



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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIESEL No. 2-D (automotriz) CON BIODIESEL, ELABORADO A PARTIR DE ACEITE USADO Y OLEÍNA DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis*) EN MEZCLAS DE ALTOS PORCENTAJES, PARA SU EVALUACIÓN EN UN MOTOR ESTACIONARIO DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

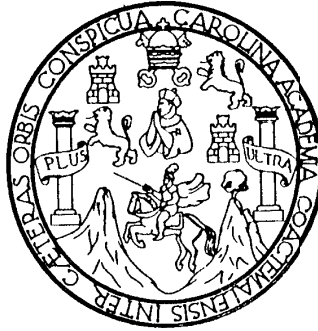
**Leslie Mariana Flores Barrios**

Asesorado por el Ing. José Eduardo Calderón García

Guatemala, noviembre de 2008



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIESEL No. 2-D (automotriz) CON BIODIESEL, ELABORADO A PARTIR DE ACEITE USADO Y OLEÍNA DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis*) EN MEZCLAS DE ALTOS PORCENTAJES, PARA SU EVALUACIÓN EN UN MOTOR ESTACIONARIO DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**LESLIE MARIANA FLORES BARRIOS**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ EDUARDO CALDERÓN GARCÍA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2008



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II:	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III:	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV:	Br. Milton De León Bran
VOCAL V:	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing. Benjamín Piedrasanta
EXAMINADORA:	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR:	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas



## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIESEL No. 2-D (automotriz) CON BIODIESEL, ELABORADO A PARTIR DE ACEITE USADO Y OLEÍNA DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis*) EN MEZCLAS DE ALTOS PORCENTAJES, PARA SU EVALUACIÓN EN UN MOTOR ESTACIONARIO DE COMBUSTIÓN INTERNA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 20 febrero de 2008.

**Leslie Mariana Flores Barrios**





## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **DIOS:**

Es a él a quién debo únicamente toda la sabiduría, conocimiento y lo que soy hasta este día.

### **MIS PADRES:**

Egberto Alejandro Flores Hernández y Lesbia Clementina Barrios de León. Por su amor y dedicación. Ustedes son el mejor y más grande ejemplo de sabiduría, persistencia, esfuerzo y trabajo. Sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

### **MIS HERMANOS:**

Alejandro, Werner, Wendy, Iván y David, Lucy y Rossi. Por su apoyo y por creer siempre en mí.

### **MIS SOBRINOS:**

Por su amor y por hacer mis días inusuales.

### **FAMILIA PACAY GODINEZ:**

Por su amor y apoyo.

### **MIS AMIGOS:**

Marco Antonio, Karlita, Claudia, Cecy, Luis Chavarría, Iván, Viví, Marcela, Karen, Sabrina, Lesbia, Miranda, Rosario y Guicho, Juan José, Luis, Raúl Bolaños, José Galicia, Luis Fernando Gamboa, Javier, Omar, Elvis, Gabriel. Por su amistad incondicional durante todo este tiempo.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Universidad de San Carlos de Guatemala**

#### **Facultad de Ingeniería**

Casa de estudios que me brindó formación y conocimiento a través de éstos años y de donde llevó los mejores recuerdos.

#### **Ing. José Eduardo Calderón García**

Por su asesoría y atención durante la realización del presente trabajo

#### **Ing. César Alfonso García**

Por su valioso aporte para la revisión y elaboración del presente trabajo.

#### **Ing. Williams Álvarez, Liseli de León**

Por su incondicional apoyo para la culminación de este trabajo de graduación.

#### **Ing. Telma Maricela Cano, Ing. Mario Mérida:**

Por su valioso aporte para la revisión y elaboración del presente trabajo.

#### **Los Asistentes de Investigación**

Darío Barraza y Gerardo Robles por su incondicional apoyo y ayuda en la realización de la fase experimental del presente trabajo de investigación

**Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería**

Por permitirme utilizar las instalaciones y equipo del Centro de Investigaciones para la realización de éste trabajo de investigación

**Ministerio de Energía y Minas**

Por su colaboración e interpretación de los resultados del presente trabajo de investigación.

**Escuela de Ingeniería Mecánica**

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



2.4.1.3.	Sistema de alimentación	16
2.4.1.4.	Encendido	16
2.4.1.5.	Refrigeración	17
2.4.1.6.	Sistema de arranque	18
2.5.	Tipos de Motores	19
2.5.1.	Motor convencional del tipo Otto	19
2.5.2.	Motor Diesel	19
2.5.3.	Motor de dos tiempos	21
2.5.4.	Motor Wankel	22
3.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	23
4.	RESULTADOS	27
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
	CONCLUSIONES	35
	RECOMENDACIONES	37
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
	BIBLIOGRAFÍA	41
	APÉNDICE	43
	ANEXOS	55

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Reacción de transesterificación básica.
2. Diagrama de flujo del proceso
3. Mezclas Biodiesel a partir de oleína vrs. RPM
4. Mezclas Biodiesel a partir de aceite usado vrs. RPM
5. Análisis MEM para Biodiesel, a partir de aceite usado.
6. Análisis MEM para Biodiesel, a partir de oleína.
7. Acuerdo Ministerial 204-2007 del Ministerio de Energía y Minas.
8. Cuadro 9 del acuerdo ministerial 204-2007. Características y especificaciones de calidad para diesel 2-D.
9. Tabla valores de F para nivel de significancia 0.05
10. Tabla valores de F para nivel de significancia 0.01.

### TABLAS

- I. Plantas de Biodiesel en producción en España.
- II. Plantas de Biodiesel en construcción en España
- III. Plantas de Biodiesel en proyecto en España.
- IV. Tabla comparativa de análisis de propiedades del Biodiesel como combustible a partir de oleína y aceite usado de palma africana.
- V. Capacidad calorífica calculada para mezclas de diesel con alto porcentajes de Biodiesel a partir de oleína de palma africana.
- VI. Capacidad calorífica calculada para mezclas de diesel con alto porcentajes de Biodiesel , a partir de oleína de palma africana.

- VII. RPM y potencia de un motor con mezclas de Biodiesel en altos porcentajes y diesel 2-D (automotriz)
- VIII. Resumen análisis de varianza para Biodiesel, preparado a partir de oleína
- IX. Resumen análisis de varianza para Biodiesel, preparado a partir de aceite usado de palma africana.
- X. Datos originales RPM en un motor estacionario de un pistón, utilizando Biodiesel a partir de aceite usado.
- XI. Datos originales de las revoluciones por minuto en un motor estacionario de un pistón, utilizando Biodiesel a partir de oleína de palma africana.
- XII. RPM y potencias calculadas para mezclas de Biodiesel – diesel utilizados en un motor estacionario de un pistón.
- XIII. Calor de combustión calculada para mezclas de Biodiesel-diesel.
- XIV. Análisis de varianzas de datos obtenidos de Biodiesel a partir de oleína.
- XV. Análisis de varianzas de datos obtenidos de Biodiesel a partir de aceite usado.



## LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
d	Distancia
T	Torque
F	Fuerza de freno
P	Potencia
%	Porcentaje
$\Sigma$	Sumatoria
N	Número de datos
RPM	Revoluciones por minuto
Cp	Poder calorífico
MJ	Mega joule
MÍN.	Mínimo
MÁX.	Máximo



## GLOSARIO

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

<b>Diesel 2-D</b>	Nombre utilizado para denominar al Diesel destinado para el uso comercial
<b>Esteres</b>	Compuestos químicos derivados de los ácidos carboxílicos que se caracterizan por tener el grupo acilo unido a otra molécula mediante un átomo de oxígeno
<b>Esterificación</b>	Reacción mediante la cual los ácidos carboxílicos se convierten en esterres con la adición de catalizadores ácidos.
<b>Glicerina</b>	Alcohol de tres átomos de carbono saturados, en el que cada uno de ellos tiene unido un grupo hidroxilo.
<b>Petróleo</b>	Líquido bituminoso espeso formado por muchos compuestos orgánicos en los que predominan cadenas de carbono e hidrógeno que se encuentra debajo de la superficie de la tierra y es utilizado como combustible y como materia prima en la industria química.
<b>Transesterificación</b>	Reacción en la que los triglicéridos se convierten en esterres y glicerina con la utilización de catalizadores alcalinos.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo, obtener Biodiesel a partir de oleína de palma africana y Biodiesel de palma africana, a partir de aceite usado en la industria alimenticia, para su comparación fisicoquímica. Posteriormente se realizó un análisis de su funcionamiento en un motor estacionario de un pistón, utilizando para ello mezclas en alto porcentajes de Biodiesel con el Diesel 2-D (automotriz)

Para ello, se llevó a cabo la reacción de transesterificación, para la obtención de Biodiesel a partir de oleína y aceite usado de palma africana (*Elaeis guineensis*) a nivel de planta piloto, se procedió a realizar los análisis fisicoquímicos para la determinación de las propiedades de las muestras como combustible, comparándolas a los estándares de las normas ASTM requeridas para el diesel comercial 2-D.

Estos análisis fueron realizados por el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas, encontrándose que ambas muestras cumplen únicamente con 9 de las 10 las especificaciones de la norma según Acuerdo Ministerial Número 204-2007 publicado en el Diario de Centro América en fecha 13 de noviembre de 2007.

En la segunda parte experimental, se utilizó los biocombustibles en un motor estacionario de un pistón para observar su funcionamiento, calculándose la potencia generada en el motor y la cantidad de revoluciones por minuto alcanzadas en cada una de las mezclas.

En función de estudios existentes del funcionamiento del Biodiesel utilizando mezclas en bajos contenidos de Biodiesel, para la investigación, se utilizaron mezclas del 50, 60, 70, 80, 90 y 100 por ciento de Biodiesel, encontrándose que las revoluciones por minuto, en un motor estacionario de un pistón, son directamente proporcionales a la cantidad de Biodiesel presente en la mezclas.

Adicionalmente el estudio determinó, que las revoluciones por minuto y potencias generadas en el motor estacionario son mayores para las mezclas en las cuales se utiliza Biodiesel a partir de oleína de palma africana.

## HIPÓTESIS ESTADÍSTICA

### Hipótesis nula

**Ho:** El rendimiento de la mezcla de Biodiesel con diesel comercial, medido como la potencia producida y las revoluciones por minuto en un motor de combustión interna de un pistón, no muestra diferencias significativas en relación con el diesel No. 2-D (automotriz).

### Hipótesis alternativa

**Hi:** El rendimiento de la mezcla de Biodiesel con diesel 2-D , medido con la potencia producida y las revoluciones por minuto en un motor de combustión interna, muestra diferencias significativas en relación con el diesel No. 2-D (automotriz)





## OBJETIVOS

- GENERAL

Realizar un Análisis comparativo de Dienes 2D (Automotriz) con Biodiesel en un motor de combustión interna en mezclas de alta concentración, obtenido a partir de aceite usado y aceite refinado de palma africana por medio del método de transesterificación a nivel de planta piloto.

- ESPECÍFICOS:

1. Evaluar las características fisicoquímicas del Biodiesel, obtenido a partir de aceite usado y aceite refinado de aceite de palma africana.
2. Comparar la potencia y revoluciones por minuto de las mezclas con altos contenidos de Biodiesel, obtenido a partir de aceite usado y aceite refinado con las producidas con el diesel comercial.
3. Determinar la potencia y revoluciones por minuto de los dos combustibles obtenidos con mezclas de Biodiesel al, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 por ciento.



## INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son un posible sustituto de los combustibles fósiles actuales y su estudio y elaboración se han incrementado debido al alza en el precio de éstos por ser recursos no renovables. Por el contrario, los biocombustibles provienen de materias primas renovables y el proceso de elaboración y obtención es de menor costo, por lo que la industria de los biocombustibles tiene un futuro prometedor.

Guatemala es un país que cuenta con un amplio sector que dispone de tierras de vocación agrícola y climas apropiados para cultivos energéticos, es decir, para la generación de biocombustibles, eliminando significativamente, la dependencia del petróleo en el país, además descubriendo un nuevo nicho de mercado para el desarrollo sostenible del país, convirtiéndose en un generador de empleo para muchas personas en diferentes sectores.

El Biodiesel es el sustituto derivado de aceite de origen vegetal que vendría a sustituir al combustible diesel que se deriva del petróleo. Este biocombustible puede utilizarse en los motores en mezclas de bajos porcentajes o sustituirlo por completo.

El presente trabajo analizará el comportamiento de dos diferentes tipos de Biodiesel obtenidos a partir de aceite usado de palma africana y aceite refinado de palma africana (oleína), y su utilización en un motor de combustión interna de un pistón, utilizando para ello mezclas diesel de altas concentraciones

conteniendo 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100% de biocombustible, para su comparación con un tipo de diesel comercial.

## **1. ANTECEDENTES**

El estudio y elaboración de biocombustibles se ha incrementado debido a la demanda a nivel mundial de encontrar alternativas que sean más económicas, además de tener en cuenta, que el petróleo no es un recurso renovable. El Biodiesel es el nuevo producto que podría sustituir al diesel y lo más importante es que no posee esta desventaja ya que se produce a partir de fuentes renovables o de desecho.

Guatemala es un país que cuenta con las condiciones adecuadas para el desarrollo de la industria de los biocombustibles, ya que posee las condiciones adecuadas y con una de las plantaciones mas grandes de palma africana, como es ya de conocimiento general, el Biodiesel es elaborado a partir de aceites fijos y por lo tanto una alternativa clara para el desarrollo de la agroindustria.

Tras el paso del huracán Mitch, en 1998, el paisaje de Guatemala y en especial el de Izabal ha cambiado, con la destrucción de las plantaciones bananeras, los productores se vieron obligados a cambiar las plantaciones por un cultivo más resistente, y encontraron en la palma africana un sustituto que, además de los usos actuales la fabricación de aceite de cocina, jabones, velas, repostería y concentrado para animales, tiene un nuevo potencial como sustituto del diesel derivado del petróleo, que se ha encarecido en los últimos años.

Según el IV Censo Nacional Agropecuario 2003, hay 45 mil manzanas sembradas con palma africana en Escuintla, Quetzaltenango, San Marcos,

Suchitepéquez, Retalhuleu, San Marcos e Izabal, siendo el quinto cultivo con mayor extensión detrás del café, caña de azúcar, cardamomo y hule. La producción estimada para 2006 es de 150 mil toneladas métricas.

Los ejecutivos de la Corporación Agroindustrial del Caribe, S.A. (Agrocaribe) buscan la maquinaria que necesitan para montar la primera planta de Biodiesel del país. Al operar la planta, Agrocaribe podría llegar a producir hasta 52 millones de galones de Biodiesel, según el rendimiento y el cuidado del proceso, lo que se estima en un 15 % del consumo anual del diesel, y de lograr que todos los productores se unieran, así como ampliar las plantaciones, Guatemala podría lograr a mediano plazo su autosuficiencia energética, y abastecer a industrias y vehículos. La estimación del precio de venta promedio de la tonelada de palma africana es de US\$63.00.

Actualmente hay sembradas en el mundo cinco millones de hectáreas de palma que representan 16 millones de toneladas de producción anuales, equivalente a un consumo de un 1,7 kilo per cápita. Colombia es el cuarto productor (2%) de palma de aceite en el mundo después de Malasia (46%), Indonesia (31.3%) y Nigeria (5.1%). Siendo Alemania el principal productor de Biodiesel en el mundo, que concentra el 63% de la producción. Le sigue Francia con el 17%, Estados Unidos con el 10%, Italia con el 7% y Austria con el 3%.

Los países como Brasil, España, Argentina y Estados Unidos tienen producciones altas de Biodiesel y lo venden en algunas gasolineras, sin embargo en Guatemala apenas se ha iniciado la investigación de la elaboración y utilización de Biodiesel siendo la empresa Octagon la primera empresa que ya utiliza el biocombustible en su flotilla de camiones.

En las siguientes tablas, se muestra algunos datos acerca de la producción y venta de Biodiesel en España

**Tabla I. Plantas de Biodiesel en producción en España**

*Plantas de Biodiesel en Producción: 11*

Nombre	Localidad	Provincia	Producción Proyectada (Tn)
<a href="#">Biocarburos Almadrén</a>	Almadén	Ciudad Real	21.000
<a href="#">Biodiesel Andalucía 2004 (Bida)</a>	Fuentes de Andalucía	Sevilla	36.000
<a href="#">Biodiesel Caparrosa</a>	Caparrosa	Navarra	35.000
<a href="#">Biodiesel CLM, S.L.</a>	Santa Olalla	Toledo	13.000
<a href="#">Bionet Europa</a>	Reus	Tarragona	50.000
<a href="#">Bionor Transformación</a>	Berantevilla	Alava	30.000
<a href="#">Bionorte</a>	San Martín del Rey Aurelio	Asturias	4.000
<a href="#">Combustibles Ecológicos Biotel</a>	Barajas de Melo	Cuenca	72.000
<a href="#">Grupo Ecológico Natural SL (Gen Oli Balear)</a>	Llucmajor	Baleares	16.000
<a href="#">Idae</a>	Alcalá de Henares	Madrid	5.000
<a href="#">Stocks del Vallés</a>	Barcelona	Barcelona	31.000

**Tabla II. Plantas de Biodiesel en construcción en España**

*Plantas de Biodiesel en Construcción: 21*

Nombre	Localidad	Provincia	Producción proyectada (Tn)
<a href="#">Acciona-Repsol</a>	Cabreros del Río	Leon	100.000
<a href="#">Acor</a>	Olmedo	Valladolid	70.000
Albatio	Najar	Almeria	6.000
<a href="#">Becco Villaverde</a>	Villaverde	Madrid	48.000
<a href="#">Bercam</a>	Los Yébenes	Toledo	6.000
<a href="#">Biocarburos de Zierbena</a>	Bilbao	Vizcaya	200.000
<a href="#">Biocemsa</a>	Elda	Alicante	20.000
<a href="#">Biocombustibles Andaluces, S.L</a>	Arahal	Sevilla	60.000
<a href="#">Biocombustibles de Castilla y León</a>	San Cristóbal de Entreviñas	Zamora	
<a href="#">Biodiex</a>	El Carpio	Cordoba	6.000
<a href="#">Bioenergética Extremeña</a>	Valdetorres	Badajoz	250.000
<a href="#">COANSA SOS Cuétara</a>	Andujar	Jaen	200.000
<a href="#">Combunet</a>	Monzón	Huesca	35.000
<a href="#">Entabán</a>	Huesca	Huesca	25.000
<a href="#">Entabán</a>	Sevilla	Sevilla	50.000
<a href="#">Gebiosa</a>	Pontejos	Cantabria	150.000
<a href="#">Linares Biodiesel Technologies</a>	Linares	Jaen	100.000
<a href="#">Natura Energía Renovable (Ocaña)</a>	Ocaña	Toledo	120.000

<a href="#">Odarpi</a>	Castrogeriz	Burgos	5.000
<a href="#">Olcesa Biodiesel</a>	Tarancón	Cuenca	50.000
<a href="#">RNC Grupo Sagredo</a>	Briviesca	Burgos	49.000

### Tabla III. Plantas de Biodiesel en proyecto en España

*Plantas de Biodiesel en Proyecto: 12*

Nombre	Localidad	Provincia	Producción Proyectada. (Tn)
<a href="#">Biocarburantes de Galicia</a>	Begonte	Lugo	20.000
<a href="#">Bionor Sur I</a>	Palos de la Frontera	Huelva	300.000
<a href="#">BioOils Energy "La Rábida"</a>	Palos de la Frontera	Huelva	200.000
<a href="#">DosBio (Ebro Puleva) Jédula</a>	Jédula	Cádiz	200.000
<a href="#">ecoMotion Madrid</a>	Madrid	Madrid	50.000
<a href="#">Energías Renovables del Bierzo</a>	Paredes de Nava	Palencia	100.000
<a href="#">Entaban Biocombustibles Galicia</a>	El Ferrol	A Coruña	50.000
<a href="#">Iniciativas Bioenergéticas</a>	Calahorra	La Rioja	250.000
<a href="#">Nátura Biodiesel Alicante</a>	Alicante	Alicante	250.000
<a href="#">Natura Energía Renovable (El Musel)</a>	Gijón	Asturias	250.000
<a href="#">Transportes Ceferino Martínez</a>	Girona	Girona	5.000
<a href="#">UTE Isolux Infinita Renovables Corsan Covian</a>	Castellón	Castellón	300.000

La Universidad de San Carlos cuenta con tres trabajos de graduación siendo Jorge Antonio Quintero Jordán, quien realizó la primera investigación de tesis titulada: “Biodiesel de higuierillo (*Ricinus communis* L.) como combustible en un motor diesel”, Herbert Roberto Romero Erazo con su trabajo de investigación titulado “Elaboración, Análisis y Comparación de Biodiesel a partir de Aceite de Palma usado (*Elaeis guineensis*) mediante dos procesos, a nivel de Planta Piloto” y Nelson Dario Barraza quien realizó el estudio “Análisis comparativo de la obtención de Biodiesel a partir de aceite crudo de Palma Africana, por medio de las reacciones esterificación-transesterificación y solo transesterificación a nivel laboratorio y Planta Piloto”. Sin embargo en ninguna de las tres anteriores investigaciones se realizó un análisis comparativo de Biodiesel obtenido de dos diferentes fuentes, aceite de palma africana refinado (oleína) y usado, ni se realizaron pruebas en un motor de combustión interna, con mezclas de altos contenidos de Biodiesel.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Biocombustible

El biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa – organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos, tales como el estiércol de la vaca. Es una fuente renovable de energía, a diferencia de otros recursos naturales como el petróleo, carbón y los combustibles nucleares.

Los combustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo en combustibles fósiles tradicionales, con la ventaja de que son renovables y tienen bajo impacto en el deterioro ambiental. Los biocombustibles más usados y desarrollados son el bioetanol y el Biodiesel.

- El bioetanol, también llamado *etanol de biomasa*, se obtiene a partir de maíz, caña de azúcar o remolacha. Brasil es el principal productor de Bioetanol (45% de la producción mundial), Estados Unidos representa el 44%, China el 6%, La Unión Europea el 3%, India el 1% y otros países el restante 1%.
- El Biodiesel, se fabrica a partir de aceites vegetales, que pueden ser ya usados o sin usar. En este último caso se suele usar raps o canola, los cuales son cultivados para este propósito. El principal productor de Biodiesel en el mundo es Alemania, que concentra el 63% de la producción. Le sigue Francia con el 17%, Estados Unidos con el 10%, Italia con el 7% y Austria con el 3%.

## 2.2. ¿Qué es el Biodiesel?

Se fabrica a partir de aceites vegetales, que puede ser oleína o aceite de desecho. Biodiesel no es lo mismo que aceite crudo vegetal y es producido en un proceso químico.

El Biodiesel es un combustible sustituto del gas-oil para motores diesel, el cual puede ser producido partiendo de materias primas agrícolas (aceites vegetales y/o grasas animales), metanol o etanol. El Biodiesel posee las mismas propiedades del combustible diesel empleado como combustible para automóviles, camiones, ómnibus y puede ser mezclado en cualquier proporción con el diesel obtenido de la refinación del petróleo.

No es necesario efectuar ninguna modificación en los motores para poder emplear este combustible. Importantes fabricantes de vehículos europeos efectuaron pruebas con resultados satisfactorios en automóviles, camiones. En Estados Unidos es el único combustible alternativo que responde a las directivas EPA Tier I Health Effects Sección 211 (b) de Clean Air Act.

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<sub>2</sub>): 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<sub>2</sub>): 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.

### **2.2.1. Definiciones**

El término Biodiesel tiene una definición técnica específica que ha sido acordada por medio de un dificultoso proceso por miembros de la industria y del gobierno con la total aprobación de la American Society of Testing and Materials (ASTM), la primera organización que define los estándares para combustibles y aditivos de combustibles.

La definición es empleada para propósitos tales como designación alternativa de combustibles, registraci3n EPA u otros prop3sitos regulatorios.

Hay dos definiciones para elegir: una definici3n general que es simple, para todo p3blico y la definici3n t3cnica que podr3a ser adoptada por los clientes para definiciones legales o por entidades del gobierno para prop3sitos regulatorios.

2.2.1.1. **Definici3n general de Biodiesel:** Biodiesel es un combustible renovable, dom3stico para motores de encendido diesel y es derivado de aceites tales como el aceite de soja, canola, girasol, palma africana, etc., que alcanza las especificaciones de la Norma ASTM D 6751.

2.2.1.2. **Definici3n t3cnica para Biodiesel ASTM D 6751 y mezclas de Biodiesel:** Biodiesel es un combustible compuesto de mono-alkyl esterres de cadena larga derivados de 3cidos grasos obtenidos de aceites vegetales y grasa animal, designado como B100 y alcanza los requerimientos de la Norma ASTM D 6751.

2.2.1.3. **Mezcla de Biodiesel:** Es una mezcla de combustible Biodiesel alcanzando los requerimientos de la Norma ASTM D 6751 con combustible diesel derivado del petr3leo, designado BXX donde XX representa el porcentaje de Biodiesel en la combinaci3n.

2.2.1.4. **Registro EPA y pruebas de efectos sobre la salud:** Todos los combustibles y aditivos de combustibles deben estar registrados con la US EPA y sujetos a las regulaciones por los efectos sobre la salud contenidos en el 40 CFR Part 79.

Las compañías deben registrar sus combustibles individualmente con la EPA en orden de comercializarlos legalmente al público. Para registrar sus combustibles las compañías deben completar las pruebas sobre efectos para la salud aplicable a su combustible específico o hacer arreglos con una entidad que ha completado las pruebas para poder usar los registros de esa entidad.

El National Biodiesel Board ha completado las pruebas requeridas sobre efectos para la salud como parte de la industria del Biodiesel y ha establecido criterios para hacer las pruebas a compañías buscando registrar sus Biodiesel con la EPA. Todo combustible que no alcanza las metas ASTM D 6751 no es considerado Biodiesel y por lo tanto no cae bajo el paraguas NBB. La adopción de D 6751 por la FTA asistirá a EPA y la industria del Biodiesel a prevenir de combustibles no registrados de ser vendidos ilegalmente como Biodiesel.

### 2.3. Producción de Biodiesel

Básicamente se elabora mediante la transesterificación de aceites con alcohol metílico o etílico en ambiente básico. Los promotores a emplear pueden ser soda cáustica o metilato sódico, ambos en solución metanólica o etanólica.

Desde el punto 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, tales como la colza, girasol, palma, soya. Otras posibilidades son emplear grasas animales de bajo costo y el aceite exhausto empleado para frituras.

La reacción de transesterificación es la siguiente:

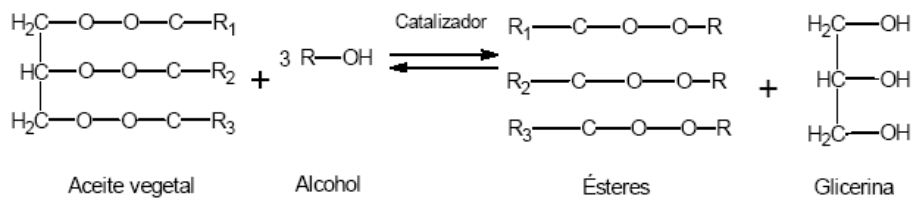
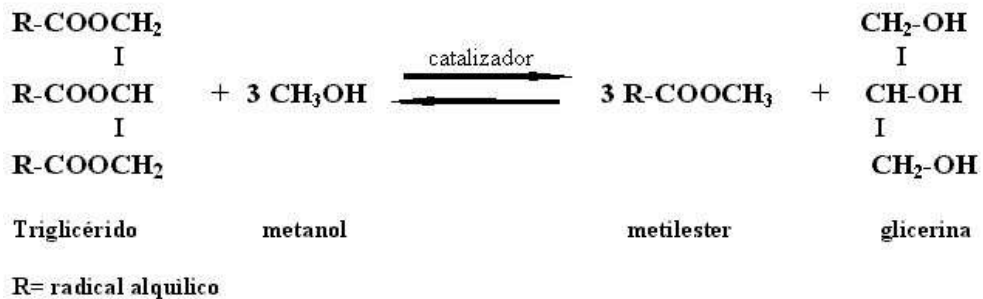
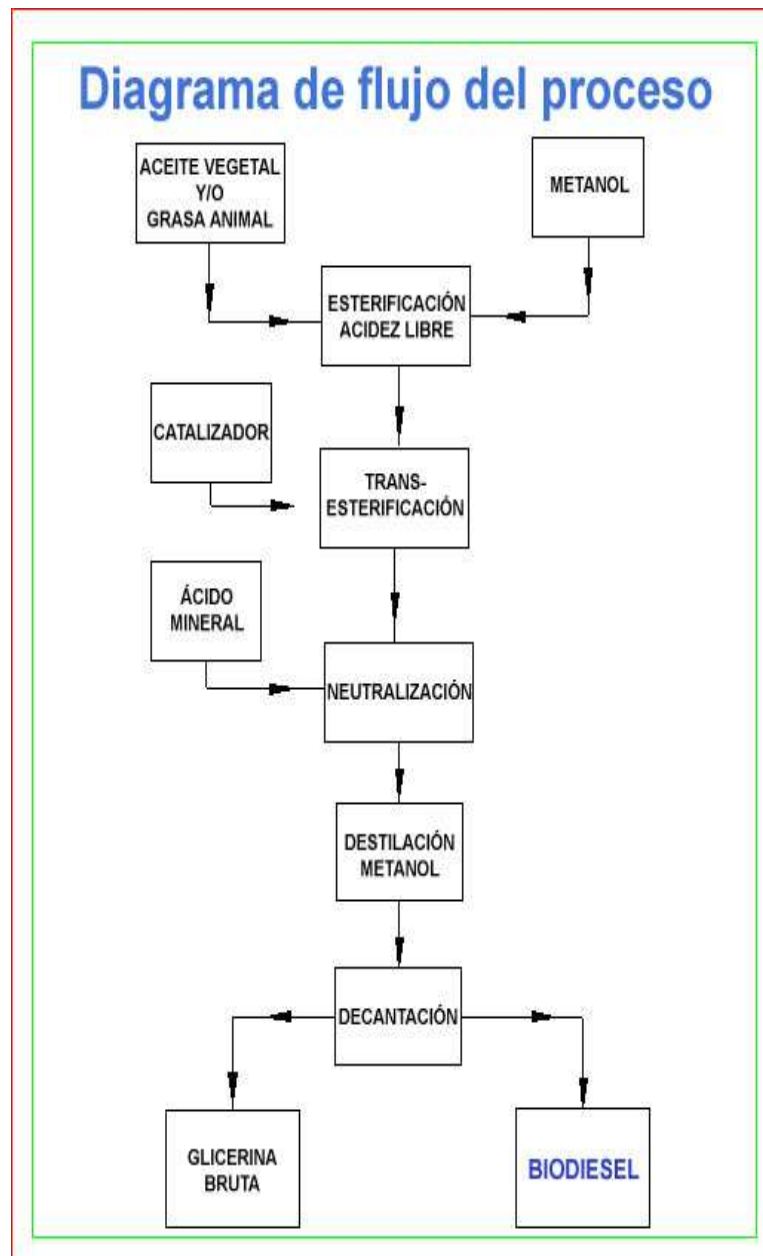


Figura 1. Reacción de transesterificación básica.

El proceso de obtención de Biodiesel se describe con el siguiente diagrama



## **2.4. Motores de combustión interna:**

Un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión, la parte principal de un motor.

Se utilizan motores de combustión interna de cuatro tipos:

- El motor cíclico Otto, cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, es el motor convencional de gasolina que se emplea en automoción y aeronáutica.
- El motor diesel, llamado así en honor del ingeniero alemán Rudolf Diesel, funciona con un principio diferente y suele consumir gasóleo. Se emplea en instalaciones generadoras de electricidad, en sistemas de propulsión naval, en camiones, autobuses y algunos automóviles. Tanto los motores Otto como los diesel se fabrican en modelos de dos y cuatro tiempos.
- El motor rotatorio.
- La turbina de combustión.

### **2.4.1. Estructura y funcionamiento**

Los motores Otto y los diesel tienen los mismos elementos principales.



2.4.1.1. **Cámara de combustión:** La cámara de combustión es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al interior. La posición hacia dentro y hacia fuera del pistón modifica el volumen que existe entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por un eje al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón.

En los motores de varios cilindros el cigüeñal tiene una posición de partida llamada espiga de cigüeñal y conectada a cada eje, con lo que la energía producida por cada cilindro se aplica al cigüeñal en un punto determinado de la rotación. Los cigüeñales cuentan con pesados volantes y contrapesos cuya inercia reduce la irregularidad del movimiento del eje. Un motor puede tener de 1 a 28 cilindros.

2.4.1.2. **Sistema de bombeo:** El sistema de bombeo de combustible de un motor de combustión interna consta de un depósito, una bomba de combustible y un dispositivo que vaporiza o atomiza el combustible líquido. Se llama carburador al dispositivo utilizado con este fin en los motores Otto. En los motores de varios cilindros el combustible vaporizado se conduce a los cilindros a través de un tubo ramificado llamado colector de admisión. Muchos motores cuentan con un colector de escape o de expulsión, que transporta los gases producidos en la combustión.

2.4.1.3. **Sistema de alimentación:** Cada cilindro toma el combustible y expulsa los gases a través de válvulas de cabezal o válvulas deslizantes. Un muelle mantiene cerradas las válvulas hasta que se abren en el momento adecuado, al actuar las levas de un árbol de levas rotatorio movido por el cigüeñal, estando el conjunto coordinado mediante la correa de distribución. En la década de 1980, este sistema de alimentación de una mezcla de aire y combustible se ha visto desplazado por otros sistemas más elaborados ya utilizados en los motores diesel. Estos sistemas, controlados por computadora, aumentan el ahorro de combustible y reducen la emisión de gases tóxicos.

2.4.1.4. **Encendido:** Todos los motores tienen que disponer de una forma de iniciar la ignición del combustible dentro del cilindro. Por ejemplo, el sistema de ignición de los motores Otto, existe un componente llamado bobina de encendido, el cual es un autotransformador de alto voltaje al cual se le conecta un conmutador que interrumpe la corriente del primario para que se induzca la chispa de alto voltaje en el secundario. Dichas chispas están sincronizadas con la etapa de compresión de cada uno de los cilindros, la chispa es dirigida cilindro específico de la secuencia utilizando un distribuidor rotativo y unos cables de grafito que dirigen la descarga de alto voltaje a la bujía. El dispositivo que produce la ignición es la bujía, un conductor fijado a la pared superior de cada cilindro.

Si la bobina esta en mal estado se sobrecalienta, esto produce perdida de energía, aminora la chispa de de las bujías y causa fallos en el sistema de encendido del automóvil. La bujía contiene en uno de sus extremos dos electrodos separados entre los que la

corriente de alto voltaje produce un arco eléctrico que enciende el combustible dentro del cilindro.

- 2.4.1.5. **Refrigeración:** Dado que la combustión produce calor, todos los motores deben disponer de algún tipo de sistema de refrigeración. Algunos motores estacionarios de automóviles y de aviones y los motores fueraborda se refrigeran con aire. Los cilindros de los motores que utilizan este sistema cuentan en el exterior con un conjunto de láminas de metal que emiten el calor producido dentro del cilindro.

En otros motores se utiliza refrigeración por agua, lo que implica que los cilindros se encuentran dentro de una carcasa llena de agua que en los automóviles se hace circular mediante una bomba. El agua se refrigera al pasar por las láminas de un radiador.

Es importante que el líquido que se usa para enfriar el motor no sea agua común y corriente porque los motores de combustión trabajan regularmente a temperaturas más altas que la temperatura de ebullición del agua, esto provoca una alta presión en el sistema de enfriamiento dando lugar a fallas en los empaques y sellos de agua así como en el radiador; se usa un anticongelante pues no hierve a la misma temperatura que el agua, si no a mucho más alta temperatura, tampoco se congelará a temperaturas muy bajas.

Otra razón por la cual se debe de usar un anticongelante es que este no produce sarro ni sedimentos que se adhieren en las paredes del motor y del radiador formando una capa aislante que

disminuirá la capacidad de enfriamiento del sistema. En los motores navales se utiliza agua del mar para la refrigeración.

- 2.4.1.6. **Sistema de arranque:** Al contrario que los motores y las turbinas de vapor, los motores de combustión interna no producen un par de fuerzas cuando arranca, lo que implica que debe provocarse el movimiento del cigüeñal para que se pueda iniciar el ciclo.

Los motores de automoción utilizan un motor eléctrico (el motor de arranque) conectado al cigüeñal por un embrague automático que se desacopla en cuanto arranca el motor. Por otro lado, algunos motores pequeños se arrancan a mano girando el cigüeñal con una cadena o tirando de una cuerda que se enrolla alrededor del volante del cigüeñal.

Otros sistemas de encendido de motores son los iniciadores de inercia, que aceleran el volante manualmente o con un motor eléctrico hasta que tiene la velocidad suficiente como para mover el cigüeñal; los iniciadores explosivos, que utilizan la explosión de un cartucho para mover una turbina acoplada al motor; oxígeno para alimentar las cámaras de combustión en los primeros movimientos (grandes motores). Los iniciadores de inercia y los explosivos se utilizan sobre todo para arrancar motores de aviones.

## **2.5. Tipos de motores**

### **2.5.1. Motor convencional del tipo Otto**

El motor convencional del tipo Otto es de cuatro tiempos. La eficiencia de los motores Otto modernos se ve limitada por varios factores, entre otros la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración.

En general, la eficiencia de un motor de este tipo depende del grado de compresión. Esta proporción suele ser de 8 a 1 ó 10 a 1 en la mayoría de los motores Otto modernos. Se pueden utilizar proporciones mayores, como de 12 a 1, aumentando así la eficiencia del motor, pero este diseño requiere la utilización de combustibles de alto índice de octano. La eficiencia media de

un buen motor Otto es de un 20 a un 25%: sólo la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica.

### **2.5.2. Motores diesel**

En teoría, el ciclo diesel difiere del ciclo Otto en que la combustión tiene lugar en este último a volumen constante en lugar de producirse a una presión constante. La mayoría de los motores diesel tienen también cuatro tiempos, si bien las fases son diferentes de las de los motores de gasolina.

En la primera fase se absorbe aire hacia la cámara de combustión. En la segunda fase, la fase de compresión, el aire se comprime a una fracción de su volumen original, lo cual hace que se caliente hasta unos 440 °C. Al final de la fase de compresión se inyecta el combustible vaporizado dentro de la cámara de combustión, produciéndose el encendido a causa de la alta temperatura del aire. En la tercera fase, la fase de potencia, la combustión empuja el pistón hacia atrás, transmitiendo la energía al cigüeñal. La cuarta fase es, al igual que en los motores Otto, la fase de expulsión.

Algunos motores diesel utilizan un sistema auxiliar de ignición para encender el combustible para arrancar el motor y mientras alcanza la temperatura adecuada.

La eficiencia de los motores diesel depende, en general, de los mismos factores que los motores Otto, y es mayor que en los motores de gasolina, llegando a superar el 40%. Este valor se logra con un grado de compresión de 14 a 1, siendo necesaria una mayor robustez, y los motores diesel son, por lo general, más pesados que los motores Otto. Esta desventaja se compensa con una mayor eficiencia y el hecho de utilizar combustibles más baratos.

Los motores diesel suelen ser motores lentos con velocidades de cigüeñal de 100 a 750 revoluciones por minuto (rpm o r/min), mientras que los motores Otto trabajan de 2.500 a 5.000 rpm. No obstante, en la actualidad, algunos tipos de motores diesel trabajan a velocidades similares que los motores de gasolina, pero por lo general con mayores cilindradas debido al bajo rendimiento del gas oil respecto al diesel.

### **2.5.3. Motor de dos tiempos**

Con un diseño adecuado puede conseguirse que un motor Otto o diesel funcione a dos tiempos, con un tiempo de potencia cada dos fases en lugar de cada cuatro fases. La eficiencia de este tipo de motores es menor que la de los motores de cuatro tiempos, pero al necesitar sólo dos tiempos para realizar un ciclo completo, producen más potencia que un motor cuatro tiempos del mismo tamaño.

El principio general del motor de dos tiempos es la reducción de la duración de los periodos de absorción de combustible y de expulsión de gases a una parte mínima de uno de los tiempos, en lugar de que cada operación requiera un tiempo completo.

El diseño más simple de motor de dos tiempos, utiliza en lugar de válvulas de cabezal, las válvulas deslizantes u orificios (que quedan expuestos al desplazarse el pistón hacia atrás).

En los motores de dos tiempos la mezcla de combustible y aire entra en el cilindro a través del orificio de aspiración cuando el pistón está en la posición más alejada del cabezal del cilindro.

La primera fase es la compresión, en la que se enciende la carga de mezcla cuando el pistón llega al final de la fase. A continuación, el pistón se desplaza hacia atrás en la fase de explosión, abriendo el orificio de expulsión y permitiendo que los gases salgan de la cámara.

#### **2.5.4. Motor Wankel**

En la década de 1950, el ingeniero alemán Félix Wankel completó el desarrollo un motor de combustión interna con un diseño revolucionario, actualmente conocido como Motor Wankel. Utiliza un rotor triangular-lobular dentro de una cámara ovalada, en lugar de un pistón y un cilindro.

La mezcla de combustible y aire es absorbida a través de un orificio de aspiración y queda atrapada entre una de las caras del rotor y la pared de la cámara. La rotación del rotor comprime la mezcla, que se enciende con una bujía. Los gases se expulsan a través de un orificio de expulsión con el movimiento del rotor. El ciclo tiene lugar una vez en cada una de las caras del rotor, produciendo tres fases de potencia en cada giro.

El motor de Wankel es compacto y ligero en comparación con los motores de pistones, por lo que ganó importancia durante la crisis del petróleo en las décadas de 1970 y 1980. Además, funciona casi sin vibraciones y su sencillez mecánica permite una fabricación barata. No requiere mucha refrigeración, y su centro de gravedad bajo aumenta la seguridad en la conducción. No obstante salvo algunos ejemplos prácticos como algunos vehículos Mazda, ha tenido problemas de durabilidad.



### **3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Localización**

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

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

### **3.2. Recursos Humanos**

Investigadora: Br. Leslie Mariana Flores Barrios

Asesor: Ing. Q. José Eduardo Calderón García

### **3.3. Recursos materiales**

Para cada unidad experimental:

Aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) Usado

Oleína de palma africana (*Elaeis guineensis*)

Hidróxido de sodio

Alcohol etílico

Agua destilada

### **3.4. Equipo y cristalería**

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

Marmita de extracción

Tapadera-Agitador de la marmita de extracción

Marmita de destilación

Bomba de vacío

Caldera de alimentación de vapor

Condensadores de la marmita de destilación

Tanque recuperador de solvente

### **3.5. Metodología experimental**

La comparación de la utilización de Biodiesel obtenido a partir de dos distintas fuentes, oleína y aceite usado de palma africana, se realizó evaluando las propiedades fisicoquímicas de cada Biodiesel y comparándolas con las establecidas para el Diesel 2- D (automotriz).

Posteriormente se evaluó, al someter dicho aceite, pre-tratado (remoción de impurezas y agua), para el estudio de su funcionamiento en un motor estacionario de un pistón, para lo cual se realizaron mediciones de las revoluciones por minuto de mezclas de altos porcentajes de Biodiesel con Diesel 2-D.

### **3.6. Descripción del método**

Los métodos propuestos para la obtención de Biodiesel de palma africana a partir de oleína y aceite usado para su utilización en un motor estacionario de un pistón en mezclas de alto porcentajes de Biodiesel es el siguiente:

#### **3.6.1. Análisis Fisicoquímico**

Se obtuvo Biodiesel a partir de dos diferentes fuentes: Biodiesel a partir de oleína de palma africana y Biodiesel a partir de aceite usado de palma africana, utilizando el método de transesterificación, posteriormente se procedió a realizar el análisis fisicoquímico en el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas, tomando como base los 10 análisis realizados al Diesel 2-D que se comercializa en el país.

Estos análisis se especifican en el Acuerdo Ministerial 204-2007 del Ministerio de Energía y Minas, el cual fue publicado en el Diario de Centroamérica en fecha 22 de noviembre de 2007. De acuerdo a este Acuerdo, si las muestras analizadas cumplen con las especificaciones se cataloga como de buena calidad para su utilización. Cada uno de los análisis realizados están especificados y se rigen bajo las normas ASTM.

### **3.6.2. Verificación en un motor estacionario de un pistón.**

Se realizaron mezclas de Diesel con Biodiesel en alto porcentajes, siendo estas mezclas 50, 60, 70, 80, 90 y 100% respectivamente. Según la norma ASTM estas mezclas deben ser denominadas como BXX donde XX denota la cantidad de Biodiesel de la mezcla, por lo que para efectos de esta investigación, éstas se denominaron B50, B60, B70, B80, B90 y B100 respectivamente.

Cada una de las mezclas fue utilizada para poner en marcha el motor estacionario de un pistón proporcionado por la escuela de Ingeniería en Mecánica Industrial de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Las corridas se realizaron de la siguiente forma. Se vació la cámara de combustible y se adicionó 1 galón de la mezcla. El motor se puso en marcha y se dejó estabilizar para proceder a realizar la toma de las revoluciones por minuto, que cada una de las mezclas proporcionaba. Esto se realizó con la ayuda de un tacómetro, el cual mide las revoluciones por medio de un rayo laser. Este procedimiento fue utilizado tres veces para cada una de las mezclas de Biodiesel.

#### 4. RESULTADOS

**Tabla IV. Tabla comparativa de análisis de propiedades de Biodiesel como combustible a partir de oleína y aceite usado.**

DESCRIPCIÓN	Método de análisis ASTM	Biodiesel Oleína	Biodiesel Aceite Usado	DIESEL	Especificación Diesel No. 2-D
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93	128	141	65	52 MIN.
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	0.05	0.06	0.4	0.5 MAX.
CORROSIÓN EN LA TIRA DE COBRE, 3h, 50°C	ASTM D-130	1	1	1	No. 2 MAX.
CALOR DE COMBUSTIÓN SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	40.16	39.83	39.6	-----
GRAVEDAD API, °API	ASTM D-287	30.5	30.8	34	REPORTAR
VISCOSIDAD CINEMÁTICA, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D-445	4.8	4.7	3.6	1.9 - 4-1
CENIZA, % masa	ASTM D-482	0.002	0.003	< 0.01	0.01 MAX.
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-976	49	50	46	45 MIN.
COLOR ASTM	ASTM D-1500	1.8	1.2	2.5	REPORTAR
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.05 MAX.
DESTILACIÓN, °C, 760 mmHg en base a lo recuperado	ASTM D-86	346	354	330	360 MAX.

**Fuente: Resultados de Análisis, Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas.**

**Tabla V. Poder calorífico calculado para mezclas de Diesel con alto porcentajes de Biodiesel, a partir de oleína de palma africana.**

**Poder calorífico de Biodiesel a partir de oleína de palma africana**

COMBUSTIBLE	CALOR DE COMBUSTIÓN MJ/Kg	CALOR DE COMBUSTIÓN BTU/lb
DIESEL (D100)	39.600	17028.00
D50/B50	39.880	17148.40
D40/B60	39.936	17172.48
D30/B70	39.992	17196.56
D20/B80	40.048	17220.64
D10/B90	40.104	17244.72
OLEINA (B100)	40.160	17268.80

Fuente: Sección de datos calculados

**Tabla VI. Poder calorífico calculado para mezclas de Diesel con alto porcentajes de Biodiesel a partir de oleína de palma africana.**

**Poder calorífico a partir de aceite usado de palma africana**

COMBUSTIBLE	CALOR DE COMBUSTIÓN MJ/Kg	CALOR DE COMBUSTIÓN BTU/lb
DIESEL (D100)	39.600	17028.00
D50/B50	39.715	17077.45
D40/B60	39.738	17087.34
D30/B70	39.761	17097.23
D20/B80	39.784	17107.12
D10/B90	39.807	17117.01
ACEITE USADO (B100)	39.830	17126.90

Fuente: Sección de datos calculados

**Tabla VII. Revoluciones por minuto y potencia de un motor con mezclas de Biodiesel a partir de oleína y aceite usado de palma africana en altos porcentajes con diesel 2-D (automotriz)**

**POTENCIA DE BIODIESEL A PARTIR DE OLEÍNA**

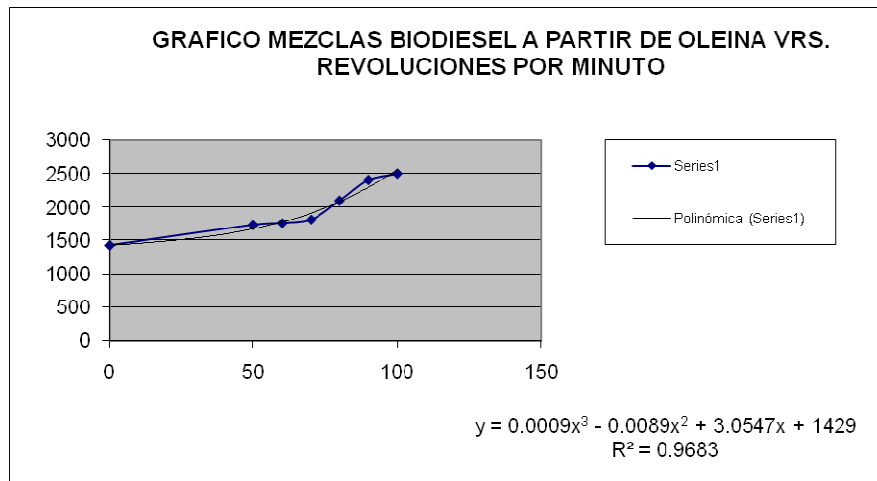
COMBUSTIBLE	RPM PROMEDIO	TORQUE		POTENCIA	
		N-m	lb-pie	Kw	hp
BO	1426.0	16.23	12	2.42345	3.25819
B50	1727.7	16.23	12	2.93613	3.94745
B60	1756.0	16.23	12	2.98428	4.01219
B70	1811.0	16.23	12	3.07775	4.13785
B80	2098.7	16.23	12	3.56663	4.79513
B90	2405.0	16.23	12	4.08724	5.49505
B100	2500.0	16.23	12	4.24869	5.71211

**POTENCIA DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE USADO**

COMBUSTIBLE	RPM PROMEDIO	TORQUE		POTENCIA	
		N-m	lb-pie	Kw	hp
B0	1426.0	16.23	12	2.42345	3.25819
B50	1588.3	16.23	12	2.69934	3.62909
B60	1602.3	16.23	12	2.72313	3.66108
B70	1745.3	16.23	12	2.96615	3.98781
B80	2093.0	16.23	12	3.55700	4.78218
B90	2358.3	16.23	12	4.00793	5.38842
B100	2497.3	16.23	12	4.24416	5.70602

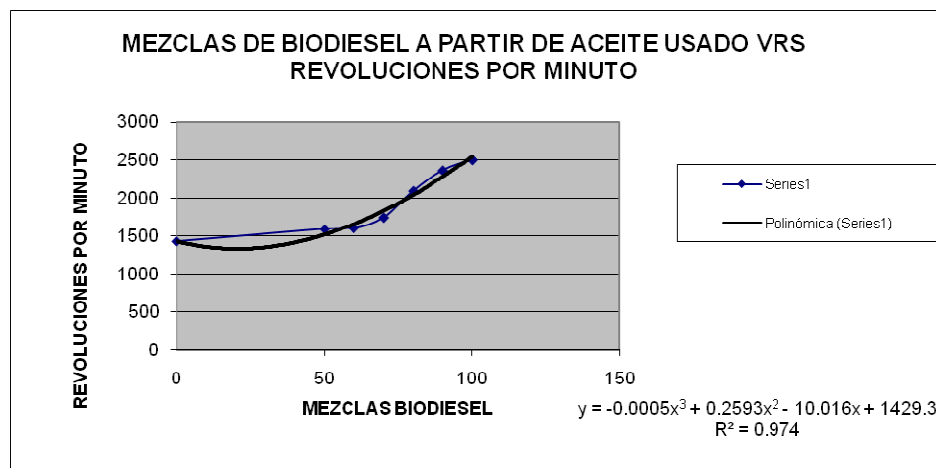
Fuente: Sección de datos calculados.

**Figura 1. Mezclas de Biodiesel a partir de oleína de palma africana vrs. revoluciones por minuto.**



Fuente: Sección de datos calculados

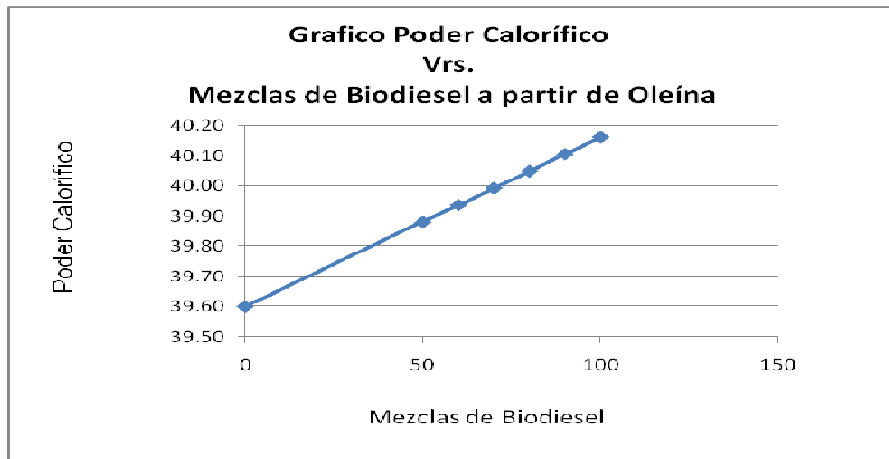
**Figura 2. Mezclas de Biodiesel a partir de aceite usado de palma africana vrs. revoluciones por minuto.**



Fuente: Sección de datos calculados.

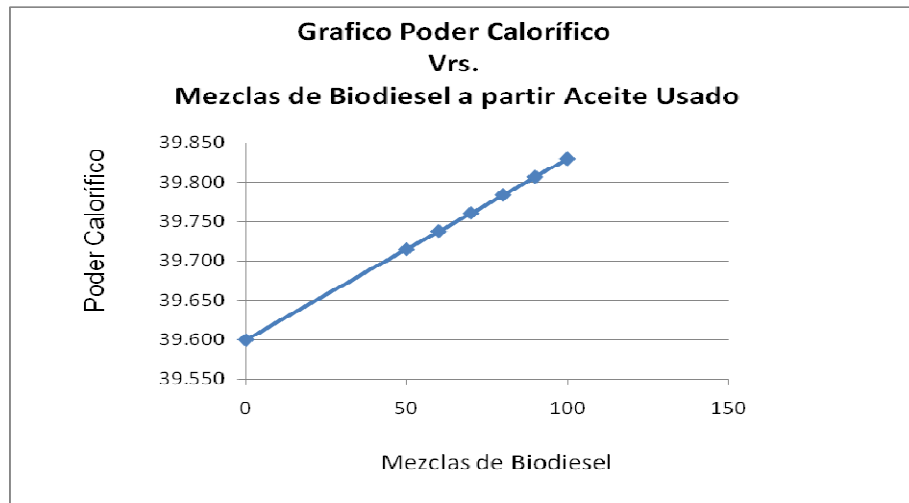


**Figura 3. Mezclas de Biodiesel a partir de oleína de palma africana vrs. poder calorífico.**



Fuente: Sección de datos calculados.

**Figura 4. Mezclas de Biodiesel a partir de aceite usado de palma africana vrs. poder calorífico.**



Fuente: Sección de datos calculados.

**Tabla VIII. Resumen de análisis de varianzas para Biodiesel preparado a partir de oleína de palma africana.**

**RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA  
BODIESEL A PARTIR DE OLEINA**

FUENTE DE LA VARIANZA	SS	df	MS	F	F Nivel de Signif. 0.05	F Nivel de Signif. 0.01
ENTRE LOS GRUPOS	1735046	5	347009.3	6616.702	3.11	5.06
DENTRO DE LOS GRUPOS	629.3333	12	52.44444			
TOTAL	1735676	17				

Fuente: Sección de datos calculados

**Tabla IX. Resumen de análisis de varianzas para Biodiesel preparado, a partir de oleína de palma africana.**

**RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA  
BODIESEL A PARTIR DE ACEITE USADO DE PALMA AFRICANA**

FUENTE DE LA VARIANZA	SS	df	MS	F	F Nivel de Signif. 0.05	F Nivel de Signif. 0.01
ENTRE LOS GRUPOS	2325983	5	465196.6	3666.173	3.11	5.06
DENTRO DE LOS GRUPOS	1522.667	12	126.8889			
TOTAL	2327506	17				

Fuente: Sección de datos calculados

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este trabajo se evaluó la posibilidad de la utilización de Biodiesel en un motor estacionario de un pistón, a partir de dos fuentes distintas, aceite usado y oleína de palma africana, utilizando mezclas en alto porcentajes de Biodiesel con diesel utilizado comercialmente.

Para ello se utilizó la reacción de transesterificación ya que los niveles de conversión son mayores a los que presenta la reacción de esterificación-transesterificación de Fischer, ya que ésta es una reacción reversible y lenta.

Adicionalmente a esto, al agregar el catalizador ácido se acelera la reacción pero no influye grandemente sobre el efecto estérico de los sustituyentes. A mayor masa de los ácidos grasos o del alcohol, disminuye la velocidad de reacción por lo que aún con la adición del catalizador, sin calentamiento, la reacción simplemente tarda mucho en llevarse a cabo. Al adicionar un exceso de catalizador se genera agua, que de no ser removida adecuadamente promoverá la reacción de saponificación en la etapa de transesterificación.

Esta reacción fue realizada a nivel de planta piloto por lo que se trabajó con lotes de 18 litros, compuestos por 8.37 litros de aceite y 10.24 litros de etanol, basados en los cálculos estequiométricos, utilizando el 600% en exceso de alcohol y un 2% de catalizador, siendo de 154.14 g de NaOH, que se agregaron al alcohol y se mezclaban previamente a su reacción con el aceite en el reactor. En esta mezcla previa se vuelve más reactiva a la cadena hidrocarbonada del alcohol para favorecer la reacción.

Al finalizar la reacción, se observan dos fases, una liviana y otra pesada, la fase pesada contiene glicerina y otros subproductos de la reacción y la fase liviana que contiene el Biodiesel y alcohol en exceso que no reaccionó. Se procedió a

realizar la evaporación del alcohol en exceso para la obtención de Biodiesel y su posterior análisis. Es necesario que al obtener la fase liviana se le realicen lavados con agua destilada para remover impurezas y demás trazas, así como para estabilizar el pH de la muestra para que esta pueda ser analizada.

Al Biodiesel obtenido se le realizaron las pruebas establecidas para la determinación de la calidad y propiedades necesarias para su comparación con el diesel automotriz y determinar si es un producto comercialmente aceptable. De las 10 pruebas realizadas para cada una de las muestras se encontraron que 9 de los resultados se hallan dentro de los límites establecidos en la legislación nacional.

La especificación que se encuentra fuera de los valores permisibles es la viscosidad cinemática, siendo de 4.8 y 4.7 mm<sup>2</sup>/s para el Biodiesel elaborado a partir de oleína y aceite usado de palma africana respectivamente comparada con 1.9 – 4.1 que son los valores establecidos por la norma ASTM D-445. Esta variable es de vital importancia ya que afecta directamente al proceso de atomización, penetración, evaporación y mezcla con el aire al quemarse, por lo que puede retrasar el tiempo de ignición.

Por lo anterior, tanto el Biodiesel elaborado a partir de oleína y el elaborado a partir de aceite usado de palma africana cumplieron con los requisitos para ser evaluadas y utilizados en motores para su comparación experimental con el diesel comercial.

Para verificar el funcionamiento de las muestras de Biodiesel como combustible se realizaron pruebas en un motor de diesel tipo Deutz de 1 Pistón. Los datos de la tabla VII (pagina 29) muestran que si funcionó el motor con mezclas de 50, 60, 70, 80, 90 y 100% de Biodiesel.

La potencia y revoluciones por minuto desarrolladas por el motor aumentan proporcionalmente al aumentar la fracción de Biodiesel, casi superando la potencia desarrollada por el diesel automotriz. Se observa que el índice de cetanos en el Biodiesel es mayor al establecido para el diesel de uso automotriz, como se observa en la tabla IV (Página 27) para el Biodiesel elaborado a partir de oleína y el elaborado a partir de aceite usado de palma africana es de 49 y 50 respectivamente, comparado contra 46 del diesel. El número de cetano es un indicador de las propiedades de la ignición de los combustibles. Se trata de una medida de la voluntad de un combustible a encender cuando esta comprimido. Cuanto mayor sea el número de cetanos, más eficiente es el combustible, se observa entonces que el Biodiesel proporcionará un número mayor de cetano debido a su contenido de oxígeno.

Se realizaron gráficas de cada una de las mezclas de Biodiesel a partir de oleína y aceite usado de palma africana para observar su comportamiento. Se puede decir que las revoluciones por minuto en un motor de combustión interna son directamente proporcionales a la cantidad de Biodiesel en la mezcla. A mayor cantidad de Biodiesel mayores serán las revoluciones por minuto generadas en el motor. Adicionalmente a esto se realizó una correlación para obtener una ecuación para determinar dicho comportamiento, de los datos graficados fue posible obtener una ecuación polinomial de orden 3 con un valor de  $R^2$  de 0.974 y 0.9974 para el Biodiesel obtenido a partir de oleína y Biodiesel obtenido a partir de aceite usado respectivamente.

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

Del cálculo de los poderes caloríficos para cada una de las mezclas se observa que a mayor cantidad de Biodiesel en la mezcla se obtendrá un mayor poder calorífico, tal y como se muestra en las tablas 5 y 6 (pagina 28), esto debido a que el Biodiesel contiene más cantidad de oxígeno que el que contiene el diesel 2-D, haciendo más fácil la creación de turbulencias para las mezclas de combustible con el aire, además, el mecanismo de combustión de los esteres parece ser similar al del diesel, las moléculas se descomponen a altas temperaturas generando radicales libres que promueven la autoignición.

Así mismo se realizaron las gráficas de poder calorífico vrs. mezclas de Biodiesel para cada una de las muestras, de las cuales se puede decir que el poder calorífico es directamente proporcional a la cantidad de Biodiesel en las mezclas. A mayor fracción de Biodiesel en cada una de las muestras mayores serán los poderes caloríficos proporcionados

Del análisis de varianzas realizado para cada una de las muestras se rechaza la hipótesis nula, ya que el comportamiento de cada una de las mezclas de Biodiesel con el diesel 2-D es diferente. Esto tomando como referencia el comportamiento que ofrece el diesel 2-D de uso comercial.

Adicionalmente de este análisis se puede definir que la mezcla que presenta mejores resultados es la mezcla B90, la cual contiene 90% Biodiesel a partir de oleína y 10% diesel, con un numero de RPM de 2405 y una potencia de 5.494 hp y se confirma por su poder calorífico de 40.104 MJ/Kg.

## CONCLUSIONES

1. El Biodiesel obtenido a partir de oleína y aceite usado de palma africana cumple con las especificaciones de calidad establecidas para los combustibles comerciales, según el Acuerdo Ministerial 204-2007 del Ministerio de Energía y Minas
2. Las mezclas de 50, 60, 70, 80, 90 y 100% de Biodiesel con el diesel 2-D (automotriz), respectivamente, funcionaron en un motor de un pistón tipo Deutz de arranque manual ubicado en el laboratorio de motores de combustión interna de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos.
3. Se obtiene mayor cantidad de revoluciones por minuto y potencia en las mezclas que utilizan Biodiesel, a partir de oleína de palma africana.
4. Del análisis estadístico se rechaza la hipótesis nula, el rendimiento de la mezcla de Biodiesel con diesel comercial, medido como la potencia producida y las revoluciones por minuto en un motor de combustión interna de un pistón, no muestra diferencias significativas en relación con el diesel No. 2-D (automotriz).
5. La mezcla de Biodiesel que presenta mayor potencia es la que contiene 90% Biodiesel a partir de oleína de palma africana y 10% de diesel 2-D con una potencia de 5.495 hp comparada con 3.258 del diesel utilizado.
6. La mezcla de Biodiesel que presenta mayor poder calorífico es la que contiene 90% Biodiesel a partir de oleína de palma africana y 10% de diesel 2-D, la cual es de 40.104 MJ/Kg comparada con 39.6 MJ/Kg del diesel utilizado.





## RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio comparativo de las propiedades fisicoquímicas de Biodiesel obtenido a partir de diferentes fuentes de aceites vegetales.
2. Realizar un estudio comparativo de las propiedades fisicoquímicas de diferentes mezclas de Biodiesel con Diesel 2-D.
3. Realizar un estudio del funcionamiento de un motor utilizando Biodiesel al 100%, para determinar cuáles son los cambios a realizar para un óptimo funcionamiento.
4. Realizar un estudio de modificación del Biodiesel a fin de ser utilizado al 100% en motores.
5. Realizar un análisis de pre-factibilidad para la producción de Biodiesel, a Nivel de Planta Piloto y a nivel Industrial.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Seese, William y William Daub. **Química**. 5a edición. México: Prentice-Hall, 1995. 209 pp.
2. Glab, Edward. **Del yacimiento a la refinería**. Presentación de la Industria Petrolera a los medios de prensa de Guatemala. Noviembre, 1994.
3. Dirección General de Hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas, República de Guatemala. **Estadísticas de Hidrocarburos, Año 2004**. Guatemala: Departamento de Comercialización y Precios, MEM, Marzo 2005. 1-8 pp.
4. McMurry, John. **Química Orgánica**. 5a edición. México: International Thomson Editores, 2000. 1119 pp.
5. Horton, Robert y otros. **Bioquímica**. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1995. 9-6 pp.
6. Stauffer, Clyde. **Fats & Oils**. Eagan Press Handbook Series. EEUU: Eagan Press, 1996. 50 pp.
7. González Castillo, Ana Zeneida. **Utilización de Aceite de palma africana par la fabricación de candelas aromáticas**. Tesis Ing. Química. Guatemala, Universidad del Valle, 1998. 8-9, 12-14 pp.
8. Irwin R. Miller, Jhon E. Freund, Richard Johnson, **Probabilidad y Estadística para Ingenieros**. Cuarta Edición, Pág. 404



## BIBLIOGRAFÍA

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

## BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA

1. [www.elperiodico.com.gt](http://www.elperiodico.com.gt)
2. <http://www.lubrizol.com/DieselEngines/default.asp>
3. <http://www.Biodiesel.org/resources/definitions>
4. <http://www.econosur.com/notas/Biodiesel2.htm>. **Biodiesel**. Guatemala, mayo de 2004.
5. <http://www.dieselforum.org/factsheet/cleandiesel.html>. **Diesel**. Guatemala, enero 2005.
6. [http://www.Biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/prod\\_quality.pdf](http://www.Biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf). **Biodiesel**. Guatemala, enero 2005.
7. [http://journeytoforever.org/Biodiesel\\_make.html](http://journeytoforever.org/Biodiesel_make.html). **Biodiesel**. Guatemala, mayo 2004.
8. <http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodie lar/biodie lar.pdf>. **Biodiesel**. Guatemala, marzo 2001
9. <http://www.dangerouslaboratories.org/Biodiesel.html>. **Biodiesel**. Guatemala, junio 2004.
10. <http://www.corpodib.com/estudios2.pdf>. **Esteres**. Guatemala, octubre 2005
11. [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/educacion\\_ambiental/Ed ucamII/publicaciones/recursos\\_naturales\\_3\\_3.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/educacion_ambiental/Ed ucamII/publicaciones/recursos_naturales_3_3.pdf). **Ambiente y biocombustibles**. Guatemala, enero 2005.

## APÉNDICE

### DATOS ORIGINALES

**Tabla X. Datos originales de revoluciones en un motor estacionario de un pistón, utilizando Biodiesel a partir de aceite usado de palma africana.**

COMBUSTIBLE	RPM			PROMEDIO
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	
B0	1426	1426	1426	1426
B50	1580	1603	1582	1588
B60	1600	1605	1602	1602
B70	1756	1740	1740	1745
B80	2092	2112	2075	2093
B90	2360	2355	2360	2358
B100	2488	2512	2492	2497

**Tabla XI. Datos originales de revoluciones en un motor estacionario de un pistón, utilizando Biodiesel a partir de oleína de palma africana.**

COMBUSTIBLE	RPM			PROMEDIO
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	
B0	1426	1426	1426	1426
B50	1730	1724	1729	1728
B60	1755	1755	1758	1756
B70	1810	1813	1810	1811
B80	2088	2096	2112	2099
B90	2398	2405	2412	2405
B100	2490	2500	2510	2500





## MUESTRA DE CÁLCULO

### 1. Cálculo de las RPM promedio

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

Ejemplo 1. Al tomar como referencia los datos de la mezcla B50 tenemos:

$$\text{RPM}_{\text{prom}} = (1730+1724+1729)/3 = 1728 \text{ RPM}$$

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

$$T = F * d$$

Donde: T es el torque o par motor

F la fuerza del freno (4 lb)

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

Ejemplo 2. De los datos anteriores

$$T = (4 \text{ lb}) * (3 \text{ pies}) = 12 \text{ lb-pie}$$

$$12 \text{ lb-pie} * (1 \text{ N-m} / 0.7373 \text{ lb-pie}) = 16.23 \text{ N-m}$$

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

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

Ó

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

Ejemplo 3. Tomando las RPM promedio del combustible diesel

$$P = (12\text{lb-pie}) * (1426 \text{ RPM}) / 5252 = 3.2581 \text{ hp}$$

Ó

$$P = (16.23 \text{ N-m}) * (1426 \text{ RPM}) / 9550 = 2.4234 \text{ kw}$$

### 4. Cálculo del Calor de Combustión para las mezclas de Biodiesel con Diesel 2-D

$$Cp_{BX} \text{ (MJ/Kg)} = X_D * Cp_D + X_B * Cp_B$$

Ò

$$Cp_{BX} \text{ (BTU/lb)} = \frac{X_D * Cp_D + X_B * Cp_B}{430}$$

Donde:  $X_D$  es la fracción de Diesel en la mezcla

$Cp_D$  Calor de Combustión del Diesel

$X_B$  es la fracción de Biodiesel en la mezcla

$C_{pB}$  Calor de combustión del Biodiesel

Ejemplo: Para la mezcla B50 de Diesel-Oleína

$$(0.5) \cdot (39.6 \text{ MJ}) + (0.5) \cdot (40.16) = 39.88 \text{ MJ/Kg}$$

Ó

$$((0.5) \cdot (39.6 \text{ MJ}) + (0.5) \cdot (40.16)) / 430 = 17148.4$$



## ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 1. Cálculo de suma total de los cuadrados

$$\Sigma X_t^2 = \Sigma X^2 - \frac{(\Sigma X)^2}{N}$$

Ejemplo 1. Suma total de cuadrados para oleína

$$\Sigma X_t^2 = 77360177 - \frac{(36895)^2}{18} = 1735676$$

### 2. Calculo de suma de cuadrados entre los grupos

$$\Sigma X_b^2 = \frac{(\Sigma X_1)^2}{n_1} + \frac{(\Sigma X_2)^2}{n_2} + \frac{(\Sigma X_3)^2}{n_3} \dots - \frac{(\Sigma X)^2}{N}$$

Ejemplo 2. Suma de cuadrados entre los grupos de oleína

$$\Sigma X_b^2 = (5183/3)+(5268/3)+(5433/3)+(6296/3)+(7215/3)+(7500/3) - ((36895)^2/18)$$

$$\Sigma X_b^2 = 1735046$$

### 3. Cálculo de suma de cuadrados dentro de los grupos

$$\sum X_b^2 = \sum X_1^2 - \frac{(\sum X_1)^2}{n_1} + \sum X_2^2 - \frac{(\sum X_2)^2}{n_2} \dots +$$

Ejemplo 3. Suma de cuadrados dentro de los grupos de oleína

$$\sum X_b^2 = 8954517 - \frac{(5183)^2}{3} + 9250614 - \frac{(5268)^2}{3} + \dots$$

$$\sum X_b^2 = 629.33$$

## ANEXOS

### DATOS CALCULADOS

Tabla XII. Revoluciones por Minuto y Potencias calculadas para mezclas de Biodiesel- Diesel 2-D en un motor estacionario de un pistón.

#### POTENCIA DE BODIESEL A PARTIR DE OLEINA

COMBUSTIBLE	corrida 1	corrida 2	corrida 3	RPM PROMEDIO	TORQUE		POTENCIA	
					N-m	lb-pie	Kw	hp
BO	1426	1426	1426	1426.0	16.23	12	2.42345	3.25819
B50	1730	1724	1729	1727.7	16.23	12	2.93613	3.94745
B60	1755	1755	1758	1756.0	16.23	12	2.98428	4.01219
B70	1810	1813	1810	1811.0	16.23	12	3.07775	4.13785
B80	2088	2096	2112	2098.7	16.23	12	3.56663	4.79513
B90	2398	2405	2412	2405.0	16.23	12	4.08724	5.49505
B100	2490	2500	2510	2500.0	16.23	12	4.24869	5.71211

#### POTENCIA DE BODIESEL A PARTIR DE ACEITE USADO

COMBUSTIBLE	corrida 1	corrida 2	corrida 3	RPM PROMEDIO	TORQUE		POTENCIA	
					N-m	lb-pie	Kw	hp
B0	1426	1426	1426	1426.0	16.23	12	2.42345	3.25819
B50	1580	1603	1582	1588.3	16.23	12	2.69934	3.62909
B60	1600	1605	1602	1602.3	16.23	12	2.72313	3.66108
B70	1756	1740	1740	1745.3	16.23	12	2.96615	3.98781
B80	2092	2112	2075	2093.0	16.23	12	3.55700	4.78218
B90	2360	2355	2360	2358.3	16.23	12	4.00793	5.38842
B100	2488	2512	2492	2497.3	16.23	12	4.24416	5.70602

Tabla XIII. Calor de Combustión calculada para las mezclas de Biodiesel-Diesel 2-D.

Capacidad Calorífica de Biodiesel a partir de Oleína de Palma Afrinaca

COMBUSTIBLE	CALOR DE COMBUSTIÓN MJ/Kg	CALOR DE COMBUSTIÓN BTU/lb
DIESEL (D100)	39.600	17028.00
D50/B50	39.880	17148.40
D40/B60	39.936	17172.48
D30/B70	39.992	17196.56
D20/B80	40.048	17220.64
D10/B90	40.104	17244.72
OLEINA (B100)	40.160	17268.80

Capacidad Calorífica a partir de Aceite Usado de Palma Africana

COMBUSTIBLE	CALOR DE COMBUSTIÓN MJ/Kg	CALOR DE COMBUSTIÓN BTU/lb
DIESEL (D100)	39.600	17028.00
D50/B50	39.715	17077.45
D40/B60	39.738	17087.34
D30/B70	39.761	17097.23
D20/B80	39.784	17107.12
D10/B90	39.807	17117.01
ACEITE USADO (B100)	39.830	17126.90



Tabla XIV. Análisis de Varianzas de datos obtenidos de Biodiesel a partir de oleína de palma africana.

**ANÁLISIS DE VARIANZAS PARA BIODIESEL A PARTIR DE OLEINA**

B50		B60		B70		B80		B90		B100		
X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	
1730	2992900	1755	3080025	1810	3276100	2088	4359744	2398	5750404	2490	6200100	
1724	2972176	1755	3080025	1813	3286969	2096	4393216	2405	5784025	2500	6250000	
1729	2989441	1758	3090564	1810	3276100	2112	4460544	2412	5817744	2510	6300100	
<b>?</b>	<b>5183</b>	<b>8954517</b>	<b>5268</b>	<b>9250614</b>	<b>5433</b>	<b>9839169</b>	<b>6296</b>	<b>1.3E+07</b>	<b>7215</b>	<b>1.7E+07</b>	<b>7500</b>	<b>1.9E+07</b>

? X 36895  
 ? X<sup>2</sup> 77360177

**SUMA TOTAL DE CUADRADOS**

1735675.611

**SUMA DE LOS CUADRADOS ENTRE LOS GRUPOS**

1735046.278

**SUMA DE LOS CUADRADOS DENTRO DE LOS GRUPOS**

629.333333

**RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA  
 BIODIESEL A PARTIR DE OLEINA**

FUENTE DE LA VARIANZA	SS	df	MS	F	F Nivel de Signif. 0.05	F Nivel de Signif. 0.01
ENTRE LOS GRUPOS	1735046	5	347009	6616.7	3.11	5.06
DENTRO DE LOS GRUPOS	629.333	12	52.4444			
<b>TOTAL</b>	<b>1735676</b>	<b>17</b>				

Tabla XV. Análisis de varianzas de datos obtenidos de Biodiesel, a partir de oleína de palma africana.

**ANÁLISIS DE VARIANZAS PARA BODIESEL A PARTIR DE ACEITE USADO**

B50		B60		B70		B80		B90		B100		
X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	X	X <sup>2</sup>	
1580	2496400	1600	2560000	1756	3083536	2092	4376464	2360	5569600	2488	6190144	
1603	2569609	1605	2576025	1740	3027600	2112	4460544	2355	5546025	2512	6310144	
1582	2502724	1602	2566404	1740	3027600	2075	4305625	2360	5569600	2494	6220036	
<b>?</b>	<b>4765</b>	<b>7568733</b>	<b>4807</b>	<b>7702429</b>	<b>5236</b>	<b>9138736</b>	<b>6279</b>	<b>1.3E+07</b>	<b>7075</b>	<b>1.7E+07</b>	<b>7494</b>	<b>1.9E+07</b>

? X 35656  
 ? X<sup>2</sup> 72958080

**SUMA TOTAL DE CUADRADOS**

2327505.778

**SUMA DE LOS CUADRADOS ENTRE LOS GRUPOS**

2325983.111

**SUMA DE LOS CUADRADOS DENTRO DE LOS GRUPOS**






1522.666667

**RESUMEN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA**  
 BODIESEL A PARTIR DE ACEITE USADO DE PALMA AFRICANA

FUENTE DE LA VARIANZA	SS	df	MS	F	F Nivel de Signif. 0.05	F Nivel de Signif. 0.01
ENTRE LOS GRUPOS	2325983	5	465196.6	3666.173	3.11	5.06
DENTRO DE LOS GRUPOS	1522.667	12	126.8889			
TOTAL	2327506	17				




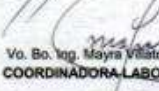


## ANEXOS

Figura 5. Análisis de propiedades de Biodiesel a partir de aceite usado de palma africana.

<b>LABORATORIO TECNICO</b>	 <b>MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS</b> REPUBLICA DE GUATEMALA	<b>MEM</b> PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-710-07 ORDEN No. L-297-07 GUATEMALA, 03-07-07																											
<b>RESULTADOS DE ANALISIS</b>																													
MUESTRA: <b>Biodiesel</b> PRESENTADA POR: Planta Piloto, Centro de Investigaciones RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido PROCEDENCIA: Muestra No. 1. Mariana Flores LOCALIZACION: Planta Piloto, Centro de Investigaciones FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 13-06-07 FECHA DE ANALISIS: del 21 al 26-06-07 PRECIO DE ANALISIS: \$ 68.12 ANALISTA: Edgar Sandoval																													
<b>DESCRIPCION</b>	<b>METODO DE ANALISIS</b>	<b>ESPECIFICACION (a)</b>	<b>RESULTADOS (b)</b>																										
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-83	.....	141																										
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	.....	0.06																										
CORROSION EN LA TIRA DE COBRE, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130	.....	1																										
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	.....	( d ) 39.83																										
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	.....	30.8																										
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm <sup>2</sup> /s (c)	ASTM D-445	.....	4.7																										
CENIZA, % masa	ASTM D-482	.....	0.003																										
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-876	.....	50																										
COLOR ASTM, No.	ASTM D-1500	.....	1.2																										
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796	.....	< 0.05																										
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86	.....	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">VOLUMEN %</th> <th style="text-align: center;">RECUPERADO °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>P. INICIAL</td><td>322</td></tr> <tr><td>5</td><td>330</td></tr> <tr><td>10</td><td>331</td></tr> <tr><td>20</td><td>334</td></tr> <tr><td>30</td><td>335</td></tr> <tr><td>40</td><td>337</td></tr> <tr><td>50</td><td>338</td></tr> <tr><td>60</td><td>338</td></tr> <tr><td>70</td><td>341</td></tr> <tr><td>80</td><td>344</td></tr> <tr><td>90</td><td>354</td></tr> <tr><td>P. FINAL ( a )</td><td>367</td></tr> </tbody> </table>	VOLUMEN %	RECUPERADO °C	P. INICIAL	322	5	330	10	331	20	334	30	335	40	337	50	338	60	338	70	341	80	344	90	354	P. FINAL ( a )	367
VOLUMEN %	RECUPERADO °C																												
P. INICIAL	322																												
5	330																												
10	331																												
20	334																												
30	335																												
40	337																												
50	338																												
60	338																												
70	341																												
80	344																												
90	354																												
P. FINAL ( a )	367																												
<b>OBSERVACIONES:</b> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No.192-06, no existen especificaciones para este producto          b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio          c) 1 mm<sup>2</sup>/s es equivalente a 1 cSt          d) 39.83 MJ/Kg es equivalente a 9515 Kcal/kg y a 2265 BTU/lb          e) Punto final de ebullición</p>																													
 Ing. Jairo Villalobos <b>SECCION DE HIDROCARBUROS</b>  Vo. Bo. Ing. Mayra Villalobos <b>COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS</b>																													
 																													
El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico																													
PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 478-0680 Fax (502) 2 476-8506. Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Chercas. Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt																													

Fuente: Laboratorio Técnico, Ministerio de Energía y Minas

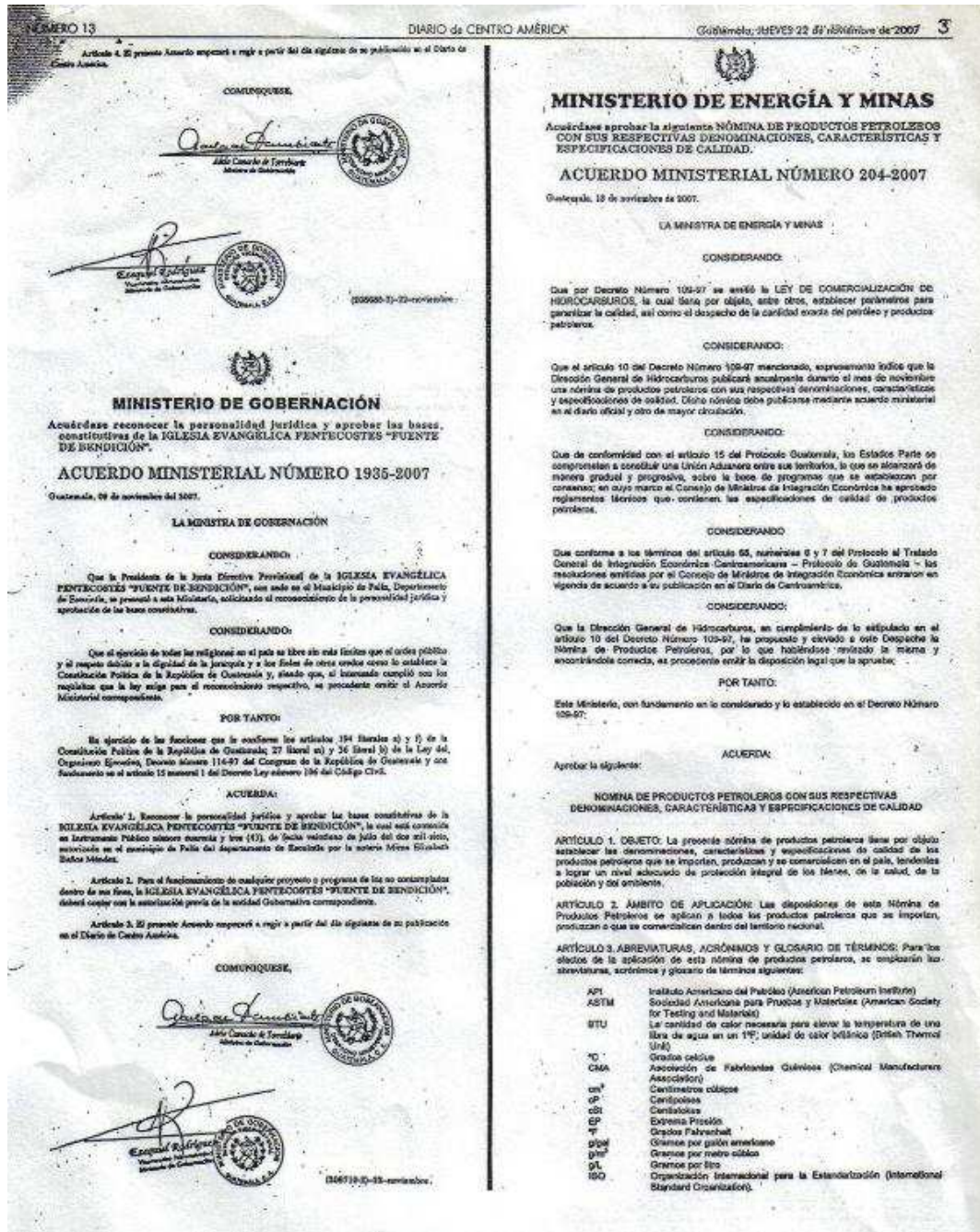
Figura 6. Análisis de propiedades de Biodiesel, a partir de aceite usado de palma africana.

<b>LABORATORIO TECNICO</b>	 <b>MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DE GUATEMALA</b>	 PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-711-07 ORDEN No. L-297-07 GUATEMALA, 03-07-07																											
<b>RESULTADOS DE ANALISIS</b>																													
<p>MUESTRA: <b>Biodiesel</b>  PRESENTADA POR: Planta Piloto, Centro de Investigaciones  RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido  PROCEDENCIA: Muestra No. 2, Mariana Flores  LOCALIZACION: Planta Piloto, Centro de Investigaciones  FECHA DE MUESTREO: Desconocida  FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 13-06-07  FECHA DE ANALISIS: del 21 al 28-06-07  PRECIO DE ANALISIS: \$ 68.12  ANALISTA: Edgar Sandoval</p>																													
<b>DESCRIPCION</b>	<b>METODO DE ANALISIS</b>	<b>ESPECIFICACION (a)</b>	<b>RESULTADOS (b)</b>																										
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93	-----	128																										
AZUFRE, % masa	ASTM D-129	-----	0.05																										
CORROSION EN LA TIRA DE COBRE, 3 horas a 50 °C	ASTM D-130	-----	1																										
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/kg	ASTM D-240	-----	(#) 40.16																										
GRAVEDAD APL 15.56 °C, °API	ASTM D-287	-----	30.5																										
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm <sup>2</sup> /s (c)	ASTM D-445	-----	4.8																										
CENIZA, % masa	ASTM D-482	-----	0.002																										
INDICE DE CETANO, calculado	ASTM D-976	-----	49																										
COLOR ASTM, No.	ASTM D-1500	-----	1.8																										
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1798	-----	< 0.05																										
DESTILACION, 760 mm Hg en base a recuperado, °C	ASTM D-86		<table border="1"> <thead> <tr> <th>VOLUMEN %</th> <th>RECUPERADO °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>P. INICIAL</td><td>299</td></tr> <tr><td>5</td><td>329</td></tr> <tr><td>10</td><td>332</td></tr> <tr><td>20</td><td>334</td></tr> <tr><td>30</td><td>336</td></tr> <tr><td>40</td><td>337</td></tr> <tr><td>50</td><td>338</td></tr> <tr><td>60</td><td>339</td></tr> <tr><td>70</td><td>340</td></tr> <tr><td>80</td><td>343</td></tr> <tr><td>90</td><td>346</td></tr> <tr><td>P. FINAL (e)</td><td>356</td></tr> </tbody> </table>	VOLUMEN %	RECUPERADO °C	P. INICIAL	299	5	329	10	332	20	334	30	336	40	337	50	338	60	339	70	340	80	343	90	346	P. FINAL (e)	356
VOLUMEN %	RECUPERADO °C																												
P. INICIAL	299																												
5	329																												
10	332																												
20	334																												
30	336																												
40	337																												
50	338																												
60	339																												
70	340																												
80	343																												
90	346																												
P. FINAL (e)	356																												
<p><b>OBSERVACIONES:</b></p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No.192-06, no existen especificaciones para este producto  b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio  c) 1 mm<sup>2</sup>/s es equivalente a 1 cSt  d) 40.16 MJ/kg es equivalente a 9594 Kcal/kg  e) Punto final de ebullición.</p> <p style="text-align: center;">   Ing. Jorge Villalobos  <b>SECCION DE HIDROCARBUROS</b>    Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  <b>COORDINADORA LABORATORIOS TECNICOS</b> </p> <p style="text-align: center;">    </p>																													
<p>El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico</p> <p>PBX (502) 2 477-0382 y (802) 2 476-0680 Fax (502) 2 476-8506 Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas, Guatemala, C. A. www.mem.gov.gt</p>																													

Fuente: Laboratorio Técnico, Ministerio de Energía y Minas



Figura 7. Acuerdo Ministerial 204-2007.



Fuente: Diario de Centroamérica

Figura 8. Cuadro No. 9 del acuerdo ministerial 204-2007. Características y especificaciones de calidad para el diesel 2-D.

8- Guatemala, #EYES 22 de noviembre de 2007 DIARIO de CENTRO

Tabla No. 9

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	VALORES
Apariencia	---	D-4178	Claro y Brillante <sup>(a)</sup>
Aditivos	---	---	Reportar <sup>(b)</sup>
Color ASTM	---	D-1500	Reportar
Índice de cetano calculado	---	D-678	45 mín.
Número de cetano <sup>(c)</sup>	---	D-613	45 mín.
Corrosión tira de cobre, 3 h, 90 °C.	---	D-130	No. 2 máx.
Contenido de cenizas	Fración de masa (% masa)	D-482	0,01 máx.
Contenido de azufre total	Fración de masa (% masa)	D-129	0,50 máx. <sup>(d)</sup>
Residuo de carbón Conradson en 10 % residuo (Nota 1)	Fración de masa (% masa)	D-189	0,10 máx.
Residuo de carbón Ramsbottom en 10 % residuo (Nota 1)		D-524	0,13 máx.
Agua y sedimentos	Fración de volumen (% volumen)	D-2709	0,05 máx.
Punto de inflamación (Flash Point)	°C	D-93	52 mín.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F)	°API	D-287	Reportar
o densidad a 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	D-1296	
Punto de oscurecimiento	°C	D-97	Reportar
Punto de enturbamiento <sup>(e)</sup>	°C	D-2500	0 máx. <sup>(b)</sup>
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s <sup>(b)</sup>	D-445	1,9 - 4,1
Destilación	°C	D-86	Reportar
10 % recuperados			Reportar
50 % recuperados			360 máx.
90 % recuperados			Reportar
Punto final de ebullición	°C		Reportar
Aromáticos	Fración de volumen (% volumen)	D-1319	Reportar <sup>(b)</sup>

(a) Si el producto cumple con los valores establecidos en este reglamento, se considerará apto para la venta aún cuando su apariencia no sea clara y brillante.

(b) La información que se debe presentar para cada aditivo que se agregó a este producto es la siguiente:

- Hoja de Datos de Seguridad del Material ("Material Safety Data Sheet")
- Proporción agregada del aditivo (mezcla)
- Propiedad del producto que el aditivo genera o mejora en el mismo, ejemplo: antiestancamiento, anticorrosión, detergente, etc.

Si se menciona la fuente de suministro, la información se debe proporcionar únicamente una vez, pero debe informar al Ente Nacional Competente, cada vez que ésta cambia de aditivo y también cuando se cambia la fuente de suministro.

(c) Si el valor del índice de cetano calculado es menor a 45 se debe realizar la prueba del número de cetano.

(d) 1 mín./s a 40 °C

(e) Reportar indicando el resultado obtenido de acuerdo al método, por un periodo de un año y evaluar en los siguientes tres meses, con el propósito de definir si se mantiene reportar o se define un valor numérico.

**Nota 1:** Los límites que aquí se indican son los parámetros que debe cumplir el Aceite Combustible Diesel antes de la adición de mejoradores de Cetano del tipo Nitrato de Alquilo; si se determina su presencia mediante el método ASTM D-4048, el límite máximo para el residuo de carbón debe ser 0,35% masa, tanto por el método Conradson (ASTM D-189) como Ramsbottom (ASTM D-524).

En este caso, debe presentar a la Dirección General de Hidrocarburos el certificado de calidad en donde se indique los valores iniciales de número cetano del aceite combustible Diesel utilizado como base, residuo de carbón, el porcentaje de mezcla de nitrato de alquilo y el valor obtenido por medio del método ASTM D-4048.

**Nota 2:** Los métodos ASTM indicados son los aprobados como métodos arbitrarios. Otros métodos aceptables se indican en dicho reglamento técnico centroamericano.

Fuente: Diario de Centro América

Tabla XVI. Poder calorífico para el diesel, valores no especificados por norma ASTM.

**Información estadística adicional (valores no sujetos a Norma)**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Poder Calorífico Inferior	Btu/lb	18254
	Kcal/kg	10133
Poder Calorífico Superior	Btu/lb	19380
	Kcal/kg	10758
Viscosidad Cinemática @ 100 °C	cSt	1.37



Figura 9. Tabla de valores de F para un nivel de significancia 0.05.

**Tabla 6(a) Valores de  $F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}$**

$\nu_1$  = Grados de libertad para el numerador

$\nu_2$ = Grados de libertad para el denominador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18.50	19.00	19.20	19.20	19.30	19.30	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
3	10.10	9.35	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.38	2.38	2.30	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.93
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.28
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

\* Esta tabla se reprodujo de M. Merrington and C. M. Thompson, "Tables of percentage points of the inverted beta ( $F$ ) distribution", *Biometrika*, Vol. 33 (1944), con permiso de los depositarios de *Biometrika*.

Fuente: Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Irwin R. Miller



Figura 10. Tabla de valores de F para un nivel de significancia 0.01.

**Tabla 6(b) Valores de  $F_{\alpha, \nu_1, \nu_2}$**

$\nu_1$  = Grados de libertad para el numerador

$\nu_2$ = Grados de libertad para el denominador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
1	4.052	5.000	5.403	5.625	5.764	5.859	5.928	5.982	6.023	6.056	6.106	6.157	6.209	6.255	6.261	6.287	6.313	6.339	6.366
2	98.50	99.00	99.20	99.25	99.30	99.35	99.40	99.45	99.50	99.55	99.60	99.65	99.70	99.75	99.80	99.85	99.90	99.95	100.00
3	34.10	30.80	29.50	28.70	28.20	27.90	27.70	27.50	27.30	27.20	27.10	26.90	26.70	26.60	26.50	26.40	26.30	26.20	26.10
4	21.20	18.00	16.70	16.00	15.50	15.20	15.00	14.80	14.70	14.50	14.40	14.30	14.00	13.90	13.80	13.70	13.60	13.50	13.40
5	16.30	13.30	12.10	11.40	11.00	10.70	10.50	10.30	10.20	10.10	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
6	13.70	10.90	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
7	12.20	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
8	11.30	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.83
9	10.60	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
10	10.00	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.19	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
19	8.19	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.53	2.45	2.36	2.27	2.17
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38
$\infty$	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00

\* Esta tabla se reprodujo de M. Merrington and C. M. Thompson, "Tables of percentage points of the inverted beta ( $F$ ) distribution", *Biometrika*, Vol. 33 (1943), con permiso de los depositarios de *Biometrika*.

585

Fuente: Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Irwin R. Miller