual la especificación del producto fue acordada, emitida y aprobada por todos los gobiernos de la comunidad económica europea. Los principales países productores son: Francia, Alemania, Italia, Bélgica y Austria. Hoy en día, este combustible no es una alternativa experimental, es una realidad en el mercado europeo.

Guatemala es a la fecha un país importador de derivados del petróleo. Importa alrededor de 60 mil barriles diarios de éstos productos, siendo el diesel el principal de ellos (tabla 12 y 14 del anexo) y consume específicamente cerca de 7 millones de barriles anuales de diesel (tabla 13 del anexo), por lo que se debe dar prioridad a la producción nacional de sustitutos del diesel, que además de generar autonomía energética, lo cual es beneficioso para la economía guatemalteca, favorece el ambiente.

El biodiesel obtenido a partir del aceite de palma y etanol es una alternativa idónea ya que de los datos de importaciones y exportaciones (tabla 11 del anexo), se observa una elevada productividad.

Se tiene entonces que por ser Guatemala un país con gran potencialidad agrícola, se crea de este modo una nueva actividad agroindustrial que expande la producción aceitera que origina nuevas fuentes de trabajo y favorece definitivamente al ambiente, ya que es un combustible biodegradable (cerca de 30 días), cuyas emisiones tienen una toxicidad significativamente menor al diesel 2D, debido a que reduce substancialmente las emisiones de hidrocarburos incombustos, monóxido de carbono, sulfatos, hidrocarburos aromáticos policíclicos nitrados y de materia de partículas.

Además, de tener estas ventajas económicas y ambientales respecto al petrodiesel, el empleo del biodiesel aumenta la vida de los motores debido a que posee un mayor poder lubricante, mientras el consumo de combustible además de la auto ignición, la potencia y el torque del motor, permanecen inalterados.

Por todo lo anterior, este trabajo pretende contribuir a que en Guatemala se implemente el uso del biodiesel a partir de las materias primas antes mencionadas, ya que se debe tener un punto de partida por medio del cual se pueda llegar a la producción industrial de este combustible.

Es necesario hacer mención que el tipo de biodiesel obtenido depende de la materia prima utilizada, variando ésta para cada país según su conveniencia. En Guatemala, las materias primas más convenientes son el aceite de palma y el etanol, no existiendo ningún estudio del Biodiesel a partir de éstas. Se encontró una tesis realizada en el Centro Universitario del Sur en la cual se estudia el porcentaje óptimo de metanol para obtener biodiesel a partir de aceite de palma crudo.

Es necesario hacer mención que las materias primas a utilizar se escogieron por su conveniencia de manejo operacional, así como por su conveniencia económica ya que el aceite de palma y el etanol son las opciones más abundantes en el mercado nacional.

2. COMBUSTIBLE

Sustancia que reacciona químicamente con otra sustancia para producir calor, o que produce calor por procesos nucleares. El término combustible se limita, por lo general, a aquellas sustancias que arden fácilmente en aire u oxígeno emitiendo grandes cantidades de calor. Los combustibles se utilizan para calentar y producir vapor con el fin de obtener calor y energía, para entregar energía a los motores de combustión interna y como fuente directa de energía en aviones y cohetes a propulsión.

Las reacciones químicas de la combustión suponen la combinación del oxígeno con el carbono, hidrógeno o azufre presentes en los combustibles. Los productos finales son dióxido de carbono, agua y dióxido de azufre. Las demás sustancias presentes en los combustibles no contribuyen a la combustión, pero salen en forma de vapor o permanecen después de la combustión en forma de ceniza. La eficacia de los combustibles o capacidad calorífica, se mide generalmente en términos de la energía térmica desarrollada cuando una cantidad dada de combustible se quema bajo condiciones estándar o patrón.

La capacidad calorífica de los combustibles sólidos y líquidos se miden en julios por kilogramo o metro cúbico. A veces se hace una distinción entre capacidad calorífica superior, que es el calor total desarrollado durante la combustión y capacidad calorífica inferior, que es el calor neto desarrollado, descontando el calor perdido en la evaporación del agua durante la combustión.

2.1 Combustibles sólidos

Por orden de potencial calorífico, los combustibles sólidos más comunes son: el carbón, el coque, la madera, el bagazo de caña de azúcar y la turba. La combustión de estos materiales provoca la descomposición del combustible y la formación de materias volátiles como el gas, que arden como una llama tiznosa. Los residuos de sólidos carbónicos arden dependiendo de la difusión de oxígeno en su superficie. Esta combustión precisa una temperatura elevada. Al quemar combustible en una chimenea, el aire debe ir atravesando el combustible sólido, manteniéndose la temperatura necesaria por radiación entre las partículas.

Con el objeto de lograr una combustión más rápida, al carbón se le añade aire y se le trata en un horno. La relación aire-combustible necesaria dependerá fundamentalmente del tipo de combustible empleado; así 1 Kg. De carbón común bituminoso requiere un mínimo de 11Kg. De aire para completar la combustión. En el caso del carbón activado, la temperatura de las llamas puede llegar a los 1540 C. Si se quema carbón en polvo fino (polvo de carbón) u otro hidrocarburo en circunstancias no controladas, la combustión se produce con gran rapidez, casi como una explosión. Ejemplos de estos procesos de combustión acelerada son los incendios en minas causados por el polvo de carbón.

2.2 Combustibles líquidos

Los principales combustibles líquidos derivados del petróleo, se obtienen mediante la destilación fraccionada del petróleo crudo (una mezcla de hidrocarburos y derivados de éstos que se encuentran en el intervalo del

metano hasta compuestos bituminosos pesados). Desde un cuarto y hasta la mitad de las moléculas del petróleo crudo pueden contener átomos de azufre y algunas contienen nitrógeno, oxígeno, vanadio. Níquel o arsénico. Algunas fracciones escogidas se pueden someter a la desulfurización, la hidrogenación, descomposición térmica (a un peso molecular mas bajo) y otros procesos de refinación, antes de mezclarse y venderse como combustibles.

Los fabricantes de equipo y grandes usuarios establecen con frecuencia las especificaciones de combustible para adecuarlos a equipos particulares, sus condiciones de operación y los aspectos económicos del mismo. Deberían evitarse los procedimientos de prueba no normalizados y los límites restrictivos de pruebas, ya que esto disminuye la disponibilidad del combustible e incrementa su costo.

Los combustibles derivados del petróleo contienen primordialmente parafinas, isoparafinas, productos aromáticos y naftenos; además de hidrocarburos relacionados, derivados del azufre, oxígeno y el nitrógeno que no se retiraron en la refinación.

2.3 Utilización de los combustibles

Los motores de combustión interna son máquinas que transforman la energía potencial de mezclas de combustibles y aire en energía cinética disponibles para realizar tipos concretos de trabajo. La eficiencia con que puede transformarse la energía (el consumo específico de combustible) depende en gran parte de los niveles de temperatura que intervienen en el ciclo termodinámico del motor. En la mayoría de los casos del transporte automóvil, el rendimiento en la propulsión (rendimiento de la transformación de energía

desde el cigüeñal a las rudas motrices) es independiente del tipo de motor o del ciclo energético empleado.(Ref.4)

3. CRITERIOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE UN COMBUSTIBLE

3.1 Potencia calorífica

El calor de combustión de los hidrocarburos y de casi todos los demás combustibles puede calcularse partiendo de los datos termoquímicos relativos a los calores de formación. Los hidrocarburos tienen pocos competidores en lo que respecta a la potencia calorífica por kilogramo o litro de combustible, en especial si se tiene en cuenta la facilidad para obtenerlos.

3.2 Volatilidad

Tiene mucha importancia para el rendimiento de un combustible. En general, es necesario tener en cuenta la volatilidad del combustible, el diseño del motor, la instalación del motor y accesorios, la temperatura y la presión de la atmósfera en el punto en que se usa llegando a una transacción satisfactoria entre todos estos factores.

La fluidez de los combustibles derivados del petróleo es un factor importante en su uso general. En los combustibles destilados del petróleo usados generalmente en los motores de combustión interna, se tropieza con pocas dificultades, salvo en tiempo muy frío. Para los combustibles más viscosos, como los aceites pesados diesel, se prueba la fluidez por los métodos ASTM para la viscosidad, el punto de turbiedad y derrame, las cenizas, el agua y los sedimentos. Para la gasolina de aviación se usa una prueba especial del

punto de congelación con un valor máximo de -55 C , ya que en las grandes altitudes se encuentran temperaturas próximas a este nivel y por supuesto en los aeroplanos no son tolerables las fallas en el paso de combustible. Los combustibles con una capacidad apreciable para disolver agua, pueden provocar dificultades a temperaturas bajas o consecuencia de la formación de pequeños cristales de hielo que pueden obstruir los filtros para el combustible.

3.3 Estabilidad durante el almacenamiento

Como sucede con casi todos los materiales orgánicos, el almacenamiento de la gasolina durante largo tiempo, incluso a temperatura moderada, puede conducir a una ligera oxidación y a la formación de materiales gomosos que pueden provocar dificultades en el sistema de combustible de un motor. El ensayo ASTM D381-49 sirve para determinar la goma existente y los ASTM D525-49 y D873-49 dan los procedimientos para valuar la estabilidad contra la oxidación con el fin de calcular la tendencia del cobre, valúa la estabilidad indicando la goma existente y la tendencia del cobre a catalizar la formación de gomas.

3.4 Seguridad

Puesto que los hidrocarburos volátiles entrañan peligro de incendio y algunos aditivos como el tetraetiluro de plomo son venenosos, es necesario hacer desaparecer los peligros propios del manejo y el uso de combustible almacenado en tanques con acceso al aire se volatilizará parcialmente para formar una mezcla de hidrocarburos y aire. Si la mezcla de combustibles y aire se encuentra dentro de los límites explosivos, puede producirse un incendio o

una explosión. El peligro de incendio puede evitarse manteniendo la concentración del combustible tan baja que sea inferior al límite inferior de explosividad en las mezclas pobres o superior al límite superior para las mezclas ricas.(Ref.4)

4. COMBUSTIBLE DIESEL

Los motores Diesel usan un combustible menos inflamable, comparados con los de gasolina, que se conoce como aceite combustible o combustible Diesel, donde la calidad de encendido está indicada por su número de cetano. La mayor parte de los combustibles Diesel tienen número de cetano de 40 a 50.

El combustible Diesel proviene de una fracción del destilado del petróleo crudo.

El combustible Diesel se diferencia de la gasolina en varios aspectos. Por ejemplo, el Diesel es más pesado que la gasolina, no se evapora con tanta facilidad y tiene un olor fuerte como el azufre. El combustible Diesel también se siente relativamente aceitoso y posee cierta calidad lubricante, que la gasolina no posee. Las bombas de las gasolineras surten combustible Diesel del mismo modo que la gasolina. El combustible se puede obtener en todas partes y cuesta menos por litro que la gasolina.

Las características lubricantes del combustible Diesel tienden a prolongar más la duración de los motores Diesel que los motores convencionales de gasolina. De hecho pueden funcionar hasta 500 mil kilómetros sin necesidad de una reparación mayor. Además algunas piezas. Tales como las boquillas de los inyectores de combustible y las bombas de inyección de combustible, no se desgastan tanto, porque el combustible lubrica a sus superficies metálicas.

4.1 Motor diesel

El motor Diesel nos brinda las cantidades ideales de aire y combustible a ser consumidos por el motor. Estas cantidades son determinadas por el fabricante y resultarán en un buen rendimiento con poco consumo de combustible y bajas emisiones nocivas. El aire se calienta durante la carrera de compresión. El gasóleo inyectado se inflama al entrar en contacto con el aire a elevada temperatura.

Durante la carrera de compresión, el aire aspirado por el motor Diesel de autoencendido por compresión, alcanza temperaturas tan elevadas (500-700 C), que el combustible se inflama espontáneamente. El combustible lo dosifica la bomba de inyección y es introducido a alta presión en el interior de la cámara de combustión por los inyectores. La inyección del combustible tiene lugar:

- Con un caudal exactamente dosificado de acuerdo con la carga y el régimen del motor.
- En el momento preciso según la posición del cigüeñal.
- De la forma más apropiada para el correspondiente procedimiento de combustión.

El funcionamiento del motor Diesel de cuatro tiempos es como sigue:

1^a. Carrera: Aspiración de aire, precomprimido o no. El aire es precomprimido por el turboalimentador para luego ser ingresado a la cámara de combustión con una mayor masa de aire.

2^a. Carrera: Compresión del aire. Existe una relación de compresión de 1:20 aproximadamente y 1:18 con sobrealimentador aproximadamente. La temperatura es de 500 a 750 C aproximadamente.

3ª. Carrera: Combustión (trabajo). Al entrar en contacto con el aire caliente, el combustible se inyecta en este aire comprimido, se inflama y produce la combustión.

4ª. Carrera. El combustible o gas quemado es a continuación descargado a través de la válvula de escape.

4.2 Sistema de inyección diesel

Los sistemas de inyección diesel nos brindan las cantidades ideales de combustible y de aire a ser consumidos por el motor, lo que se traducirá en un bajo consumo de combustible y pocas emisiones nocivas. Un motor diesel con pocas emisiones nocivas requiere de exceso de aire, dosificación exacta de combustible, inyección del diesel a tiempo preciso y una buena compresión para lograr la temperatura de encendido ideal.

Actualmente para cumplir con las exigencias de una regulación sensible y precisa, bajas tolerancias y buena exactitud incluso a largo plazo, se ha desarrollado la regulación electrónica que ha venido a sustituir a la mecánica y cumple con todas estas exigencias.

Posibilita la medición eléctrica, el proceso electrónico de datos flexible y los circuitos reguladores con actuadores eléctricos, ofreciendo por ello unas funciones de regulación nuevas y mejoradas en comparación con los reguladores mecánicos convencionales.

Tienen además influencia sobre el comportamiento del servicio y la combustión en el motor diesel:

- El caudal de inyección del combustible.
- El comienzo de la inyección.
- El caudal de retroalimentación de gases de escape.
- La presión de carga.

Para la optimización de un motor diesel, estas magnitudes deben ajustarse a cada estado de servicio.

Los componentes principales son:

- Censores (detector de movimiento de aguja, sondas térmicas, transductor de velocidad de presión atmosférica, etc.)
- Unidad de control (microprocesador)
- Elementos actuadores (bomba de inyección, convertidor con válvula de retroalimentación de gases de escape, unidad de control de incandescencia).

4.3 Encendido del combustible

La economía del motor Diesel resulta de dos factores: primero tiene una relación de compresión más alta (20:1), que produce mayor presión sobre el pistón, que el motor gasolina. Segunda, el combustible tiene mayor cantidad de calor por cada litro que la gasolina. En la operación del motor diesel, la principal propiedad requerida del combustible es la calidad de encendido, que afecta el arranque en frío del motor, la aspereza de la combustión, la formación de depósitos y el humo de escape.

La calidad de encendido del combustible diesel afecta la longitud del período de retraso de encendido, el cual se inicia en el instante en el que principia la inyección hasta que el combustible se inflama. Esto lleva de 1.2 a 1.8 milisegundos.

Además el período de retraso de encendido se acorta por la rápida vaporización de combustible usando un rociado muy fino del inyector de combustible, por el aumento de temperatura de la carga de aire, aumento de la presión de compresión y aumento de la turbulencia de la cámara de compresión.

4.4 Eficiencia térmica y económica del diesel

Además de las bajas emisiones de HC y CO, los motores diesel poseen una eficiencia térmica mucho mayor que los motores ordinarios a gasolina. La eficiencia térmica se mide como un porcentaje, indica que también un motor utiliza el combustible que recibe. Todos los motores de combustión interna tienen eficiencias térmicas bajas, porque el encendido del combustible produce una gran cantidad de calor junto con la potencia. El sistema de enfriamiento disipa aquel calor que no realiza trabajo útil en el motor.

La eficiencia térmica de un motor a gasolina varía el 19 al 27% aproximadamente. En otras palabras, sólo alrededor de una cuarta parte del combustible que se envía al motor se usa para producir la fuerza que sale de él. El resto se emplea para vencer la fricción interna y producir el calor que el sistema de enfriamiento debe eliminar. Los motores diesel poseen una eficiencia térmica del 40% más o menos. Es decir, casi la mitad del

combustible produce potencia y ligeramente más de la mitad produce calor y vence la fricción.

Los motores diesel son más sencillos porque no tienen carburador ni sistema de encendido. Esto significa que no necesitan platinos, ni bujías, cables o distribuidores. Sin embargo, el sistema es más complejo por su distribución de combustible y por el sistema de inyección sincronizada.

4.5 Sistema de arranque

Los motores diesel necesitan calor para encender el combustible dentro de la cámara de combustión, por tal razón no pueden arrancar en frío sin un sistema de calefacción auxiliar.

Para tal efecto, los motores diesel poseen un sistema de bujía de incandescencia que en lugar de producir un achispa, estas bujías de incandescencia cuentan con pequeños filamentos metálicos que se ponen al rojo vivo y proporcionan el calor necesario para prender el combustible en el motor frío. Las bujías de incandescencia funcionan mediante la corriente eléctrica del acumulador. Normalmente necesitan calentarse durante 5 a 30 segundos, aproximadamente antes de poder encender el combustible.

Una vez que se calienta el motor se desconectan las bujías de incandescencia. Estas bujías a diferencia de las bujías de encendido, rara vez necesitan reemplazo.

En la mayoría de motores diesel, el interruptor de encendido activa las bujías de incandescencia. Algunos motores cuentan con un interruptor

termostático que activa las bujías siempre que la temperatura del motor baja de un punto determinado.

Además algunos sistemas poseen una luz indicadora en el tablero de instrumentos que señala al conductor cuando la precámara se ha calentado lo suficiente para poner en marcha el motor.

4.6 Sistema de apertura y cierre del combustible

El funcionamiento de este sistema se basa en el principio de encendido del motor diesel, ya que el mismo no necesita de chispa eléctrica para su encendido. Por lo que el motor no se puede apagar simplemente interrumpiendo el paso de corriente eléctrica, entonces es necesario que exista un sistema para abrir y cerrar el paso de combustible. En algunos modelos antiguos este sistema era accionado por medio de un mecanismo que estaba montado sobre el tablero de instrumentos. El conductor empuja el mecanismo hacia adentro para cerrar el paso de combustible y extrae el mismo para abrir el sistema de combustible.

El conductor debía accionar hacia adentro el mecanismo antes de girar la llave, por lo que el motor deja de funcionar antes que el conductor gira la llave para cerrar el sistema.

Los modelos recientes cuentan con un mecanismo para cerrar el combustible conectado a la llave de encendido. El sistema de combustible se activa cuando el conductor gira la llave a la posición de encender y se cierra al girar la llave para apagar.(Ref.1)

5. BIODIESEL

5.1 Definición

Biodiesel es un combustible obtenido a partir de aceites vegetales que funciona en cualquier motor Diesel.

El término biodiesel no tiene definición estricta, sino que se trata de aceites vegetales, grasas animales y sus ésteres metílicos para ser utilizados como combustibles. Sin embargo a menudo se refiere cada vez más a los ésteres alquílicos de aceites vegetales o grasas animales y no a aceites o grasas solas, utilizados como combustible en los motores diesel.

Por este motivo la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) define al biodiesel como “el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores diesel”.

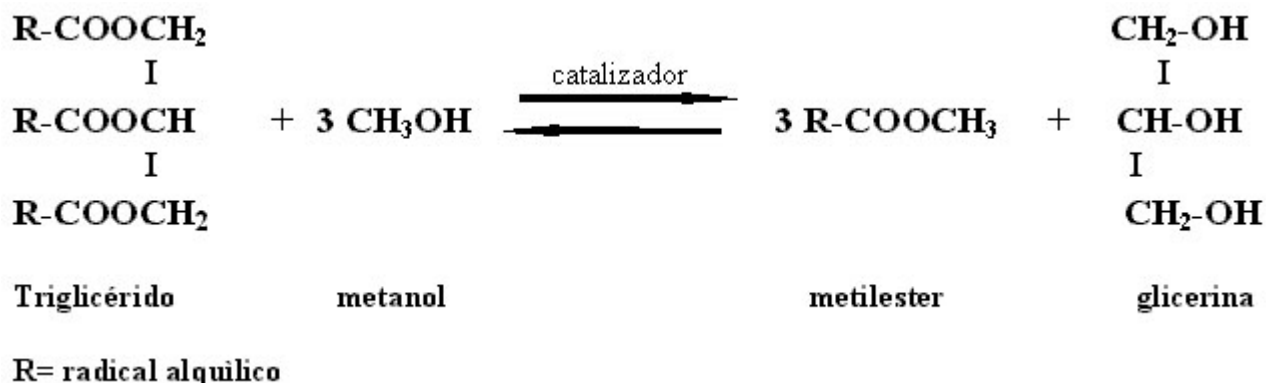
Desde el punto de vista químico el biodiesel es una mezcla de los esteres metílicos de los ácidos grasos triglicéridos de los aceites vegetales y o grasas animales empleados como materia prima.(Ref.11)

5.2 Obtención

El biodiesel (éster alkyl del ácido graso) es un combustible diesel cleaner-burning del reemplazo hecho de fuentes naturales, reanudables tales

como grasas vegetales nuevas y usadas del aceite y animales. Justo como el diesel del petróleo, biodiesel funciona en motores de la combustión ignición.

La reacción de transesterificación con metanol es la siguiente:



en la cual el producto metilester recibe la denominación de biodiesel.

Existen estudios sobre la elaboración casera del biodiesel a partir de la grasa usada de la cocina o del aceite vegetal inútil como el método de Mike Pelly o el de Aleks Kac, pero regularmente no se tienen resultados satisfactorios al ser probados ya que el biodiesel así obtenido presenta problemas de incrustaciones y depósitos de sólidos en los conductos, problemas de temperatura y de combustión.

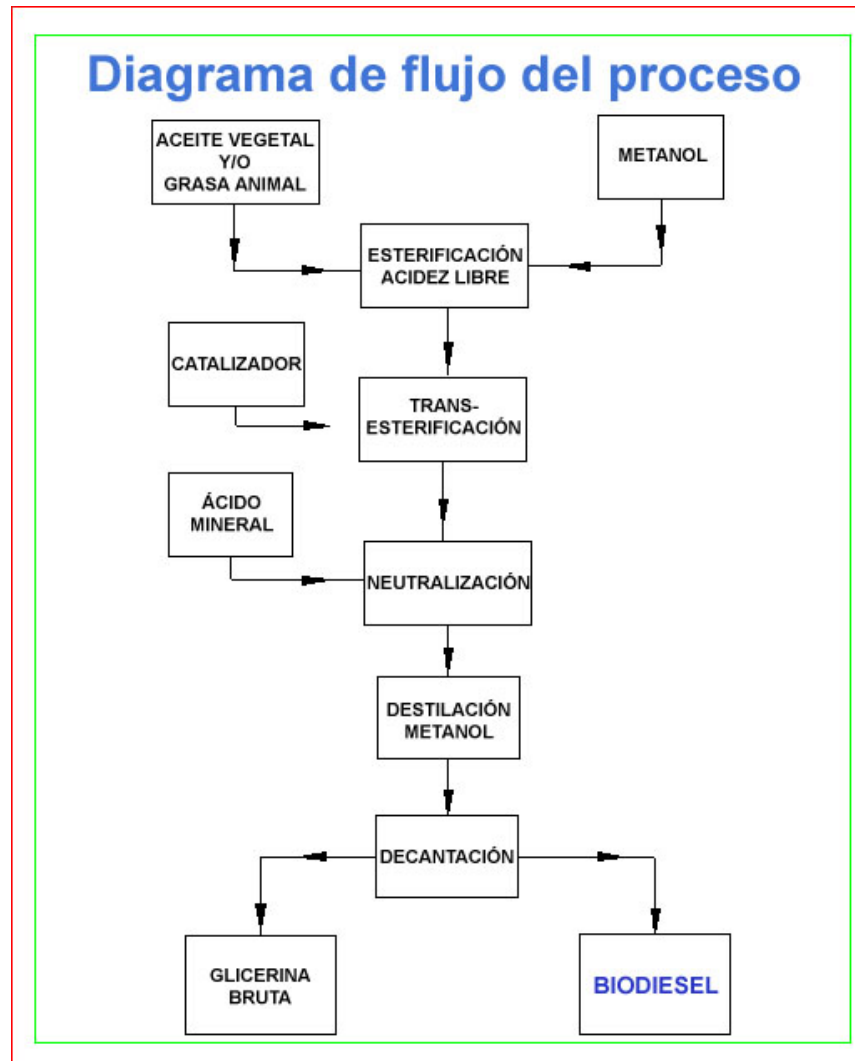
En la reacción anterior se utiliza metanol como reactivo pudiéndose sustituir éste con etanol, del cual se obtiene entonces etilester al cual se le denomina también biodiesel.(Ref. 9)

5.3 Producción

Generalmente el biodiesel se produce mediante la transesterificación de grasas y aceites con alcohol metílico en ambiente básico. Los catalizadores a emplear pueden ser soda cáustica o metiliato sódico, ambos en solución metanólica.

Esta es una vía empleada para producirlo. El procedimiento que se detalla a continuación describe su producción mediante el proceso continuo. Este proceso se caracteriza por cuanto el equipamiento de la planta es de fácil obtención y/o construcción en muchos países con capacidad de producir calderería, sin necesidad de tener que recurrir a equipos costosos, que requieren además de mantenimiento especializado como centrífugas, y los materiales para su construcción poseen reducidos costos relativos. El proceso batch es conveniente para producciones pequeñas de no más de diez mil toneladas al año. El diagrama de flujo del proceso de producción del biodiesel se puede observar en la figura que se encuentra a continuación:

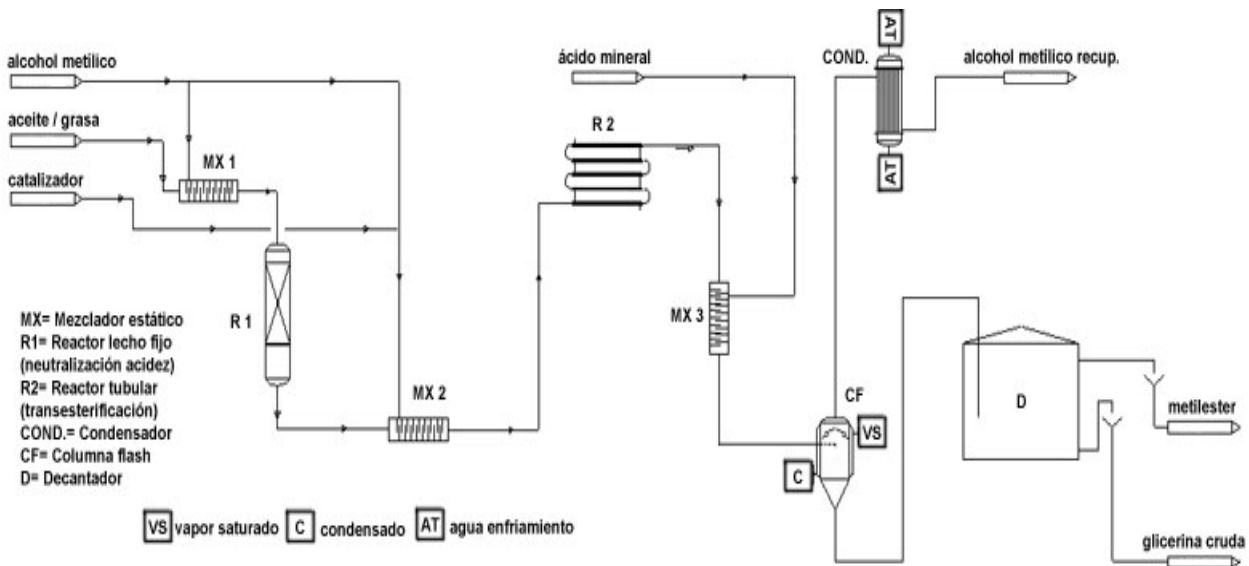
Figura 1. Proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal o grasa animal y metanol.



Este proceso prevé el empleo de aceites o grasas que contienen acidez libre, y en su primera fase los ácidos grasos libres se transforman en más metilester. Esta es una ulterior ventaja ya que no es necesario procesar previamente grasas y o aceites para eliminar tales impurezas obteniéndose además un rendimiento superior respecto de los triglicéridos de partida.

El esquema simplificado de una planta continua para producir el biodiesel se puede observar en el diagrama siguiente:

Figura 2. Producción de biodiesel en una planta continua



En el mezclador estático MX 1 se mezclan el alcohol metílico y el aceite que contiene ácidos grasos libres. Este producto se hace pasar luego a través del reactor (R 1) que funciona con catalizador en lecho fijo donde se produce la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres. La corriente proveniente de esta unidad se mezcla en la unidad estática MX 2 con el metanol necesario para la transesterificación, más un pequeño exceso del mismo, y el catalizador. Esta corriente ingresa en el reactor tubular R 2 en el cual se produce la

transesterificación de los triglicéridos. El producto de la reacción, compuesto por el metilester, la glicerina, el metanol en exceso y el catalizador, debe ser neutralizado. Para ello se mezcla en la unidad estática MX 3, con un ácido mineral en la cantidad necesaria. Posteriormente en la unidad de destilación flash FC se despoja al producto de los volátiles, compuestos fundamentalmente por el alcohol metílico en exceso. Los vapores de metanol se condensan y se envían al tanque de almacenamiento, del cual será nuevamente introducido en el ciclo. El producto de fondo del evaporador flash FC, que contiene el metilester, la glicerina, sales y agua se envía al decantador continuo D, en el cual se separa el metilester del resto de los productos. La fase ligera (biodiesel) se envía al tanque de almacenaje, mientras la fase pesada (glicerina bruta) que contiene glicerina (aprox. 90%), agua y sales se envían asimismo al almacenaje.

A continuación se indican los consumos específicos (valores aproximados), para la producción de 1 ton de biodiesel así como los subproductos de recuperación:

Tabla I. Consumo de materiales y servicios para la producción de 1 tonelada de biodiesel a partir de metanol

ITEM	CONSUMO
MATERIAS PRIMAS Y MATERIALES	
Aceite vegetal refinado	1030 Kg.
Metanol	102 Kg.
Catalizador (metilato de sodio)	6,2 Kg.
Acido mineral	6 kg

Glicerina bruta	112 Kg. (titulo: 85% min)
SERVICIOS	
Agua enfriamiento	20 m ³
Vapor de agua(a 4 bar)	350 Kg.
Energia electrica	50 Kwh.
Nitrogeno	3,2 N m ³
Aire instrumentos	4,8 N m ³

Es importante señalar que en el proceso de obtención de biodiesel la glicerina producida una vez refinada puede ser empleada en distintos campos como: industria química (plásticos, pinturas, conservantes), cosmética, farmacéutica, explosivos, etc. (Ref.8)

5.4 Biodiesel contra petrodiesel

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

Entre otras ventajas respecto del diesel 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 (SO_2) : 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 (CO_2) : 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. (Ref. 6)

6. ACEITE DE PALMA

6.1 Descripción general

El aceite de palma es extraído del mesocarpio de la fruta de la palma africana de la especie *Elaeis Guineensis*. En Malasia y en los países con climas tropicales como Guatemala, se ha desarrollado el cultivo de palma africana enormemente. El aceite de palma ocupa el segundo lugar en la lista de aceites vegetales en la producción mundial y el primero en las exportaciones.

Sus características físicas y propiedades químicas lo hacen ser un aceite con altos usos en la industria alimenticia, siendo el 90% de la producción de aceite de palma usada en la preparación o manufactura de productos alimenticios. El otro 10% remanente es usado en la manufactura de jabones y productos oleoquímicos.

6.2 Uso agroindustrial

El área sembrada actualmente con palma africana es aproximadamente 15,000 hectáreas, principalmente en la costa sur, en los municipios de la Gomera y Tiquisate del departamento de Escuintla. Esta actividad emplea permanentemente más o menos a 6,500 personas. El cultivo inicia su producción entre los tres y cinco años y puede explotarse por veinte o veinticinco años más. Produce dos tipos de aceite: de pulpa (llamado de palma) y de almendra (llamado de palmiste). El primero posee dos fracciones: líquida (oleína) usado en la elaboración de aceites comestibles y sólida (estearina)

utilizado en la elaboración de mantecas; el aceite palmiste es usado en la elaboración de jabón. Actualmente existen siete plantas distribuidas en Tecún Umán, Tiquisate, Gomera, Retalhuleu, Cobán y Mazatenango. La producción de aceite a nivel nacional es de 336,600 quintales. El costo total aproximado por hectárea para una producción de ochenta quintales es de Q6,000. Este es el material oleaginoso de mayor producción en el país.

La palma africana o palma de aceite es importante por la gran variedad de productos que genera, tanto para la alimentación como para la industria. El aceite de pulpa y de almendra se emplean para producir margarina, manteca, aceite de mesa, aceite de cocina y jabones. El aceite de pulpa se usa en la fabricación de acero inoxidable, concentrados minerales. Aditivos para lubricantes, crema para zapatos, tinta de imprenta, velas, etc. Se usa también en la industrial textil y de cuero, en la laminación de acero y aluminio, en la producción de ácidos grasos y vitamina A.

Mediante procesos mecánicos y térmicos se extrae del fruto de la palma el aceite crudo (de color rojo), el cual se incorpora a otros procesos para su fraccionamiento y así obtener otros productos.

El aceite de palma es una materia prima que se utiliza ampliamente en jabones y detergentes, en la elaboración de grasas, lubricantes y secadores metálicos, destinados a la producción de pintura, barnices y tintas.

6.3 Aplicaciones

El aceite de palma y sus derivados tienen una diversidad de aplicaciones en la industria. Por ejemplo, la fracción líquida del aceite de palma, oleína de palma, es usada en la industria de frituras, debido a que tiene una mayor estabilidad a la oxidación que otros aceites. Mientras que el aceite de palma, una grasa semi-sólida, es usada como el mayor de los componentes en la fabricación de mantecas, margarinas y vanaspati.

Originalmente el término manteca fue utilizado o referido a grasa animales que contenían principalmente sebo de res, con las cuales se elaboraban productos de panificación. Con el desarrollo de la industria palmera. El uso y aplicaciones de este aceite en las mantecas a sustituido en gran parte al sebo de res y otros aceites vegetales hidrogenados.

El uso de aceite de palma se ha incrementado en varios tipos de mantecas y aplicaciones particulares, como: Mantecas para cocinar frituras y en la manufactura de productos de panificación como pasteles, galletas, cremas, pan relleno, recubrimientos y panadería en general.

Las principales razones que se han encontrado para utilizar aceite de palma en las formulaciones de mantecas se debe a su contenido de grasa sólida del 22 al 25% a 20°C. También se ha encontrado que por su alto contenido de ácido palmítico, esta grasa al ser mezclada con el azúcar da una buena aireación a las cremas para relleno e incrementa el volumen de los pasteles.

6.4 La palma y el medio ambiente

Todas las partes de la palma se utilizan, por lo tanto no hay desperdicios que contaminen. Para evitar el uso de plaguicidas químicos se ha implementado diversas técnicas de control biológico.

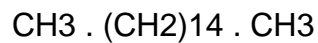
Dentro del cultivo de semillas oleaginosas, la palma de aceite es la más eficiente en la conversión de energía. Además, los cultivos de palma de aceite son bosques protectores de los ecosistemas.(Ref.3)

7. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL DIESEL

7.1 Índice de cetano

Así como el octano mide la calidad de ignición de la gasolina, el índice de cetano mide la calidad de ignición de un diesel. Es una medida de la tendencia del diesel a cascabelear en el motor.

La escala se basa en las características de ignición de dos hidrocarburos,



Cetano

(n-hexadecano) y



Heptametilnonano

El n-hexadecano tiene un periodo corto de retardo durante la ignición y se le asigna un cetano de 100; el heptametilnonano tiene un periodo largo de retardo y se le ha asignado un cetano de 15. El índice de cetano es un medio para determinar la calidad de la ignición del diesel y es equivalente al porcentaje por volumen del cetano en la mezcla con heptametilnonano, la cual se compara con la calidad de ignición del combustible prueba (ASTM D-613). La propiedad deseable de la gasolina para prevenir el cascabeleo es la habilidad para resistir la auto ignición, pero para el diesel la propiedad deseable es la auto ignición.

Típicamente los motores se diseñan para utilizar índices de cetano de entre 40 y 55, debajo de 38 se incrementa rápidamente el retardo de la ignición.

En las gasolinas, el número de octano de las parafinas disminuye a medida que se incrementa la longitud de la cadena, mientras que en el diesel, el índice de cetano se incrementa a medida que aumenta la longitud de la cadena. En general, los aromáticos y los alcoholes tiene un índice de cetano bajo. Por ello el porcentaje de gasóleos desintegrados, en el diesel, se ve limitado por su contenido de aromáticos.

Muchos otros factores también afectan el índice de cetano, así por ejemplo la adición de alrededor de un 0.5 por ciento de aditivos mejoradores de cetano incrementan el cetano en 10 unidades. Estos aditivos pueden estar

formulados con base a alquilnitratos, amil nitratos primarios, nitritos o peróxidos. La mayoría de ellos contienen nitrógeno y tienden, por lo tanto, a aumentar las emisiones de NOx.

El índice de cetano es una propiedad muy importante, sin embargo existen otras relevantes que caracterizan la calidad del combustible.

7.2 Punto de inflamabilidad

Todos los productos de petróleo queman y bajo ciertas circunstancias sus vapores se encienden con una violencia de explosión. Sin embargo para que esto ocurra, la cantidad de vapor en el aire debe estar comprendida entre ciertos límites. Cuando un producto líquido de petróleo es expuesto al aire, algunos de sus vapores causan una cierta concentración de vapor-aire. Cuando la temperatura del líquido es elevada, más y más vapores se producen aumentándose la relación vapor-aire.

Eventualmente se llega a la temperatura a la cual la mezcla vapor aire puede mantener momentáneamente una combustión si una fuente de ignición está presente. Esta temperatura es el punto de chispa del producto. Para los combustibles y los solventes, el punto de chipa es usualmente determinado por

el método de recipiente cerrado, en el cual es calentado en una cápsula cubierta. Esto hace que las condiciones de prueba sean lo más parecidas posible a los del producto en servicio. Productos que tengan punto de chipa menor a la temperatura ambiente deben ser enfriados antes de empezar la prueba. El utilizado ordinariamente para “fuels-oils”, pero también es usado para asfaltos líquidos y otros materiales viscosos y suspensiones de sólidos es el punto de chipa por medio de un probador Pensky-Martens (ASTM D-93).

Para un combustible o solvente de petróleo volátil, el punto de chipa es importante como una indicación de los peligros de fuego y explosión relacionada con su utilización. Si fuera posible para cualquier aplicación, seleccionar un producto cuyo punto de chispa este por encima de cualquier temperatura ambiente esperada, ninguna medida de seguridad sería necesaria. Sin embargo, la gasolina y otros solventes livianos los tienen más bajos que la temperatura ambiente. Cuando esto sucede una controlada ventilación y otras medidas son necesarias para prevenir la posibilidad de fuego o explosión.

Se debe recordar que el punto de chipa es la menor temperatura a la cual un producto puede mantener una combustión momentánea, si una fuente de calor está presente. De una forma, no debe ser confundida con la temperatura de auto-ignición, la cual es la temperatura donde ocurre una combustión espontánea, sin ninguna fuente externa de ignición. Los productos que tienen un punto de chispa bajo, por lo general tienen temperaturas de auto-ignición altas y viceversa. (Ref.5)

7.3 Viscosidad

La viscosidad se define como la medida de la resistencia de un fluido a fluir. Es decir, mientras más espeso o pesado sea el fluido, mayor es su viscosidad y mayor será su resistencia a fluir. (Ref. 4)

La adecuada operación de los equipos depende de la apropiada viscosidad cinemática o viscosidad (muchas veces llamada viscosidad dinámica) del líquido. Así, la exacta medida de la viscosidad es esencial para la especificación de muchos productos.

La viscosidad cinemática de muchos derivados del petróleo es importante para su uso, por ejemplo el flujo del combustible a través de las tuberías, inyección en boquillas y orificios y la determinación de la apropiada temperatura de operación de los quemadores y otros equipos de combustión. (Ref. 6)

7.4 Destilación

El método empleado cubre la destilación de gasolinas naturales, gasolina para aviación, gasolina para turbinas de aviación, naftas, queroseno, gas Oliz, aceites destilados y productos similares de petróleo, utilizando equipo manual o automatizado.

Las características de destilación de hidrocarburos a veces tienen efectos importantes en su seguridad y rendimiento, especialmente en el caso de combustibles y solventes. La volatilidad es el determinante principal de la tendencia del hidrocarburo para potencialmente producir vapores explosivos. Es también importante para gasolinas de aviación y automotriz ya que afecta el encendido, la temperatura y la tendencia del vapor en altas temperaturas de operación o en altas altitudes o ambas. La presencia en puntos altos de los componentes en este y en otros combustibles (ref.3).

7.5 Calor de combustión

Cuando un combustible de petróleo es quemado en un motor o en un horno, la cantidad de energía que puede ser obtenida teóricamente de él, es a lo que se denomina calor de combustión. Si el rendimiento de un horno o de un motor fuera de 100%, todo el calor de combustión sería convertido en energía útil. Pero debido a que el rendimiento siempre es menor, se obtienen valores menores. Las eficiencias térmicas más comunes son del 40% para motores diesel y 70 a 85% para calderas. Sin embargo el calor de combustión se mantiene como una medida del contenido disponible de energía de varios combustibles.

El calor de combustión es medido quemando una pequeña cantidad de combustible en un recipiente aislado llamado calorímetro, calculando la cantidad de calor absorbido por el agua dentro de éste. El método ASTM es utilizado para medir el calor de combustión para los "fuels oil". Modificaciones en el procedimiento de esta prueba son efectuados para combustibles más volátiles

7.6 Densidad

La densidad es una expresión que relaciona el peso y el volumen del producto. Cualquier producto se expande cuando es calentado, reduciéndose así el peso por unidad de volumen. Por esto la densidad es usualmente reportada a una temperatura normal, aunque otras temperaturas hayan sido usadas en la prueba. Existen Tablas que convierten la densidad de una temperatura a otra.

La densidad puede ser expresada en dos escalas. La gravedad específica, es definida como razón de peso de un volumen dado a 60 °F, con el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura. Sin embargo, en la industria del petróleo, la densidad API (American Petroleum Institute) es más usada. Esta es una escala arbitraria, calibrada en grados y que relaciona la gravedad específica por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad API} = 141.5 / (\text{Gravedad Específica } 60^{\circ}\text{C}) - 131.5$$

Como resultado de ésta relación, entre mayor sea la gravedad específica de un producto, menor es su densidad API. Es claro que el agua, con una gravedad específica de 1000 tiene una densidad API de 10°. La densidad es determinada por un hidrómetro que flota en el líquido, el cual indica la escala del hidrógeno. Algunas correcciones deben ser hechas de acuerdo con la temperatura de la muestra en el momento de la prueba.

La inyección de diesel en el motor, está controlada por volumen o por tiempo de la válvula de solenoide. Las variaciones en la densidad y viscosidad del combustible resultan en variaciones en la potencia del motor y, consecuentemente, en las emisiones y el consumo. Se ha encontrado, además, que la densidad influye en el tiempo de inyección de los equipos de inyección controlados mecánicamente.

7.7 Corrosión en la lámina de cobre

La soda cáustica tiene una acción corrosiva en varios metales, así el motor de cualquier vehículo que utilice diesel para su funcionamiento tiene partes que son de cobre y si esta soda cáustica no es eliminada puede provocar corrosión. El método está designado para acceder a la relativa degradación de los combustibles.(Ref.2)

7.8 Contenido de azúfre

El azufre ocurre naturalmente en el petróleo. Si éste no es eliminado durante los procesos de refinación, contaminará al combustible.

El azufre del diesel contribuye significativamente a las emisiones de partículas (PM₁₀s).

La reducción del límite de azufre en el diesel a 0.05 por ciento es una tendencia mundial. La correlación del contenido de azufre en el diesel con las emisiones de partículas y el S02 está claramente establecida.

Para poder cumplir con los requerimientos de niveles bajos de azufre, es necesario construir capacidades adicionales de desulfuración. Así como las unidades de desintegración catalítica (FCC), son primordiales para la producción de gasolina, la hidrodésintegración es fundamental para la producción de diesel. En ambos procesos la cuestión se enfoca en la selección de la materia prima alimentada.

Mejorar la calidad del combustible no resolverá el problema de la contaminación a menos que se imponga un riguroso programa de inspección y mantenimiento para los vehículos viejos con motores a diesel. Los super emisores del mundo del diesel son los motores viejos que han recibido un mantenimiento pobre.

7.9 Agua y sedimento

Si un combustible de petróleo debe ser quemado en una caldera o en un motor, la materia extraña dentro de él es indeseable. Cantidades excesivas de estas impurezas como agua o sólidos contaminantes, pueden interrumpir la operación de la unidad y algunas veces dañarla. Las dos impurezas mas comúnmente encontradas son el agua y el sedimento, existiendo varias pruebas y procedimientos para medir sus concentraciones. El agua y el sedimento

pueden ser determinados juntos por un procedimiento de centrifugación (ASTM D 96). El agua sola puede ser determinada con más precisión por destilación (ASTM D 95), mientras que el sedimento puede serlo mediante la extracción con solvente (ASTM D 473) o por filtración en caliente (ASTM 80.61 E).

7.10 Contenido de cenizas

El contenido de cenizas en los combustibles se relaciona con la cantidad de materiales incombustibles que están presentes en éste, por lo que indica la cantidad de aditivo presente o el grado de contaminación de sólidos no combustibles.

El método más simple para determinar las cenizas es el ASTM D-482, pero generalmente se usa el método ASTM D-874 o método de las cenizas sulfatadas.

8. RESULTADOS

Tabla II. Propiedades promedio por lote de biodiesel

Propiedades	Lote			Promedio Total
	1	2	3	
Indice de cetano	48.8	48.8	48.9	48.8
Punto de inflamabilidad (°F)	182	183	183	183
Viscosidad (mm ² /s)	5.25	5.22	5.23	5.23
destilación (°F)	151	648.8	652.4	650.7
Poder calorífico (BTU/lb)	17,232	17,190	17,246	17223
Densidad API	30.5	30.6	30.6	30.6
Corrosión al cobre	1	1	1	1
Azufre (%)	0.03	0.02	0.02	0.02
Agua y sedimento (%)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Cenizas (%)	0	0	0	0

Tabla III. Propiedades de las mezclas biodiesel - diesel 2D

Propiedades	Proporción biodiesel - diesel 2D				
	0% (diesel 2D puro)	20%	35%	50%	100% (Biodiesel puro)
Indice de cetano	50.7	50.1	50.6	50.5	48.8
Punto de inflamabilidad (°F)	157	168	172	177	183
Viscosidad (mm ² /s)	3.30	3.69	3.94	4.22	5.23
destilación (°F)	633.8	641.0	644.7	650.0	650.7
Poder calorífico (BTU/lb)	19,020	18,950	18,720	18,472	17223
Densidad API	34.0	33.2	32.8	32.2	30.6
Corrosión al cobre	1	1	1	1	1
Azufre (%)	0.1	0.09	0.1	0.07	0.02
Agua y sedimento (%)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	<0.05
Cenizas (%)	0	0	0	0	0

Tabla IV. Análisis Estadístico de las propiedades en los lotes de biodiesel

Propiedades	CMd	Cme	F _{2,6}	FC _{2,6}	F>Fc	Varianza mayor 5%
Indice de cetano	0.0735	0.0525	0.0525	5.143	No	No
Punto de inflamabilidad (°F)	2.675	0.375	0.140	5.143	No	No
Viscosidad (mm ² /s)	0.0023	0.00225	0.96	5.143	No	No
Destilación (°F)	28.65	10.18	0.36	5.143	No	No
Poder calorífico (BTU/lb)	84,070	2,502.24	0.03	5.143	No	No
Densidad API	0.023	0.0375	1.63	5.143	No	No

Donde:

CMd: cuadrado de medias dentro de las muestras con 6 grados de libertad

Cme: cuadrado de medias entre la muestra con 2 grados de libertad

F_{2,6}: valor calculado de la función F de cola, con 2 y 6 grados de libertad respectivamente

FC_{2,6}: valor crítico de la función, con 2 y 6 grados de libertad respectivamente

Figura 3. Índice de Cetano vs. Porcentaje de Biodiesel

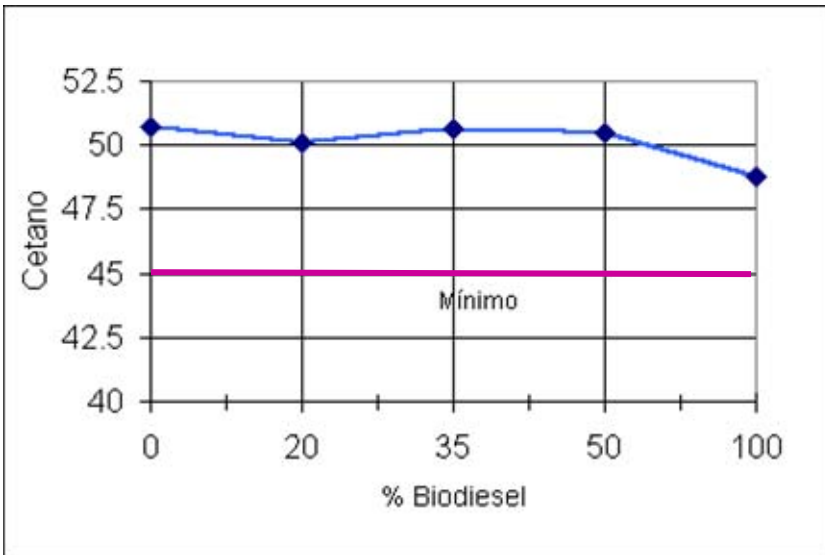


Figura 4. Punto de Inflamabilidad vs. Porcentaje de Biodiesel

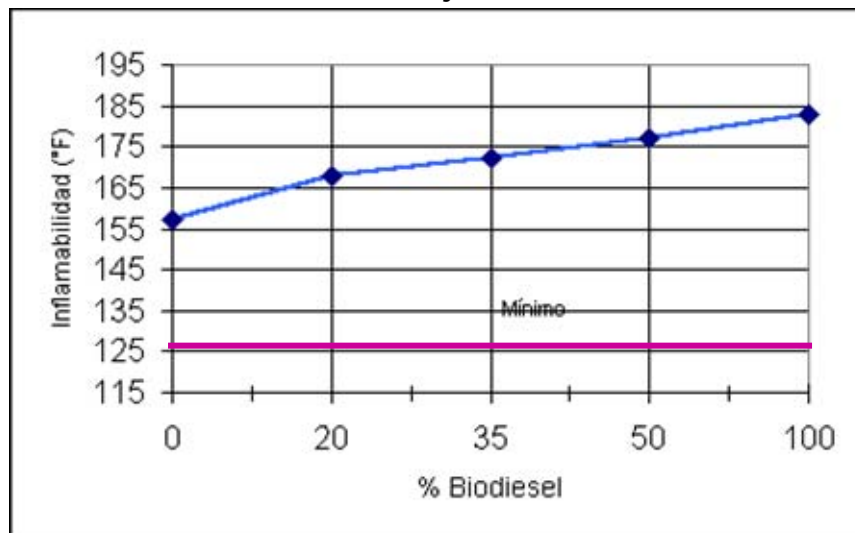


Figura 5. Viscosidad vs. Porcentaje de Biodiesel

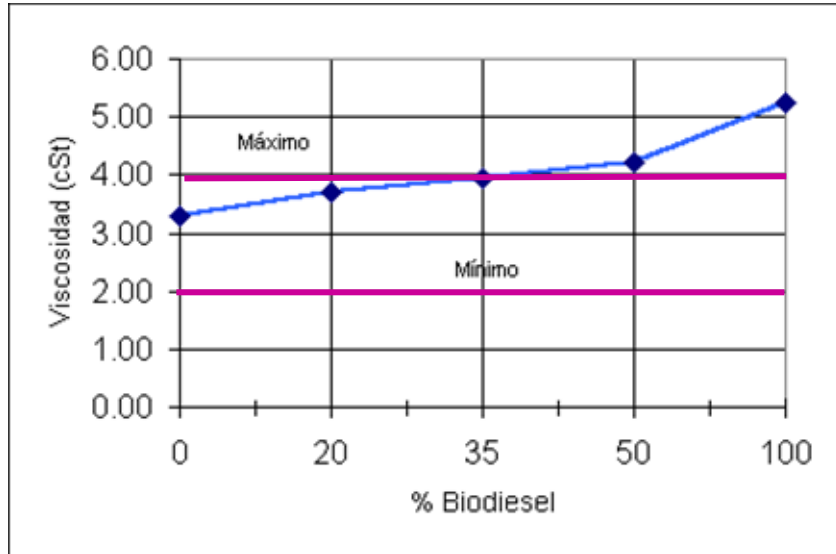


Figura 6. Destilación vs. Porcentaje de Biodiesel

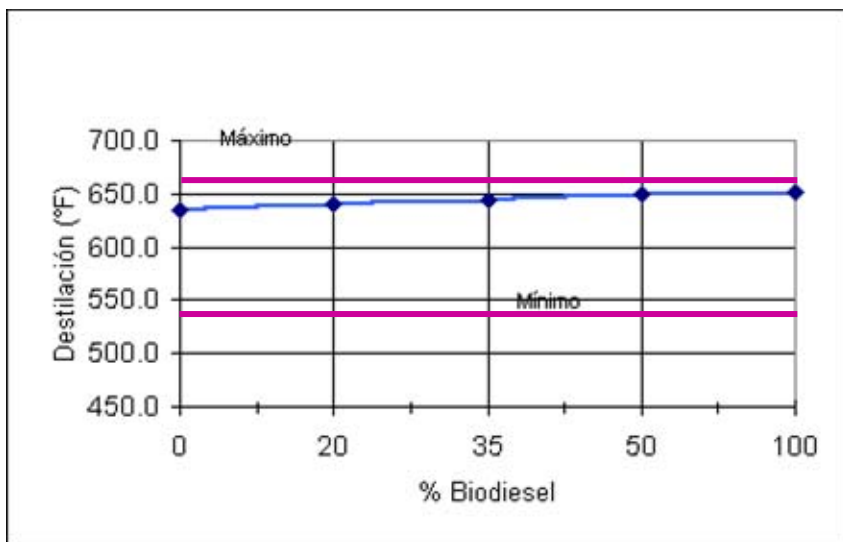


Figura 7. Poder calorífico vs. Porcentaje de Biodiesel

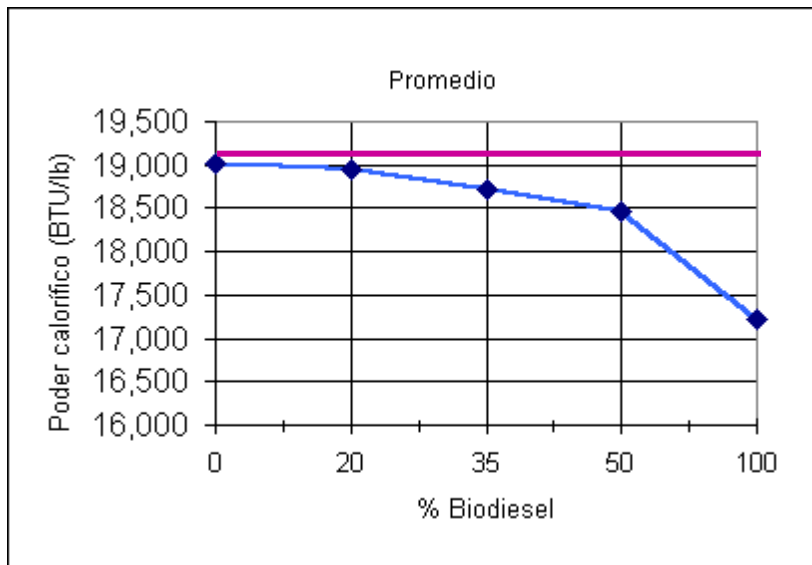


Figura 8. API vs. Porcentaje de Biodiesel

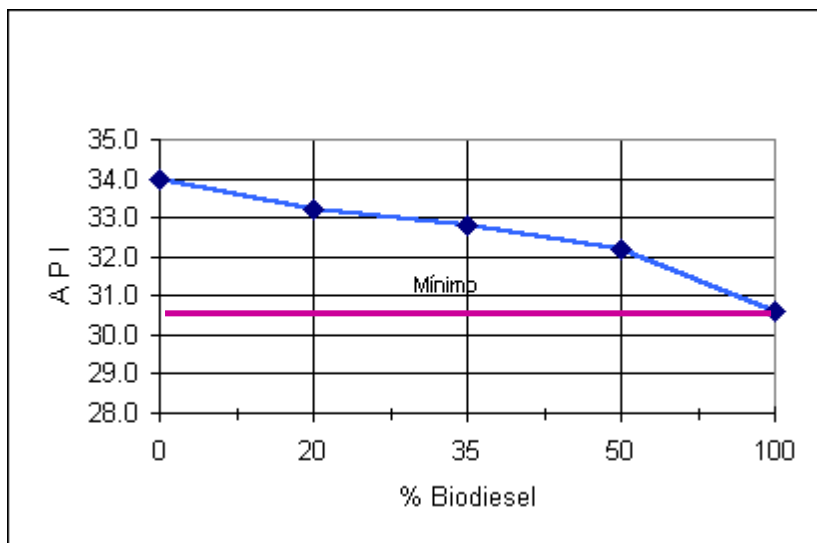


Figura 9. Corrosión al cobre vs. Porcentaje de Biodiesel

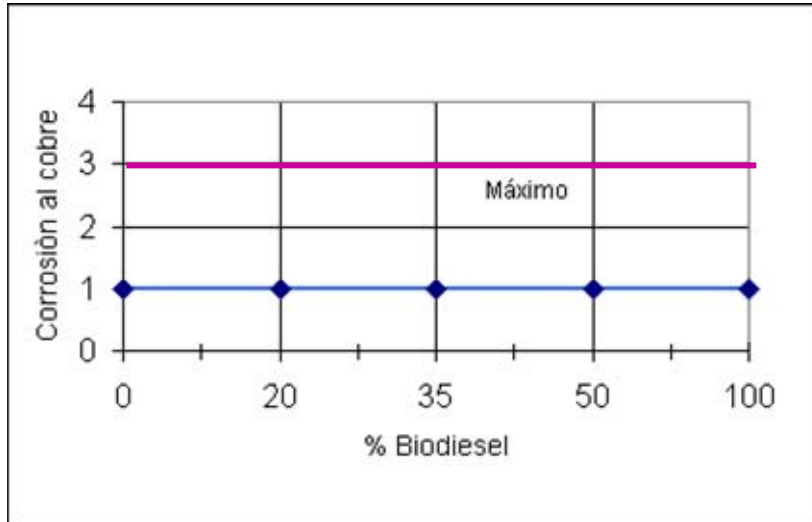
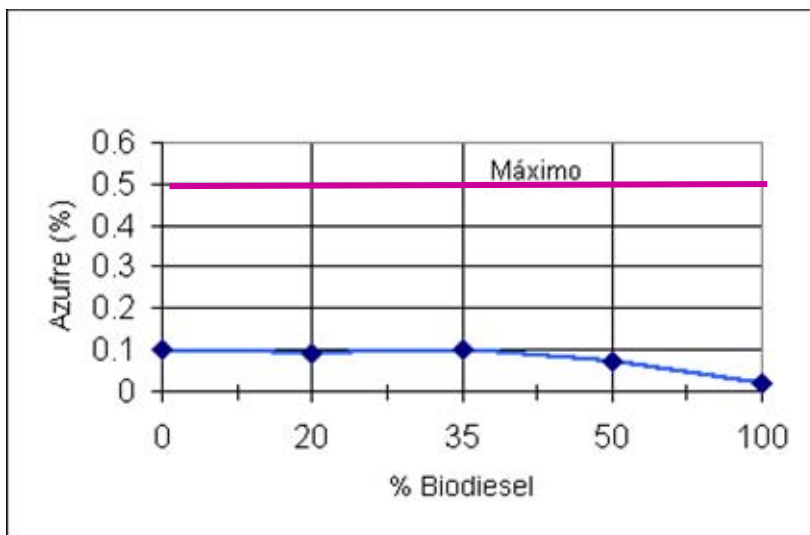


Figura 10. Azufre vs. Porcentaje de Biodiesel



9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El procedimiento empleado en la obtención del biodiesel, descrito en el apéndice, se realizó tres veces y se tomó muestras para el posterior análisis de cada lote (tablas 8,9 y 10 del apéndice)

Para determinar si existe consistencia en el método, específicamente, si hay dependencia significativa entre las propiedades promedio que se muestran en la tabla 2 y el lote del que fue obtenido el biodiesel, se realizó un análisis de varianza ANOVA (ref. 6) de las propiedades que presentan variación.

Como se observa en la tabla 4, para cada propiedad se calculó el cuadrado de media dentro y entre las muestras para obtener la relación entre ambos que se representa como F. El valor numérico de esta relación tiene que ser menor al F crítico (5.143), para poder concluir que no existe diferencia significativa entre las varianzas, siendo este el caso para los valores de F de todas las propiedades calculadas.

Con este análisis se llegó a establecer, con una significancia del 5%, que las diferencias dentro de cada propiedad son debidas únicamente a errores aleatorios de medida y no dependen del lote empleado, por lo que se puede considerar que todas las muestras utilizadas en las medidas de las propiedades fueron obtenidas de un mismo lote. Por ello se tiene que para una mejor evaluación se calculó un promedio total por propiedad que muestra en la Tabla 2.

Debido a que las mezclas de biodiesel con diesel comercial 2D constituyen una alternativa de uso, fueron calculadas también las propiedades fisicoquímicas con proporciones de 20, 35 y 50% así como también del diesel 2D puro el cual fue proporcionado en el laboratorio del Ministerio. Estas propiedades se muestran en la tabla 3.

Para una mejor interpretación de los resultados mostrados en las anteriores tablas fue graficada cada propiedad en función del porcentaje de biodiesel, teniéndose que un 0% corresponde a diesel 2D puro y un 100% a biodiesel puro.

Las propiedades del biodiesel y sus mezclas son comparadas con los parámetros establecidos para el diesel conforme el Acuerdo Gubernativo 207-2001 que se muestra en la tabla 15 del Anexo.

El índice de cetano que es una propiedad de suma importancia en motores diesel, por ser una medida de la capacidad de ignición del combustible, tiene un valor numérico mayor cuando se tiene una mejor ignición, teniendo un mínimo permitido según el anterior Acuerdo.

En la figura 3 se presenta el comportamiento de este índice, mostrando que tanto el biodiesel puro (100%) como sus mezclas tiene un índice por encima del valor mínimo permitido y muestra un valor numérico similar al del diesel 2D utilizado. De esto se tiene que el biodiesel según esta evaluación no presentará mayor cascabeleo en el motor por su buena capacidad de ignición.

De esta misma figura se tiene que esta propiedad no es linealmente proporcional a la masa de biodiesel utilizado en base a los extremos de 48.8 para el biodiesel puro y de 50.7 para el diesel puro.

El punto de inflamabilidad de los combustibles, que se relaciona con la seguridad en el almacenamiento y manipulación de éstos, se muestra en la figura 4. En esta se puede observar que esta propiedad es directamente proporcional al porcentaje de biodiesel y que todas las mezclas se encuentran dentro de los límites permisibles, teniéndose que el biodiesel puro tiene un menor riesgo de inflamabilidad que el diesel comercial.

La viscosidad nos indica la capacidad que tiene el combustible a fluir dentro del motor así como su tendencia a ser inyectado. Esta propiedad posee límites máximo y mínimo permitido por el Acuerdo Gubernativo. De acuerdo con la figura 5, hay una tendencia directamente proporcional al porcentaje de biodiesel, teniéndose que para el biodiesel puro, la viscosidad está por encima de estos límites. Esto es debido al origen oleínico del biodiesel, que es un éster de cadena larga (ver figura 11 del apéndice). Una alternativa para mejorar esta propiedad es, como se observa en la misma figura, su mezcla con diesel 2D. Para este caso particular, en donde se usó un diesel con una viscosidad de 3.3, se tiene que para una mezcla de 35% la viscosidad está dentro de los límites permitidos. La proporción de biodiesel en mezcla puede ser mayor si se utiliza un diesel de menor viscosidad, compensándose a su vez el retiro de sulfuro del combustible fósil (el sulfuro lubrica elementos del motor diesel). (Ref. 10)

La destilación tiene efectos importantes en la seguridad y rendimiento de un combustible ya que es una medida de la volatilidad para potencialmente producir vapores explosivos, así como también un mejor rendimiento, por lo cual las especificaciones tienen límites máximo y mínimo. En la figura 6 se muestra que tanto el biodiesel puro como sus mezclas se encuentran dentro de estos límites.

Durante la corrida de la prueba anterior se observó que el biodiesel tiene temperaturas de destilación más altas y estables que el diesel 2D. Esto es debido a que el biodiesel es una mezcla de ésteres de volatilidades relativamente cercanas (tabla 16 del anexo), respecto a la diversidad de compuestos que constituyen el diesel.

Aunque el poder calorífico no está regulado en las especificaciones para el diesel 2D, es importante tener un estimado de esta propiedad, debido a que indica la cantidad de energía que teóricamente puede obtenerse de un combustible. En la figura 7 se tiene que el biodiesel obtenido tiene un poder calorífico menor al del diesel 2D utilizado, que a su vez presenta un menor valor al promedio de esta propiedad.

Según el uso que vaya a tener el combustible (potencia del motor), se puede mejorar esta propiedad, como se observa en la misma figura, utilizando mezclas biodiesel-diesel 2D.

La densidad API relaciona el peso con el volumen de un hidrocarburo. En el caso específico del combustible diesel, se tiene que variaciones en esta propiedad tienen influencia en la potencia e inyección del motor. Debido a esto es muy común su medida aunque, al igual que el poder calorífico, no está actualmente dentro de las especificaciones gubernativas. Regulaciones anteriores como el Acuerdo Ministerial No. 180-185 especifican un API de 30.5 como valor mínimo. El biodiesel obtenido y sus mezclas tienen un API superior a este valor como se observa en la figura 8.

Cualquier vehículo que utiliza diesel para su funcionamiento tiene partes que son de cobre, por lo que la prueba de corrosión a este material, es de suma importancia, ya que a su vez, es un indicativo de la calidad del lavado empleado

para la eliminación de las trazas de hidróxido de sodio utilizado como catalizador en la obtención del biodiesel (ver procedimiento en apéndice). En la figura 9 se tiene que esta propiedad está dentro del límite exigido por las normas, comprobándose que el lavado es suficiente y que el biodiesel obtenido no presenta riesgo de corrosión.

El contenido de azufre está regulado por las normas ministeriales, por las emisiones dañinas para el ambiente que este produce. Este elemento está presente en todos los crudos y sus derivados con concentraciones variables, motivo por el cual, el biodiesel, que es obtenido de fuentes vegetales, no presenta problemas en este aspecto, como se observa en la figura 10.

La materia extraña en un combustible a ser quemado en un motor es indeseable, ya que cantidades excesivas de sólidos contaminantes o agua, pueden interrumpir la operación del motor y hasta dañarlo. Por este motivo las normas gubernativas especifican un porcentaje máximo de 0.05. En la tabla 5 se tiene que el biodiesel y sus mezclas se encuentran dentro del límite especificado de agua y sedimento.

El contenido de cenizas es una medida de la cantidad de materia no combustible que está presente en el combustible. Para el diesel 2D el máximo permitido es de 0.01%. Como también se puede observar en la tabla 5, el biodiesel obtenido, así como sus mezclas no presenta problemas en este aspecto ya que no les fueron detectadas cenizas.

CONCLUSIONES

1. Según las propiedades fisicoquímicas, el biodiesel obtenido a partir de aceite de palma y etanol, es un combustible alternativo del diesel 2D.
2. Las propiedades fisicoquímicas del biodiesel obtenido cumplen con las especificaciones para el diesel 2D según el Acuerdo Gubernativos 207-2001, a excepción de la viscosidad.
3. Una mezcla de 50 % como máximo del biodiesel con el diesel 2D utilizado constituye una alternativa para tener una viscosidad acorde a las especificaciones.
4. A mayor concentración de diesel 2D en las mezclas con biodiesel se obtiene un combustible con poder calorífico y viscosidad más cercano al ideal.
5. De acuerdo al análisis de varianza de los lotes obtenidos, el procedimiento empleado para la obtención del biodiesel es consistente, con una significancia de 5%.

RECOMENDACIONES

1. En el método empleado para la obtención del biodiesel se recomienda eliminar las trazas de agua calentando durante media hora a 100°C, como un paso adicional.
2. Se recomienda medir el pH al final de cada lavado hasta que éste sea neutro, ya que éste es una medida de la calidad del lavado eliminando la base utilizada como catalizador.
3. Realizar una evaluación mecánica sobre el efecto y rendimiento del biodiesel obtenido y sus mezclas en motores que utilizan diesel 2D.
4. Hacer un estudio sobre la optimización del procedimiento empleado en la obtención del biodiesel, tales como tiempo y velocidad de agitación, concentración del catalizador, cantidad de etanol, etc.
5. Evaluar la factibilidad económica de la obtención de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol; promoviendo a partir de esta información el diseño de una planta.
6. Realizar un estudio de las propiedades del biodiesel obtenido de aceites vegetales usados y etanol, como alternativa del diesel 2D.
7. Realizar una investigación sobre la obtención de biodiesel a partir de aceite de palma y metanol.

8. Implementar reglamentos que contribuyan al uso de este tipo de combustibles, ya que ambientalmente son mas seguros.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alonzo Dávila, Héctor Fernando. Manual de Laboratorio De Motores de Combustión Interna, para control y emisión de gases en vehículos de gasolina Diesel. Tesis de Ingeniería Mecánica. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2001.
2. **Annual Book of ASTM Standard. (Petroleum Products, Lubricants and Fossil Fuels).** Sección 5. Volume 05.01 y 05.02. American Society for Testing and Materials. Printed in Easton, M.D. U.S.A. 1984ASTM.
3. Bracamonte Cerón, César Augusto. Estudio Preliminar de la Obtención de Biodiesel a partir de Aceite de Palma Africana. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Centro Universitario del Sur. Ingeniería Agroindustrial. 2002.
4. Lorenzo Pérez, Pedro Leonel. Caracterización de las Propiedades Físico-Químicas de los Aceites Lubricantes SAE-40 para vehículos con Motores Diesel y Gasolina que se comercializan en el país. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2000.
5. Portillo Nájera, Aldo Alexander. Caracterización de las

propiedades fisicoquímicas de los aceites como combustible alternativo. Tesis Ingeniería Química. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2,001.

6. J.C. Miller y J.N. Miller. **Estadística para Química Analítica**. Segunda Edición Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. Impreso en Wilmington, Delaware, U.S.A. 1993. pp 51-55.
7. Journey to Forever. <http://Journeytoforever.org/energiaweb/mike.htm>. Mayo, 2003.
8. Tecnocampo Zoe. <http://www.zoetecnocampo.com>. Junio, 2003.
9. PEMEX. <http://franquiciapemex.com>. Junio, 2003.
10. Biodiesel. <http://www.biodiesel.com>. Junio, 2003
11. Journey to Forever. <http://Jorneytoforever.org/biofuel.library/EthylMethylEster.html>. Julio, 2003.

APÉNDICE

METODOLOGÍA

PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL BIODIESEL (11)

El siguiente proceso se utilizará para obtener etil ester:

1. Medir 1 litro de aceite y colocarlo en un *beacker* de 2000 mL.
2. Medir 274 mL. de etanol en un *beacker* de 500 mL. y taparlo.
3. Pesar rápidamente 13 gramos de KOH, protegiéndolo en la medida de lo posible de la humedad atmosférica y el CO₂.
4. El KOH es añadido a todo el etanol el cual es vigorosamente agitado, el *beacker* tapado, con un agitador magnético hasta disolver. El KOH no disuelto lo hará en los pasos siguientes.
5. Esta mezcla se derrama en el aceite y se agita rápidamente por 6 horas continuas a temperatura ambiente. La mezcla generalmente cambia a una coloración turbia entre naranja y café a los pocos minutos. Luego cambia a café claro. Finalmente, cuando la reacción es completa la mezcla nuevamente se torna del color turbio antes mencionado.

6. Si la reacción es buena el glicerol se separa inmediatamente sobre la mezcla, completándose el fraguado en 1 hora.
7. Luego del fraguado el contenido completo es nuevamente agitado por 40 minutos de la siguiente manera: después de los primeros 20 minutos se agrega 15 mL (15% volumen inicial de aceite) de agua destilada, continuando la agitación por 20 minutos más para completar los 40.
8. Esta mezcla se deja fraguar un mínimo de 24 horas en una ampolla de decantación.
9. Después de completada la separación se drena la fase pesada (mezcla de glicerol y agua). Una capa delgada de glicerol y barro puede adherirse a la ampolla y es aconsejable lavar con agua fría por lo menos dos veces.
10. Finalmente para remover los restos de alcohol, las cantidades restantes de catalizador, glicerol y jabón, el éster es lavado con agua destilada a un volumen de 30% de volumen de éster, mezclando el agua con el éster con un agitador magnético en un beacker de 2000 mL expuesto al aire por 2 horas.
11. La mezcla se deja reposar por dos o tres días en una ampolla separando luego las dos fases.
12. Calentar el producto a 100 °C por media hora, para eliminar el agua no separada. (*)

13. En este punto el proceso es completo y el producto esta listo para su análisis.

(*) Este es un paso extra necesario para eliminar el agua no separada en los pasos anteriores debido a que si se omite existen problemas en la prueba de destilación.

PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

A cada muestra obtenida de combustible se le realizan las pruebas fisicoquímicas que generalmente se le realizan al Diesel 2D.

1. Punto de inflamabilidad, método ASTM D-93

Cantidad de muestra: 50 mL

Procedimiento:

- a. Colocar horizontalmente el aparato Pensky-Martus dentro de una campana sin corrientes de aire.
- b. Verter en la copa la muestra de combustible hasta la marca. La muestra deberá estar libre de agua.

- c. Colocar la tapadera sobre la copa, la cual lleva el agitador.
- d. Colocar el termómetro.
- e. Aplicar calor de tal manera que la lectura en el termómetro se incremente de 5 a 6°C por minuto.
- f. Encender el agitador a una velocidad de 90 a 120 revoluciones por minuto.
- g. Si la muestra tiene un punto de inflamación por debajo de 230°F (110°C) aplicar la llama cuando la temperatura se encuentre en el rango de 17 a 28°C por debajo del punto esperado con intervalos de 1°C. Si la muestra tiene un punto de inflamación mayor que 230 °F aplicar la llama cuando la temperatura este de 17 a 28°C por debajo del punto esperado con intervalos de 2°C.
- h. Registrar el punto observado.
- i. Corregir el valor observado utilizando la siguiente fórmula:

$$P.I. = C + 0.033(760 - P)$$

Donde:

- P.I. = punto de inflamación
- C = punto de inflamación observado
- P = presión barométrica, mm Hg.

2. Viscosidad Cinemática, método ASTM D-445

Cantidad de muestra: 7 mL

Procedimiento:

- a. Calibrar el baño a la temperatura de 40 o 100°C.
- b. Verificar que la muestra se encuentre libre de partículas y burbujas.
- c. Colocar una alícuota de muestra en un viscosímetro limpio y seco Cannon-Fenske calibrado para fluidos claros. El número del viscosímetro a usar se selecciona en función de la viscosidad aproximada de la muestra.
- d. Introducir el viscosímetro al baño y sujetarlo, es obligación que la muestra quede por debajo del nivel del baño.
- e. Esperar de 10 a 15 minutos para que la muestra alcance la temperatura del baño.
- f. Utilizando una perilla hacer que el aceite suba hasta la marca superior al bulbo del viscosímetro. Es importante que la muestra no tenga burbujas.
- g. Luego dejar que fluya por gravedad y tomar el tiempo entre la marca superior e inferior. Si el tiempo es menor que 200 segundos, utilizar un viscosímetro de número menor y si el tiempo es mayor a la inversa.

- h. Repetir el paso anterior hasta que la diferencia entre las pruebas no sea mayor que 0.5 segundos. No repetir mas de siete pruebas. Si no se estabiliza la prueba será necesario cambiar la muestra.
- i. Anotar el tiempo en segundos.
- j. El tiempo en segundos se multiplica por la constante del viscosímetro, mm^2/seg^2 y el resultado queda expresado en mm^2/seg , que es centiStokes.

3. Destilación del petróleo y sus derivados, método ASTM D-86.

Cantidad de muestra: 100 mL

Procedimiento:

- a. Limpiar el condensado.
- b. Colocar soporte de balón tipo C (para diesel),
- c. En una probeta de 100 mL medir alícuota de diesel o biodiesel.
- d. Homogeneizar la muestra de biodiesel o diesel.
- e. Colocar en un balón de 125 mL la alícuota y dos perlas de ebullición.
- f. En el balón colocar el termómetro de destilación 8 C.

- g. El bulbo del termómetro quedará a la altura del vástago del balón y la escala hacia el frente.
- h. Colocar el balón en el destilador procurando que el vástago quede ajustado al condensador calentador. En la salida del condensador colocar la probeta de 100 ml.
- i. Encender el destilador y agregar 65 unidades de calor.
- j. Esperar que la muestra ebulle y leer la temperatura de la primera gota.
- k. Leer la temperatura cada 5 ml. hasta que el producto se descomponga. La velocidad de destilación será de 60 a 75 segundos por cada 5 ml.
- l. Reportar el punto final.
- m. Reportar todos los valores de temperatura como la del recuperado. Leer la presión atmosférica en mm de Hg.

$$Tr(^{\circ}F) = 1.8T(^{\circ}C) + 32$$

$$Tr(^{\circ}F) = T(^{\circ}F) + 0.0012(760-P)(460+T)$$

$$Tr(^{\circ}F) = T(^{\circ}F) + 0.0012(760-P)(460+T(^{\circ}F))$$

Donde :

$T(^{\circ}F)$ = temperatura leída en $^{\circ}F$

P = presión leída en mm Hg

Tr = temperatura de recuperado en $760^{\circ}F$

4. Calor de combustión, método ASTM D-240

Cantidad de muestra: 1 g

Procedimiento:

- a. Colocar la muestra en una cápsula y pesarla.
- b. La muestra es puesta en la bomba y un alambre fusible de hierro es conectado a las terminales de la bomba, arreglados de tal forma que el alambre caiga dentro de la muestra.
- c. Se coloca 1 mL de agua destilada dentro de la bomba
- d. Se cierra la bomba y se agregan 25 atmósferas de oxígeno puro
- e. Luego la bomba es colocada dentro de un calorímetro, se le agrega 2000 gramos de agua destilada.
- f. Los alambres de ignición son colocados en las terminales de la bomba. Se deja que el agua del calorímetro alcance el equilibrio a una temperatura constante.
- g. Después de 5 minutos, se enciende la muestra.
- h. Durante el primer minuto se anota cada 15 segundos, después se anota cada minuto hasta completar 16 minutos.

- i. Los residuos se lavan con una solución de agua destilada y naranja de metilo y se recolecta.
- j. La solución recolectada se valora con carbonato de sodio, para determinar la cantidad de ácido nítrico formado.
- k. Se mide el alambre no quemado y se anota.
- l. Se calcula el calor de combustión mediante la siguiente fórmula:

$$Q = (tW - e1 - e2 - e3 - e4)/1000g$$

$$T = tc - ta - r1(b - a) - r2(c - b)$$

Donde :

- T = gradiente d temperatura elevada corregida.
- a = tiempo de ignición
- b = tiempo (cerca de 0.1 minuto) cuando la temperatura se eleva y alcanza un 60% del total.
- c = tiempo al inicio del periodo en el cual el rango de temperatura cambia con el tiempo y se convierte en constante (después de la combustión).
- ta = temperatura del tiempo de ignición, corregido por el error de lectura del termómetro.
- Tc = temperatura del tiempo c, corregida por el error de lectura del termómetro.

- R_1 = rango (unidad de temperatura por minuto) en la cual la temperatura estuvo elevada durante los minutos después de la ignición.
- r_2 = rango (unidad de temperatura por minuto) a la cual la temperatura estuvo elevada durante los minutos después de la ignición. Si la temperatura cayera, r_2 sería negativo y la cantidad $-r(c - b)$ es positiva.
- e_1 = corrección para el calor de formación del ácido nítrico (HNO_3), $\text{MJ} = \text{cm}^3$ del estándar (0.0866 N) NaOH solución usada en la titulación $\times 5/10^6$.
- e_2 = corrección para el calor de formación del ácido sulfúrico (H_2SO_4), $\text{MJ} = 58.6 \times \text{porcentaje de sulfuro en la muestra} \times \text{masa de la muestra}/10^6$.
- e_3 = corrección para el calor de combustión del alambre fundido, MJ.
- e_4 = corrección para el calor de combustión de la presión sensitiva o cápsula de gelatín y aceite mineral, $\text{MJ} = \text{masa del tipo o cápsula dl aceite, g} \times \text{calor de combustión o tipo o cápsula/aceite, MJ/Kg}/10^6$.
- Q = calor denso de combustión, a volumen constante expresado como MJ/Kg.
- W = energía equivalente del calorímetro, $\text{MJ}/^\circ\text{C}$
- g = peso de la muestra, g.

a. **Gravedad API**, método ASTM D-287

Cantidad de muestra: 500 mL

Procedimiento:

- a. Agitar la muestra para homogenizar, no debe ser bruscamente para evitar la formación de burbujas.
- b. Verter la muestra en una probeta de 500 ml, procurando dejar un margen para que no se derrame.
- c. Introducir un hidrómetro ASTM 2-H con un rango de 19-31 °API en la probeta que contiene la muestra, con el cuidado de no tocar las paredes y que flote, si el hidrómetro no flota entonces usar uno 1-H y si la escala queda fuera del rango usar uno 3-H.
- d. Dejar que se establezca el hidrómetro y luego leer.
- e. A continuación colocar un termómetro dentro de la probeta y esperar hasta que la temperatura se establezca y luego leer.
- f. Con los dos datos anteriores se corrige la gravedad API a 60°F, utilizando las Tablas 5ª del método ASTM 1250.

6. Detección de corrección al cobre: D-130

Una lámina de cobre pulida es inmersa en una dada cantidad de muestra y calentada a cierta temperatura y durante cierto tiempo, según las características del material a ser evaluado

7. Contenido de azufre en productos del petróleo por el método de la bomba, método ASTM D 129:

Cantidad de muestra: 0.6 – 0.8 gs

Procedimiento:

- a. Colocar la muestra en una cápsula y pesarla.
- b. La muestra es puesta en la bomba y un alambre fusible de hierro es conectado a las terminales de la bomba arreglados de tal forma que el alambre caiga dentro de la muestra.
- c. Se coloca 1 mL de agua destilada dentro de la bomba.
- d. Se cierra la bomba y se agregan 25 atmósferas de oxígeno puro.
- e. Luego la bomba es colocada dentro de un calorímetro, se le agrega 2000 gramos de agua destilada.
- f. Los alambres de ignición son colocados en las terminales de la bomba. Se deja que el agua del calorímetro alcance el equilibrio a una temperatura constante.
- g. Después de 5 minutos se enciende la muestra.
- h. Durante el primer minuto se anota cada 15 segundos, después cada minuto hasta completar 16 minutos.
- i. Los residuos se lavan con una solución de agua destilada y naranja de metilo para luego recolectarla.

- j. La solución recolectada se valora con carbonato de sodio, para determinar la cantidad de ácido nítrico formado
- k. Se mide el alambre no fundido y se anota
- l. Agregar 1 mL de hidróxido de amonio.
- m. Llevar a ebullición no más de 1 minuto.
- n. Filtrar la solución con un filtro Whattman # 41, lavar con agua caliente y llevar a un volumen de 250 – 300 ml.
- o. Añadir HCl concentrado hasta provocar el viraje y agregarle 2 ml de HCl concentrado en exceso.
- p. Agregar 10 mL de solución de bromo (tóxico).
- q. Evaporar hasta un volumen de 200 ml en una estufa.
- r. Agregar 10 mL de cloruro de bario y agitar por dos minutos.
- s. Evaporar hasta llegar a un volumen de 100 ml.
- t. Filtrar por filtro Whattman No.42.
- u. Doblar y colocarlo en un crisol.
- v. Colocarlo en una mufla a 775°C por una hora.

- w. Colocar los crisoles fríos en una desecadora por una hora y pesar.
- x. Llevarlo a peso constante.
- y. Calcular el % de azufre por la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Azufre} = (PC - PR) \times 13.73 / PM$$

Donde :

- PC = peso del crisol más residuo
- PR = tara del crisol
- PM = peso de la muestra

8. Agua en los productos de petróleo y otros materiales bituminosos, método ASTM D-1796.

Cantidad de muestra: 50 mL

Procedimiento:

- a. colocar la muestra en un tipo para centrifugar.
- b. Agregar 50 mL de tolueno saturado, a cada uno de los tubos de la centrífuga con la muestra.
- c. Agitar vigorosamente.

Después se coloca en un baño de agua a 50°C (122 °F) durante 10 minutos.
Agitar nuevamente.

- d. Se centrifuga hasta que el volumen combinado de agua y sedimento permanezcan constantes, aproximadamente 10 minutos.
- e. Se toma la nota de los valores observados y se reporta el valor.

9. Porcentaje de cenizas, método ASTM D-482:

Cantidad de muestra: 5g

Procedimiento:

- a. Tarar un crisol a la temperatura de 775 +- 25°C por 30 minutos en una mufla.
- b. Colocar el crisol tarado por 30 minutos en una desecadora.
- c. En el crisol previamente tarado pesar aproximadamente 5 gramos de la muestra.
- d. Con un mechero tarar el crisol hasta que el aceite se quemé por completo y ya no salgan vapores o gases del crisol. Evitar que la muestra se derrame.
- e. Colocar el crisol por 60 minutos en la mufla a una temperatura de 775 +- 25°C.

- f. Sacar y esperar que se enfríe el crisol, luego colocarlo por 30 minutos en la desecadora.
- g. Pesar el crisol con el residuo con exactitud de 10 mg.
- h. Repetir los tres pasos anteriores, hasta llegar a peso constante.
- i. Obtener el porcentaje de cenizas con la siguiente relación:

$$\% C = ((PRC - PC)/PM) \times 100$$

Donde:

- a. %C = Porcentaje de cenizas
- b. PRC = Peso del residuo y el crisol
- c. PC = Peso de la tara del crisol
- d. PM = Peso de la muestra (5grs.)

MEDIOS

Equipo

1. Baño para la prueba de viscosidad cinemática., marca Koehler, modelo K-23400
2. Vicosímetro Cannon-Fenske, marca Cannon, números 100, 200, 300, 400. ASTM D445.

3. Baño para la prueba de corrosión en lámina de cobre, marca Precisión Scientific, serie AV-11. ASTM D130.
4. Destilador marca Precisión Scientific, serie 14 AVE. ASTM D86.
5. Horno Thermolyne, modelo 48000.
6. Estufa Thermolyne, tipo 2200.
7. Campana Labconco, serie 87556.
8. Balanza marca Mettler, AE200.
9. Balanza marca Mettler, AE163.
10. Flash Tester de copa cerrada, marca Perkins Martens, ASTM D-93.
11. Calorímetro, marca Parr, 115 voltios, 60 Hz, 25 Amp, modelo 1341 EB.
12. Centrífuga de tubos de ensayo. ASTM D1796.
13. Mufla Branstead/Thermolyne, Furnace 47925, 120 voltios, 1000 Watts.
14. Estufa eléctrica, marca Fisher, modelo 284, 110 voltios.
15. Balanza de precisión, tipo AE-200, 115-120 voltios, rango de 0-200 gramos.

Instrumentos y materiales

1. Termómetros ASTM 46C, 56C.
2. Vasos de precipitado de 10, 50 y 100 mL
3. Agitadores de vidrio, vidrios de reloj y gotero.
4. Desecadoras.
5. Perillas.
6. Mechero, trípode y triángulo.
7. Crisoles.
8. Hidrómetro para gravedad API, con una escala de 19 a 31 grados API, modelo 141, ASTM 53 H.
9. Hidrómetro para gravedad API, con una escala de 9 a 21 grados API, TAG, ASTM 2 H.
10. Balones 10, 25, 50 y 100 ml.
11. Ampollas de decantación.
12. Papel filtro Whattman número 41 y 42.

13. Aceite de palma refinado.

14. Alcohol etílico absoluto.

15. Hidróxido de potasio (85%)

16. Agua destilada.

17. Ácido tánico.

18. HCl concentrado.

19. Bromo saturado.

20. Hidróxido de amonio concentrado.

Recursos

Se contará con el apoyo del departamento de Laboratorio de la Dirección Administrativa del Ministerio de Energía y Minas.

Diseño del experimento

- Se realizan tres corridas del procedimiento para obtener el Biodiesel, obteniéndose muestras de cada una.
- Con las tres muestras obtenidas se preparan las mezclas de 20, 35 y 50% del producto con diesel comercial.

- Se le realiza a cada una de las muestras los exámenes físico-químicos.

Análisis de varianza

Este análisis se realizará a través de un método de la ANOVA o Análisis de varianza, denominado “Análisis de varianza de clasificación simple”, con la cual se determinará si existe o no una diferencia o variabilidad significativa entre cada una de las propiedades de las muestras (lotes) analizadas. El procedimiento es el siguiente:

Variación dentro de las muestras:

Para una muestra de n mediciones X_1, X_2, \dots, X_n se define como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los datos partículas de las mediciones y su media \bar{X} correspondiente, dividida entre n menos uno, así:

$$Vd = \frac{\sum_i^n ((X_i - \bar{X})^2)}{(n - 1)}$$

Donde: Sum = Sumatoria
 Vd = Variación dentro de las muestras
 X_i = Valor de la propiedad medida
 \bar{X} = Valor de la media de propiedades
 n = Número de mediciones

- a) Se calcula el valor de la media de la muestras (\bar{X}_m).
- b) Se calcula el cuadrado de medias dentro de las muestras (CDMd), con:

$$\text{CDMd} = (\text{Sum } (Vdi))/n \quad \text{con } gl = h*(n - 1)$$

Donde: Vdi = Valor de la variación para cada muestra
 gl = Grados de libertad
 h = Número de muestras

Variación entre las muestras

Esta variación se define como la sumatoria de los cuadrados de las diferencias entre la media de propiedades y el valor de la media de la muestras X_m , así:

$$Ve = \frac{\sum_{i=1}^h (X'i - X_m)^2}{(h-1)}$$

Donde:

Ve = Variación entre las muestras
 $X'i$ = Media de las propiedades de n mediciones
 h = Número de muestras

a) Se calcula el cuadrado de las medias entre las muestras (CDMe), así:

$$\text{CDMe} = Ve * (h - 1) \quad \text{con } gl = h - 1$$

b) Se divide el CDMe entre el CDMd, el cociente forma el valor calculado de la función F de cola, así:

$$F_{[(h-1)/(h(n-1))]} = \text{CDMe} / \text{CDMd}$$

c) Se compara el valor de F con el valor de F_c o valor crítico de F para una prueba de cola en la Tabla A.2 del apéndice de la referencia 28,

teniendo en cuenta los grados de libertad correspondientes y utilizando una significación de 5%

d) Conclusiones:

Si $F \leq F_c$: No existe variabilidad significativa.

Si $F > F_c$: Si existe variabilidad significativa.

Tabla V. Decisión de los intervalos de Duncan

P	Cantidades	Diferencia	Valor Crítico	Conclusión
K	$A_k - a_1$			Existe diferencia significativa
k-1	$A_k - 1 - a_2$			No existe diferencia significativa

e) En la siguiente tabla se resume el método:

Tabla VI. Resumen del Método ANOVA

VARIABILIDAD	CDM	Gl	VARIANZA	F
Entre las muestras	CDMe	$H - 1$	V_e	$CDMe/CDMd$
Dentro de las muestras	CDMd	$h*(n-1)$	V_d	

Tabla VII. Valores obtenidos de los análisis fisicoquímicos del lote 1

Propiedades	REPETICIÓN		
	I	II	III
Índice de cetano	48.72	48.67	48.92
Punto de inflamabilidad (°F)	182	182	183
Viscosidad (mm ² /s)	5.24	5.25	5.25
Destilación (°F)	659.2	646.5	647.2
Poder calorífico (BTU/lb)	17,080	17,492	17,125
Densidad API	30.5	30.6	30.5
Corrosión al cobre	1	1	1
Azufre (%)	0.03	---	---
Agua y sedimento (%)	<0.05	---	---
Cenizas (%)	0	---	---

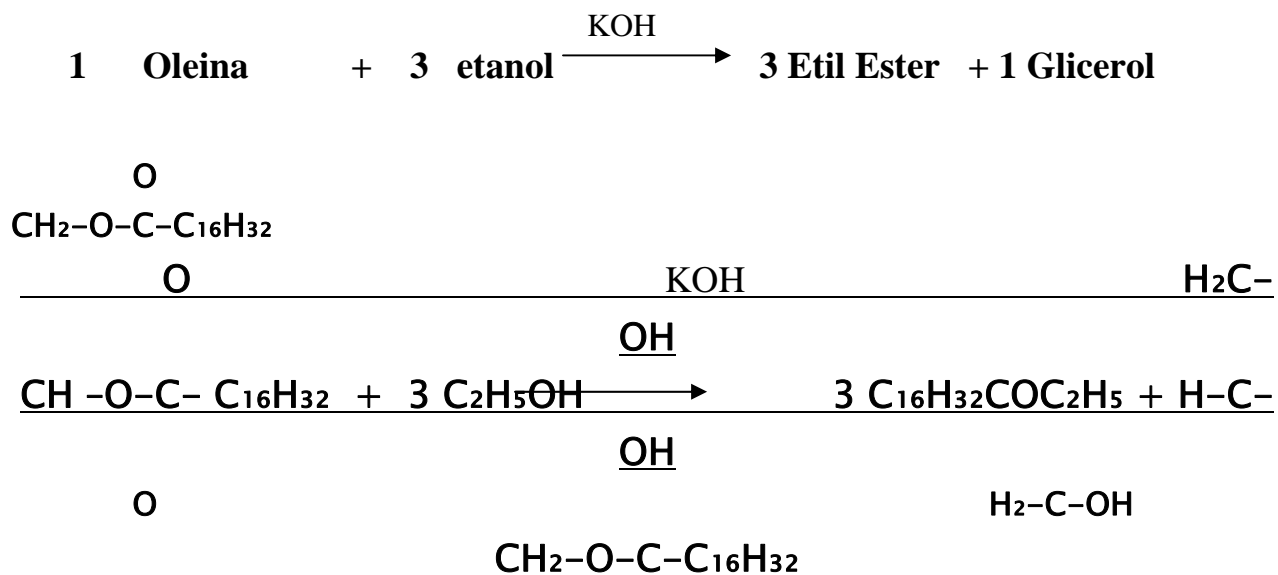
Tabla VIII. Valores obtenidos de los análisis fisicoquímicos del lote 2

Propiedades	REPETICIÓN		
	I	II	III
Índice de cetano	48.82	48.87	48.82
Punto de inflamabilidad (°F)	184	182	182
Viscosidad (mm ² /s)	5.16	5.26	5.24
Destilación (°F)	646.5	650.2	649.6
Poder calorífico (BTU/lb)	16,690	17,383	17,498
Densidad API	30.6	30.5	30.6
Corrosión al cobre	1	1	1
Azufre (%)	0.02	---	---
Agua y sedimento (%)	<0.05	---	---
Cenizas (%)	0	---	---

Tabla IX. Valores obtenidos de los análisis fisicoquímicos del lote 3

Propiedades	REPETICIÓN		
	I	II	III
Indice de cetano	48.90	48.87	48.79
Punto de inflamabilidad (°F)	183	182	184
Viscosidad (mm ² /s)	5.18	5.30	5.20
Destilación (°F)	655.6	655.7	646.0
Poder calorífico (BTU/lb)	17,172	17,360	17,205
Densidad API	30.6	30.65	30.6
Corrosión al cobre	1	1	1
Azufre (%)	0.02	---	---
Agua y sedimento (%)	<0.05	---	---
Cenizas (%)	0	---	---

Figura 11. Reacción de trans-esterificación de la oleína de palma Y etanol para obtener biodiesel y glicerina



(Fórmula hipotética, basada en la composición de la oleína)

* Sobre la base de esta reacción y cálculos estequiométricos se tiene que en el procedimiento de obtención de biodiesel se utiliza aproximadamente 50% de exceso del requerimiento teórico de etanol y se tiene un rendimiento de 87% basado en el volumen de biodiesel obtenido.

ANEXO

Tabla X. Guatemala: Valor de las exportaciones e importaciones de aceite en bruto de Palma año 2002

MES	Importaciones		Exportaciones	
	Monto Dólares	Peso en Kilos	Monto Dólares	Peso en Kilos
Enero	133,355	250,210	774,204	2,252,000
Febrero	102,376	235,996	851,890	2,480,000
Marzo	236,282	440,090	415,602	1,100,000
Abril	195,697	370,393	546,480	1,584,000
Mayo	163,987	314,158	1,068,305	3,167,300
Junio	42,326	57,800	952,657	2,519,190
Julio	26,156	40,825	1,296,887	3,268,170
Agosto	82,690	155,450	1,387,723	3,417,140
Septiembre	71,145	136,219	983,826	2,318,930
Octubre	56,502	127,403	2,200,763	5,018,647
Noviembre	72,387	175,000	3,236,175	7,596,900
Diciembre	0	0	3,058,319	6,763,620
Total	1,182,903	2,303,544	16,772,831	41,485,897

Fuente: Banco de Guatemala

Tabla XI. Guatemala: Importaciones de petróleo y productos petroleros periodo 1995-2001 (miles de barriles)

CONCEPTO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001*
GLP	1,637.20	1,687.90	1,877.00	2,075.40	2,036.16	2,211.44	973.51
Gasolina Aviación	26.90	41.90	31.00	31.20	20.00	18.42	5.42
Gasolina Superior	1,804.90	2,013.30	2,327.80	3,144.40	3,025.38	2,921.32	2,061.67
Gasolina Regular	1,258.60	1,325.30	1,499.30	1,532.80	1,590.37	1,792.00	1,039.54
Kerosina	525.00	476.20	487.30	639.20	409.06	449.42	398.59
Diesel	3,923.80	3,723.70	3,937.90	4,716.70	4,757.19	5,167.44	3,220.42
Bunker	1,410.00	1,546.30	2,252.10	2,549.80	2,588.70	2,889.22	1,345.91
Asfalto	26.50	58.10	85.50	59.30	60.50	41.27	84.32
Crudo Nacional	5,604.90	5,332.40	5,495.30	5,693.40	5,957.00	6,040.51	3,249.85
TOTALES:	16,217.80	16,205.10	17,993.20	20,442.20	20,444.36	21,531.04	12,379.23

Fuente: Departamento de Transformación de la DGH e informes de las compañías

* Primer Trimestre

Nota: En los años 2000 y 2001, el volumen de gasolina superior incluye 95 y 98 octanos y MTB.

Tabla XII. Guatemala: Consumo de petróleo y productos petroleros periodo 1995-2001 (miles de barriles)

CONCEPTO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001*
GLP	1,718.20	1,772.30	1,665.90	2,133.90	2,336.49	2,363.59	1,061.97
Gasolina Aviación	33.70	38.20	22.00	32.30	21.60	17.00	8.67
Gasolina Superior	2,295.20	2,547.90	2,895.80	2,937.20	3,823.20	3,852.89	2,060.63
Gasolina Regular	1,871.00	1,898.30	2,149.00	1,813.50	2,175.29	2,541.32	1,256.43
Kerosina	674.40	736.70	737.10	768.60	761.37	767.30	380.38
Diesel	6,115.70	5,599.90	5,768.60	5,783.80	6,643.64	7,523.36	4,118.34
Bunker	3,281.60	3,328.10	3,071.30	4,331.30	4,984.06	4,998.78	2,846.17
Asfalto	267.90	347.80	470.20	506.60	771.20	821.90	75.09
Crudo Nacional	585.85	684.02	920.47	1,109.51	898.42	665.44	299.27
TOTALES:	16,843.55	16,953.22	17,700.37	19,416.71	22,415.27	23,551.58	12,106.95

Fuente: Departamento de Transformación de la DGH.

* Primer Semestre

**Tabla XIII. Guatemala: Balance de diesel, periodo 1995-2001
(miles de barriles)**

ORIGEN	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001**
Refinería Texpet	2,236.00	1,863.50	2,414.90	2,458.00	2,140.00	2,123.11	421.37
Mini-Refinería Basic*	14.30	31.70	61.10	73.90	77.50	55.82	12.19
Importación	3,923.80	3,723.70	3,937.90	4,716.70	4,757.19	5,167.44	1,685.86
Consumo	6,115.70	5,599.90	5,768.60	5,783.80	6,643.64	7,523.36	2,044.03
Totales	12,289.80	11,218.80	12,182.50	13,032.40	13,618.33	14,869.73	4,163.45

Fuente: Departamentos Varios Dirección General de Hidrocarburos e Informes Compañías

* No comerciales

** Primer trimestre

Tabla XIV. Acuerdo Gubernativo 207 -2001. Requisitos físicos y químicos del Diesel 2D

REQUISITO	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO ASTM
Índice de cetano, mínimo	45	D - 613
Índice de cetano, mínimo	45	D - 976/D-4737
Punto de inflamabilidad, en °C (°F), mínimo.	52 (125.6)	D - 93
Viscosidad cinemática, mL ₂ /s a 37.78 °C (100°F), mínimo - máximo.	1.90 - 4.10	D-445
T90, temperatura al recuperar el 90%, en °C, (°F); mínima - máxima.	282 - 350 (540 - 662)	D - 86
Corrosión de lámina de cobre, 3 horas a 50°C (122°F) número de clasificación máximo	3	D - 130
Punto de Turbidez en°C (°F), máximo.	0(32)	D - 2500
Contenido de azufre, en % masa, máximo.	0.5	D - 129/ D -2622 D -1266/ D -1552
Contenido de agua y sedimento, en % vol. Máximo.	0.05	D - 1796/ D-2709
Cenizas, en % masa, máximo.	0.01	D - 482

Fuente: Diario de Centroamérica, - 29 de noviembre de 2001.

Tabla XV. Control de Ácidos Grasos de la Oleina

DESCRIPCIÓN	Porcentaje
Minístico	0.77
Palmítico	35.3
Estearico	4.25
Oleico	45.2
Linoleico	14.08
Linolenico	0.45
cis / trans	1.40

Fuente: Planta Olmeca