

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO  
MAESTRÍA EN ENERGÍA Y AMBIENTE

ESTUDIO ESPECIAL DE GRADUACIÓN

**“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ACEITES  
COMBUSTIBLES: DIESEL 2D, BIODIESEL FAME Y BIODIESEL HEBD”**

POR

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
CARLOS BLADIMIR ECHEVERRÍA ECHEVERRÍA**

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

Guatemala, Noviembre del 2009

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. José Milton de León Bran
VOCAL V:	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR:	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortíz
EXAMINADOR:	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**“COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ACEITES  
COMBUSTIBLES: DIESEL 2D, BIODIESEL FAME Y BIODIESEL HEBD”**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrados, con fecha 3 de mayo del 2008.

  
Ing. Carlos Bladimir Echeverría Echeverría

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios  
de Postgrado

Como Revisor de la Maestría en Energía y Ambiente del trabajo de tesis de graduación titulado **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ACEITES COMBUSTIBLES: DIESEL 2D, BIODIESEL FAME Y BIODIESEL HEBD**, presentado por el Ingeniero Mecánico Electricista **Carlos Bladimir Echeverría Echeverría**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'C. Pérez Rodríguez'.

Msc. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, Octubre de 2009.

/zc.



Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios  
de Postgrado

Como Coordinador de la Maestría en Energía y Ambiente, y revisor del trabajo de tesis de graduación titulado **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ACEITES COMBUSTIBLES: DIESEL 2D, BIODIESEL FAME Y BIODIESEL HEBD**, presentado por el Ingeniero Mecánico Electricista **Carlos Bladimir Echeverría Echeverría**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hugo Leonel Ramírez Ortiz', written over a horizontal line.

Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz  
Coordinador  
Escuela de Estudios de Postgrado

Ing. Hugo Ramírez  
COL. No. 5545

Guatemala, Octubre de 2009.

/zc.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al trabajo de graduación de la Maestría en Energía y Ambiente titulado: **COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE ACEITES COMBUSTIBLES: DIESEL 2D, BIODIESEL FAME Y BIODIESEL HEBD**, presentado por el Ingeniero Mecánico Electricista **Carlos Bladimir Echeverría Echeverría**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, appearing to read "Murphy Olimpo Paiz Recinos".

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, octubre de 2009

/zpcm



## **AGRADECIMIENTOS**

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron tanto en mi formación, como en la realización de este trabajo de graduación, en especial a:

Aura Estela Ruano León de Echeverría

Carlos Enrique Echeverría Salas

Federico Franco Cordon

Gabriel Ernesto Maltéz Romillo

Luis Romeo Ortiz Peláez

Mauricio Enríquez

Nicholas Irving

Pablo Christian de León Rodríguez

Romel Alaric García Prado

Telma Maricela Cano Morales

## **ACTO QUE DEDICO**

A DIOS	Que me dio la vida y fortaleza para finalizar mis estudios.
A MI ESPOSA	Aura Estela: Que con tu vida sigues iluminando la mía, gracias por tu paciencia y apoyo en todo momento.
A MIS PADRES	Alicia Yolanda y Carlos Enrique: Por apoyarme en todos mis emprendimientos y alentarme a ser mejor cada día.
A MI HERMANA	Claudia Carolina: Por estar siempre conmigo en todos los momentos de mi vida.
A MI FAMILIA	Por estar siempre pendiente de mí.
A MIS COMPAÑEROS	Por todos los momentos compartidos a lo largo de la maestría.
A MIS AMIGOS	Por sus consejos y ánimo para seguir adelante.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	v
GLOSARIO	vii
RESUMEN	ix
OBJETIVOS	xi
General	xi
Específico	xi
HIPÓTESIS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
1. ACEITES COMBUSTIBLES	
1.1. Antecedentes	3
1.2. Diesel 2D	5
1.3. Biodiesel	6
1.3.1. Ventajas	10
1.3.2. Desventajas	11
1.3.3. La cadena productiva del biodiesel	13
1.3.4. Biodiesel FAME	16
1.3.5. Biodiesel HEBD	17
2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS ACEITES COMBUSTIBLES	
2.1. Legislación regional y nacional sobre combustibles	22
2.1.1 Normativa en Centro América	23
2.1.2 Normativa en Guatemala	28
2.2. Pruebas de laboratorio	30
2.2.1 Comparación de los resultados de las pruebas de laboratorio de los 3 aceites combustibles y las normas nacionales y regionales de combustibles.	33

3. PRUEBA DE RENDIMIENTO PARA ACEITES COMBUSTIBLES	
3.1. Resultados del ensayo	43
3.1.1 Comparación de los resultados de la prueba de rendimiento de las 3 muestras de aceites combustibles.	47
4. CONCLUSIONES	49
5. RECOMENDACIONES	51
6. BIBLIOGRAFÍA	53
7. REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	55
8. ANEXOS	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Esquema de almacenamiento de hidrocarburos en el subsuelo	4
2	La cadena productiva del biodiesel	14
3	Comparación del contenido energético de los tres aceites combustibles de acuerdo a su poder calorífico	37
4	Configuración del equipo para realizar la prueba de eficiencia	41
5	Eficiencia energética de distintas mezclas de biodiesel FAME	44
6	Eficiencia energética de distintas mezclas de biodiesel HEBD	46
7	Comparación de vatios-hora generados con distintas mezclas de biodiesel	47



## ÍNDICE DE CUADROS

I	Problemas en el motor diesel con uso de aceites vegetales	7
II	Especies oleaginosas utilizadas en la producción de biodiesel	9
III	Especificaciones técnicas del diesel 2D en Centroamérica	24
IV	Especificaciones técnicas del biodiesel	26
V	Especificaciones técnicas del diesel 2D en Guatemala	29
VI	Resultados de laboratorio del diesel 2D	31
VII	Resultados de laboratorio del biodiesel FAME	32
VIII	Resultados de laboratorio del biodiesel HEBD	33
IX	Comparación entre los parámetros establecidos en la normativa legal y el diesel 2D analizado.	34
X	Comparación entre los parámetros establecidos en la normativa legal y el biodiesel analizado	35
XI	Descripción de las muestras de aceites combustibles al 100%	40
XII	Descripción de las muestras de distintos tipos de mezcla de diesel 2D con biodiesel.	40
XIII	Orden con el cual se realizaron las pruebas de eficiencia	42
XIV	Resultados obtenidos con las muestras de diesel 2D	43
XV	Resultados obtenidos con las muestras de biodiesel FAME	44
XVI	Resultados obtenidos con las muestras de biodiesel HEBD	45



## GLOSARIO

Aceites combustibles	Combustible líquido para motores de encendido por compresión, o motores de ciclo Diesel. De acuerdo a su origen pueden ser fósiles o de origen biológico
Azufre	Elemento químico el cual al estar presente en la combustión genera óxidos de azufre que contaminan la atmósfera y provocan lluvia ácida
Biocombustibles	Combustibles de origen biológico de reciente fotosíntesis
Biodiesel	Biocombustible de sustituto parcial o total del diesel, obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales
Biodiesel FAME	<i>Fatty Acid Methyl Ester</i> , por sus siglas en inglés, también conocido como Ester Metílico de Ácidos Grasos. Es el biodiesel producido por medio de una reacción química llamada transesterificación
Biodiesel HEBD	<i>High Enthalpy Biodiesel</i> , por sus siglas en inglés, también conocido como Biodiesel de Alta Entalpía. Es el biodiesel producido por medio de craqueo térmico en una torre de destilación

Compuestos aromáticos	Productos químicos de origen fósil contenidos en los combustibles comerciales y con alta toxicidad
Diesel	Derivado del petróleo utilizado ampliamente en el transporte y la industria
Matriz energética	Conjunto de las diversas fuentes de energía que se utilizan en el país para las distintas actividades económicas
Protocolo de Kioto	Acuerdo internacional cuyo objetivo es la reducción de las emisiones de seis gases que provocan el calentamiento global
Petróleo	Mezcla compleja, no homogénea de hidrocarburos, el cual tiene un origen orgánico, fósil, y está compuesto principalmente por hidrógeno y carbono
Transesterificación	Reacción química para convertir triglicéridos en biodiesel
Volatilidad	Capacidad de una sustancia de evaporarse a una temperatura y presión determinada

## RESUMEN

Los combustibles fósiles, para su uso en el transporte, juegan un papel muy importante en la matriz energética de Guatemala y constituyen cerca del 25 por ciento de la energía total que se consume en el país. Dichos combustibles generan contaminación ambiental debido a las distintas emisiones que se liberan a la atmósfera durante su combustión, es por ello que los biocombustibles han cobrado auge a nivel mundial por sus ventajas ambientales y muchos países los producen y consumen en la actualidad.

El término aceites combustibles se aplica para los combustibles con determinadas propiedades fisicoquímicas y entre ellos se encuentra el diesel y el biodiesel, siendo este último un combustible de origen biológico que se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales y que puede utilizarse como un sustituto o complemento para el diesel de origen fósil.

Para la producción de biodiesel existen diversos métodos de fabricación, que generan un producto con características muy similares, pero con algunas diferencias en sus parámetros fisicoquímicos. El biodiesel FAME se produce en base a una reacción química del aceite vegetal o grasa animal y es el método de producción más utilizado, mientras que el biodiesel HEBD se genera luego de un proceso de destilación o craqueo térmico de los aceites vegetales o grasas animales.

Este trabajo de investigación muestra los resultados de laboratorio de tres muestras de aceites combustibles: diesel fósil, biodiesel FAME y biodiesel HEBD y compara las características de las tres muestras con la normativa nacional para determinar si cumplen las especificaciones de calidad. Luego, se realiza una prueba en la cual se determina la eficiencia energética de las tres muestras de aceite combustible.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Comparar la eficiencia energética de tres muestras de aceites combustibles: diesel 2D, biodiesel FAME y biodiesel HEBD.

### **Específicos**

1. Realizar pruebas de laboratorio de tres muestras de aceites combustibles para determinar sus respectivos parámetros fisicoquímicos.
2. Evaluar si las muestras analizadas cumplen con las características fisicoquímicas que establece el Acuerdo Gubernativo 204-2007, “Nómina de productos petroleros con sus respectivas denominaciones, características y especificaciones de calidad” y el Reglamento Técnico Centro Americano 75.02.43:07, “Biocombustibles, biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel. Especificaciones”.
3. Establecer el rendimiento en vatios-hora por volumen de combustible, utilizando una planta de generación de electricidad y una carga eléctrica constante.



## HIPÓTESIS

### Hipótesis nula

**Ho:** Los aceites combustibles tienen distinto contenido energético dependiendo su origen.

### Hipótesis alternativa

**Hi:** Los aceites combustibles tienen el mismo contenido energético sin importar su origen.



## INTRODUCCIÓN

La biomasa, principalmente la leña, fue durante siglos el principal combustible para la humanidad. Con el crecimiento de la demanda energética, a partir de la revolución industrial, se introdujo el carbón mineral y el petróleo, asociado a una amplia adopción de tecnologías adecuadas para su uso, por tanto, la matriz energética a nivel mundial se transformó para ceder el paso a la utilización de recursos no renovables y la biomasa fue, paulatinamente, perdiendo importancia.

Con el transcurrir del tiempo, a partir de las crisis del petróleo de la década de los años setenta, los combustibles derivados de la biomasa, llamados “biocombustibles”, vuelven a ser considerados como alternativa capaz de complementar el uso de los derivados del petróleo. En años recientes, con el precio del barril de petróleo superando la barrera de los cien dólares, así como los compromisos de reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero establecidos en el Protocolo de Kioto, varios países en todo el mundo están produciendo y consumiendo biocombustibles.

En el año 2008, Guatemala importó casi 8 millones de barriles de diesel, a un costo de más de mil millones de dólares, de los cuales, aproximadamente el setenta y cinco por ciento se utilizó en un parque vehicular compuesto por casi medio millón de vehículos accionados por diesel<sup>1</sup>, por tanto, el país ha sufrido deterioro ambiental como consecuencia de la utilización de combustibles fósiles, con lo cual se hace necesario el uso de biocombustibles que reduzcan la emisión de gases nocivos a la salud y el ambiente, siendo el biodiesel una fuente renovable de energía más amigable con el ambiente debido a su bajo contenido de azufre y además tiene el potencial de diversificar la matriz

---

<sup>1</sup> Fuente: Superintendencia de Administración Tributaria (SAT)

energética y que, en su etapa de producción y cultivo de materias primas, permite la generación de empleos.

En el capítulo uno se describe el origen del petróleo y el uso que se le da al combustible diesel, uno de los derivados más importantes del mismo debido a su amplio uso a nivel mundial en distintos sectores como el transporte y comercio, así como también se mencionan las ventajas y desventajas del biodiesel, combustible de origen biológico que se puede fabricar con distintas tecnologías de las cuales se describen dos procesos de producción, el biodiesel FAME y el biodiesel HEBD.

Dado que existen diversos parámetros fisicoquímicos que caracterizan a los combustibles, en el capítulo dos se describen aquellos que son fundamentales para establecer la calidad de los aceites combustibles, así como la normativa vigente en Centroamérica y Guatemala en cuanto a las especificaciones técnicas. Así mismo, se realizaron pruebas de laboratorio a muestras de diesel fósil, biodiesel FAME y biodiesel HEBD para comparar los resultados con dicha normativa.

En el capítulo tres, se describe la prueba realizada a las tres muestras de aceites combustibles con la cual se estableció el rendimiento en vatios-hora generados en un ensayo realizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

# 1. ACEITES COMBUSTIBLES

## 1.1 Antecedentes

El petróleo ha estado fuertemente ligado a las actividades cotidianas en la vida del hombre desde tiempos remotos, por ejemplo, en China se utilizó durante varios siglos para la cocción de alimentos, mientras que en América precolombina se usaba para la impermeabilización de embarcaciones, sin embargo, antes de la segunda mitad del siglo XVIII, las aplicaciones que se le daban al petróleo eran muy pocas. Fue hasta el año de 1859 cuando Edwin Drake perforó el primer pozo petrolero del mundo en Pennsylvania, Estados Unidos.

El petróleo es una mezcla compleja, no homogénea de hidrocarburos, la cual tiene un origen orgánico, fósil, y está compuesta principalmente por hidrógeno y carbono. Se encuentra generalmente almacenado en rocas en el interior de la corteza terrestre, también llamadas cuencas sedimentarias. El nombre deriva del latín y del griego *petroleum* que significa “aceite de roca”.

Los adelantos científicos y tecnológicos empleados en exploraciones fuera de la costa han permitido detectar emanaciones petrolíferas en el fondo de los mares. Tal es el caso de hallazgos hechos frente a las costas de California en el océano Pacífico y en las costas de Louisiana y Texas en el golfo de México, entre otros.

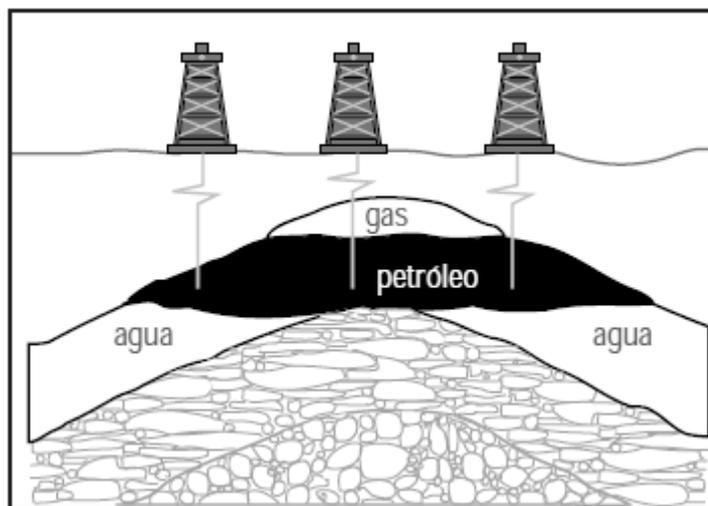
Desde los comienzos de la explotación comercial del petróleo, los geólogos, químicos e ingenieros han dedicado tiempo a estudiar e investigar los elementos y procesos responsables del origen, constitución, características, peculiaridades de desplazamiento, acumulación y entrapamiento de los hidrocarburos en el subsuelo. Durante casi catorce décadas de estudios científicos, técnicos y de campo, se ha acumulado una

valiosa y extensa información sobre las teorías y diferentes aspectos del origen del petróleo.

La teoría inorgánica, indica que el petróleo se forma por reacciones netamente químicas, es decir, sin la intervención de agentes vegetales y/o animales.

Por otra parte, la teoría orgánica se basa en la participación de residuos vegetales o de animales en el proceso químico bacteriano o de descomposición. Hay científicos que proponen que la formación del petróleo es de origen animal y otros que su origen es vegetal, sin embargo, se ha concluido que puede ser uno u otro o en la mayoría de los casos, los dos combinados.

**Figura 1. Esquema de almacenamiento de hidrocarburos en el subsuelo.**



Fuente: El Pozo Ilustrado, cuarta edición, PDVSA, pag. 35.

El petróleo, tal y como se extrae de la naturaleza, tiene escasos usos prácticos en la industria, de manera que durante mucho tiempo, se investigó la forma de transformarlo en subproductos utilizables y fue a

finales del siglo XIX cuando se logró separar el kerosene del mismo, y de esta forma se inició la creación de un mercado a nivel mundial para el petróleo y sus derivados. De esa cuenta, el kerosene sustituyó al aceite de ballena empleado en aquella época como combustible en las lámparas para iluminación, cuyo consumo estaba provocando la desaparición de dichos animales.

La utilización de los derivados del petróleo, como los conocemos hoy día, se logra al separar mezclas más simples de hidrocarburos que tienen usos específicos mediante un proceso llamado destilación fraccionada del petróleo, con la cual se extraen diferentes productos como el kerosene, gasolina, diesel, y una gran cantidad de productos.

## **1.2 Diesel 2D**

El diesel era considerado como un desperdicio en las refinerías antes de 1910. A pesar que Rudolph Diesel inventó el motor que lleva su nombre, su aplicación no tuvo gran éxito, pues estaba diseñado originalmente para trabajar con aceite de maní. Cuando se logró separar la fracción ligera del diesel, el motor de Rudolph Diesel empezó a encontrar un amplio desarrollo.

El diesel, también llamado gasóleo o diesel 2D, es una de las fracciones más importantes del petróleo, y es utilizada en equipos industriales y en el transporte. Se compone de una mezcla de hidrocarburos pesados de cadenas largas y compuestos nafténicos, de apariencia aceitosa y color amarillo. Una de sus principales características es su alto poder calorífico, del orden de los 48.81 MJ/kg, también se caracteriza por su poca volatilidad que lo hacen un combustible eficiente y seguro.

La principal ventaja de los motores diesel, en relación a los motores de gasolina, consiste en el hecho de que son más eficientes, ya que producen más trabajo mecánico por volumen de combustible. Los motores de encendido por chispa, o motores de ciclo Otto que normalmente utilizan gasolina, sólo aprovechan del 22 al 24 por ciento de la energía contenida en el combustible, mientras que en los motores de encendido por compresión, o motores de ciclo Diesel, el aprovechamiento es cercano al 35 por ciento. 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 proveniente del azufre. El combustible diesel también es relativamente aceitoso y posee propiedades lubricantes, las cuales tienden a prolongar la duración de los motores. 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.

### **1.3 Biodiesel**

La utilización de aceites vegetales como combustible ha sido estudiada desde los inicios del siglo XX, sin embargo, el perfeccionamiento en las técnicas de refinamiento del petróleo y los consecuentes precios bajos de los combustibles fósiles desestimularon las investigaciones sobre el uso de aceites vegetales en motores de combustión interna.

A inicio de los años ochenta, después de la segunda crisis del petróleo, varios países intentaron sustituir el diesel por aceites vegetales y durante las pruebas realizadas, debido a su alta viscosidad, se constató la necesidad de precalentar el aceite vegetal previo a la entrada en la cámara de combustión, lo cual implicaba la modificación de los vehículos o maquinaria que utilizaba este tipo de combustible. Todas las investigaciones realizadas sobre el uso de aceites vegetales en motores

diesel mostraron problemas similares: formación de gomas en los inyectores, reducción de potencia y de eficiencia, depósitos de carbón, desgaste en los anillos del motor y dilución del aceite lubricante por contaminación con aceite vegetal. Muchos de estos efectos fueron observados aún y cuando se utilizaba una mezcla de 85 por ciento de diesel fósil con 15 por ciento de aceite vegetal.

El cuadro I muestra los problemas que se presentan en un motor diesel cuando se emplean aceites vegetales puros.

**Cuadro I. Problemas en el motor diesel con uso de aceites vegetales.**

<b>Problema</b>	<b>Causa probable</b>	<b>Solución potencial</b>
El vehículo no arranca en frío.	Alta viscosidad del aceite.	Calentar el aceite previo a la combustión.
Obstrucción de filtros, tuberías e inyectores.	Gomas naturales y cenizas presentes en el aceite. Inyección fuera de tiempo.	Usar aceite desgomado. Cambiar el punto de inyección.
Formación de coque en los inyectores y pistones.	Alta viscosidad del aceite. Combustión incompleta. Cargas parciales.	Calentar el aceite. Cambiar por diesel cuando el motor funciona a cargas bajas.
Desgaste excesivo del motor.	Alta viscosidad del aceite. Ácidos grasos libres.	Calentar el aceite. Usar aditivos lubricantes.
Fallas en la lubricación.	Dilución del lubricante. Ácidos grasos libres.	Calentar el aceite. Usar aditivos lubricantes.

Fuente: Elaboración propia con datos de Fangrui, Ma y Milford, Hanna, Biodiesel production: a review, Pág. 1-15.

Cabe mencionar que las posibles soluciones a los problemas descritos están asociadas a modificaciones en el motor y al calentamiento del aceite, con el objetivo de reducir su viscosidad y tensión superficial, logrando una mejor atomización en los inyectores.

De cualquier manera, los problemas descritos no ocurren de la misma forma en todos los motores, sino que estos varían en grado e intensidad. En cada caso, es necesario verificar las acciones que deben tomarse en cuenta para que un determinado motor pueda operar con aceite vegetal como combustible. En conclusión, es importante recalcar que no es posible emplear aceites vegetales en motores diesel sin hacer modificaciones, ya sea en el aceite o en el motor.

Una solución para evitar la necesidad de modificaciones en los motores, y para evitar los problemas que ocasiona el uso de aceites vegetales puros, consiste en transformar químicamente el aceite vegetal, de tal forma que sus propiedades sean muy similares a las del diesel de petróleo, con lo cual se obtiene el biodiesel, cuya producción y uso ha cobrado gran interés a nivel mundial, debido a la reciente alza de los precios internacionales del petróleo y sus derivados, así como por cuestiones ambientales.

El término “biodiesel” es aplicado a combustibles de origen biológico de reciente fotosíntesis, obtenidos a partir de aceites vegetales o grasas animales transformados químicamente, que se utilizan en motores de ciclo diesel y que pretenden sustituir total o parcialmente el diesel de petróleo.

El biodiesel puede ser empleado puro o en mezclas con diesel 2D. Las mezclas son denominadas Bxx, donde xx es el porcentaje de biodiesel en la mezcla. Por ejemplo, B5 contiene 5 por ciento de biodiesel y 95 por ciento de diesel fósil; el B20 contiene 20 por ciento de biodiesel y 80 por ciento de diesel fósil; y B100 es el biodiesel puro.

La principal materia prima para la producción de biodiesel son los aceites vegetales y las grasas animales, además y dependiendo del tipo de proceso de producción, hay otras materias primas que se utilizan como el metanol, etanol, nitrógeno, hidróxido de sodio o de potasio, entre otros. El cuadro II muestra algunos ejemplos de las especies oleaginosas comúnmente utilizadas para la producción de biodiesel.

**Cuadro II. Especies oleaginosas utilizadas en la producción de biodiesel.**

Nombre		Productividad agrícola	Productividad aceite	Aceite en la semilla
Común	Científico	Ton/ha	lt/ha	%
Ajonjolí	Sesamun indicus	0.8	490 – 700	38 - 40
Girasol	Heliantus annus	1.5 - 2.0	700 - 1100	39 - 48
Higuerillo	Ricinnus communis	0.6 - 2.5	620 - 1200	42 - 45
Maní	Arachis hipogaea	1.4 - 2.5	700 - 1000	39 - 48
Palma africana	Elaeis guineensis	10 – 22	3000 - 5900	18 - 26
Soya	Glycine max	1.5 - 3.0	350 – 520	17 - 19
Colza	Brassica napus	1.7 - 2.0	690 - 1100	37 - 46
Algodón	Gossypium hirsutum	1.7 - 3.0	270 – 450	16 - 18
Piñon	Jatropha curcas	1.0 - 5.0	950 - 1680	24 - 26
Coco	Cocos nucifera	1.0 - 5.0	2100 - 2510	52 - 60
Maiz	Zea mais	6.0 - 8.0	170 – 200	4 - 8

Fuente: Elaboración propia con datos de Gallo, Waldyr. Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras, Pág. 7.

Los aceites vegetales y grasas animales son lípidos, los cuales están constituidos por mezclas de diferentes triglicéridos (tri-ésteres de ácidos grasos) que además, contienen otros compuestos como los fosfatídeos, diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres en pequeñas cantidades. Los ácidos grasos que componen un triglicérido pueden ser diversos. Los mono, di o triglicéridos son ésteres de uno, dos o tres ácidos grasos, iguales o no, unidos por un puente de glicerina. El biodiesel es una mezcla de alquil-ésteres de ácidos grasos.

### **1.3.1 Ventajas**

El biodiesel puede utilizarse como un sustituto o complemento para el diesel 2D dado que tiene la virtud que para su uso, los motores diesel convencionales no necesitan modificaciones, además tiene una serie de ventajas asociadas, las cuales se describen a continuación:

**Biodegradabilidad:** Debido a su origen orgánico, el biodiesel es fácilmente biodegradable por la naturaleza, no es tóxico y es prácticamente libre de azufre y compuestos aromáticos.

**Emisiones:** Las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y de dióxido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ) se reducen un 100 por ciento y un 95 por ciento respecto al diesel convencional. La emisión de hollín se reduce de un 40 a un 60 por ciento, y las de hidrocarburos (HC) de un 10 a un 50 por ciento. La emisión de monóxido de carbono (CO) se reduce de un 10 a un 50 por ciento. Se reduce igualmente la emisión de hidrocarburos policíclicos aromáticos y en particular de los siguientes derivados, de comprobada acción cancerígena: Fenantreno - 97%; Benzofluorantreno - 56%; Benzopirenos - 71%. La emisión de compuestos aromáticos y aldehídos se reduce un 13 por ciento, y las de óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ) se reducen, o aumentan, de un 5 a un 10 por

ciento de acuerdo con el desgaste del motor, y la calibración de la bomba inyectora.

Índice de cetano: El índice de cetano es la propiedad de un combustible con la cual se mide la calidad de la ignición, lo cual indica el grado de eficiencia cinética de la combustión. El diesel 2D, dada su naturaleza fósil, contiene una gran cantidad de compuestos aromáticos, los cuales poseen un número de cetano bajo, de esa cuenta, el diesel 2D tiene un número de cetano inferior al biodiésel, ya que éste último carece de compuestos aromáticos. Al mezclar biodiésel con diesel 2D, se mejora el índice de cetano del combustible.

Lubricidad: La lubricidad del biodiésel es notable y contribuye a prolongar la vida útil de los motores en los cuales se utiliza, razón por la cual, es común su uso en mezclas con diesel 2D para mejorar las características del combustible.

Seguridad: El biodiésel ofrece ventajas de seguridad sobre el diesel 2D ya que tiene un punto de inflamación mayor, de 150 °C en promedio, comparado al diesel del petróleo el cual tiene 77 °C. Esto lo hace más seguro de almacenar y transportar<sup>2</sup>.

### **1.3.2 Desventajas**

No obstante el constante incremento del consumo a nivel mundial de biodiésel debido en parte a los potenciales beneficios anteriormente descritos, existen también desventajas que hay que considerar al utilizar este tipo de aceite combustible:

---

<sup>2</sup> Fuente: Gallo, Waldyr. Perspectivas para el biodiésel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras. México. Cepal, 2007.

Emisiones de óxido de nitrógeno: Se encuentra un aumento en las emisiones de óxido de nitrógeno en algunas ocasiones dependiendo del desgaste del motor.

Incompatibilidad a bajas temperaturas: El biodiesel no tiene buenas propiedades a bajas temperaturas. Tanto el punto de congelación, como el punto de nube, son de inferior calidad que el diesel 2D, dependiendo del origen del aceite o grasa animal utilizada para su producción.

Mayor viscosidad: Debido a que el biodiesel tiene una viscosidad mayor que el diesel 2D, pueden existir problemas de pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores.

Obstrucción de filtros: Dado que el biodiesel tiene propiedades disolventes, es probable que durante los primeros ciclos de uso de biodiesel, la suciedad acumulada en el circuito de combustible se disuelva y obstruya los filtros.

Poder Calorífico: El poder calorífico del biodiesel es inferior al diesel 2D, lo cual se transforma en un menor rendimiento mecánico en el motor.

Precio: Un problema asociado a la producción de biodiesel es que la cadena de producción es muy larga, con lo cual el precio final del producto se incrementa. Para conseguir un precio competitivo se debe optimizar el proceso de producción, articulando varias fases como el cultivo, extracción, trituración y transformación química en una sola instalación o biorefinería.

Presencia de Potasio y Sodio: La presencia de estos elementos debido a un defectuoso proceso de producción, puede causar la precipitación de jabones los cuales podrían obstruir los filtros de los motores.

Problemas de estabilidad: El biodiesel posee menor estabilidad a la oxidación que el diesel 2D debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en sus moléculas. Esto es importante si se pretende almacenar durante mucho tiempo el biodiesel.

### **1.3.3 La cadena productiva del biodiesel**

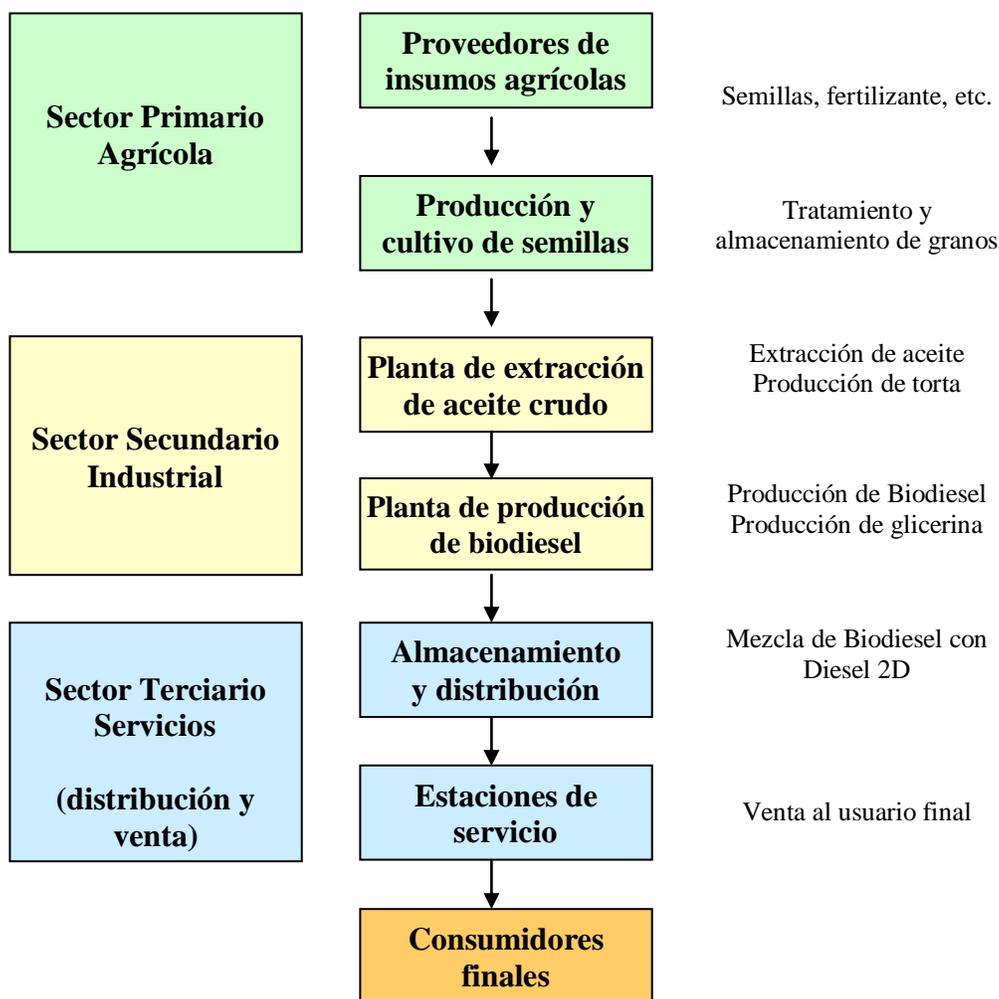
Para producir biodiesel con la calidad necesaria, de forma sostenible y factible económicamente para su comercialización, el proceso de producción requiere una adecuada conceptualización del proyecto, dado que son muchas las etapas que intervienen en el proceso. En realidad la producción comercial del biodiesel presupone la participación de los tres sectores productivos clásicos: el sector primario (agrícola), el sector secundario (industrial) y el sector terciario (servicios). La figura 2 presenta la cadena productiva completa del biodiesel. El sector primario está representado por los proveedores de los insumos agrícolas y por la producción de las oleaginosas propiamente dichas, es decir semillas o frutos.

Además de producir oleaginosas, el sector agrícola también realiza otras funciones tales como el tratamiento básico y el almacenamiento del producto hasta su transporte al sector industrial. Una buena productividad agrícola es fundamental para que el aceite tenga costos bajos.

El sector industrial en principio posee dos etapas: la extracción del aceite de las oleaginosas y la producción del biodiesel. En general, estas dos etapas no están integradas. La etapa de extracción de aceite constituye una industria que está orientada a la producción de aceites en grados comerciales, y tiene varios procesos con la finalidad de obtener la calidad necesaria para cada uno de los usos del aceite, dictados por el mercado a ser atendido. Como ejemplos, el proceso puede ser muy sencillo como

ocurre con la extracción del aceite virgen de oliva, o muy complejo, como el que ocurre con el aceite de soya para fines comestibles, el cual es desgomado, neutralizado, desodorizado y eventualmente hidrogenado.

**Figura 2. La cadena productiva del biodiesel.**



Fuente: Elaboración propia con datos de Gallo, Waldyr. Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras, Pág. 23.

La extracción del aceite puede hacerse de forma mecánica o con empleo de solventes. La extracción mecánica consiste en aplastar las semillas separando el aceite del producto restante, que forma la llama “torta”. Existen varios modelos de extractores mecánicos, cada uno más adecuado a ciertos tipos de oleaginosas o a la capacidad de la instalación: la prensa extractora que retira hasta el 80 por ciento del aceite, la prensa tornillo un poco menos eficiente y la prensa hidráulica manual que es la menos eficaz y retira tan solo entre un 60 a un 65 por ciento del aceite.

Para obtener altas eficiencias de extracción, de hasta un 98 por ciento, con bajo costo, la extracción con solventes es la más eficaz. En general, se emplea el hexano como solvente. Esta técnica puede ser empleada después de la extracción mecánica o de forma aislada. El material oleaginoso es saturado con solvente y el aceite se disuelve en el solvente. La torta es separada de la fase líquida y después se hace la separación del solvente por destilación. El solvente es entonces reciclado para otra extracción. La torta posee aún un poco de hexano que debe ser retirado antes de su uso para alimentación animal.

La demanda a nivel mundial de biodiesel ha provocado la amplia investigación para mejorar los procesos de producción de ese biocombustible, cuyos orígenes datan de algunos años antes de la Segunda Guerra Mundial. De esa cuenta, existen varios métodos de producción, sin embargo, el más ampliamente reconocido y utilizado es el biodiesel FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*, por sus siglas en inglés) también conocido como Ester Metílico de Ácidos Grasos. Por otra parte, también existe el novedoso método para producir biodiesel HEBD (*High Enthalpy Biodiesel*, por sus siglas en inglés) conocido como Biodiesel de Alta Entalpía. Ambos procesos de producción se describen a continuación.

#### **1.3.4 Biodiesel FAME**

Desde el punto de vista conceptual, la producción de biodiesel FAME a partir de aceites o grasas es muy sencilla y consiste en hacer una reacción, llamada transesterificación, en la cual los triglicéridos contenidos en el aceite vegetal reaccionan con un alcohol en la presencia de un catalizador y, luego de una etapa de decantación o centrifugación, se separan las dos fases resultantes: el biodiesel y la glicerina.

Las materias primas utilizadas en este método de producción son los aceites vegetales o grasas animales descritos en el cuadro II (página 9); un alcohol de cadena corta, que normalmente es metanol debido a su bajo costo y accesibilidad; y un catalizador alcalino, generalmente hidróxido de potasio por su alta reactividad.

La transesterificación debe llevarse a cabo en un recipiente que sea completamente cerrado, esto para evitar pérdidas por evaporación de alcohol, además se puede efectuar a temperatura ambiente, sin embargo, es preferible hacer la reacción a altas temperaturas para acelerar la producción de biodiesel.

El método de producción de biodiesel FAME genera alrededor de 10 por ciento de glicerina en cada lote de producción, la cual contiene exceso de metanol, la mayoría del catalizador y algunas veces jabón. En esta forma, la glicerina tiene poco valor y su eliminación puede ser difícil, ya que el contenido de metanol hace que la glicerina resultante sea tratada como un desecho peligroso. Este método se puede realizar con facilidad en cualquier laboratorio de química al igual que en pequeñas instalaciones domésticas, lo cual atrae la atención de las personas con la posibilidad de producir su propio combustible.

La producción de biodiesel FAME tiene varios inconvenientes, como su bajo contenido energético, el cual tiende a ser entre el 85 y el 88% de la energía contenida en el diesel 2D. Por otra parte, es un proceso de producción por lotes, lo cual limita la capacidad de producción de la planta ya que luego de cada lote, es recomendable realizar la limpieza de las tuberías.

### **1.3.5 Biodiesel HEBD**

Existe otro método de producción de biodiesel en donde se utilizan reactivos nitrogenados como materia prima, además de aceites vegetales o grasas animales en un proceso de producción que puede ser continuo o semi continuo. Con este método se produce el Biodiesel de Alta Entalpía (biodiesel HEBD, *High Enthalpy Biodiesel*, por sus siglas en inglés).

El proceso HEBD utiliza tecnología de craqueo térmico de triglicéridos en una torre de destilación, acompañado de un hidrot ratamiento. Los productos obtenidos, de acuerdo a su rango de ebullición en la torre de destilación, son una pequeña cantidad de componentes nafténicos a la cabeza, otra pequeña cantidad de un componente que tiene las características de bunker a la cola y entre ellos, la gran fracción de biodiesel de alta entalpía con un contenido energético más alto que el biodiesel FAME. Esta tecnología se desarrolló para satisfacer la demanda de combustibles renovables avanzados y produce un biodiesel con alto contenido energético, baja viscosidad y un índice de cetano alto. Al igual que con el biodiesel FAME, el biodiesel HEBD prácticamente no contiene azufre, lo cual provoca que no se de la contaminación asociada con el diesel 2D.



## 2. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE LOS ACEITES COMBUSTIBLES

Tal como se indica en el capítulo anterior, existe diversidad de combustibles cuya diferencia radica en las variaciones de sus características fisicoquímicas, las cuales diferencian un combustible de otro, además del tipo de tecnología necesaria para su utilización. De esa cuenta, las propiedades de una gasolina son muy distintas de las del kerosene por ejemplo, y debido a ello es que el motor que utiliza uno u otro tipo de combustible, tiene distintas características para adaptarse a dichos parámetros.

### **Descripción de los parámetros fisicoquímicos**

Existe una gran cantidad de parámetros fisicoquímicos que caracterizan a los aceites combustibles, sin embargo, son unos pocos los que son fundamentales para establecer la calidad de los mismos, en cuanto a las propiedades de la combustión, la cantidad de emisiones contaminantes, etcétera. De esa cuenta, a nivel internacional se ha seleccionado una serie de parámetros de manera que se pueda realizar pruebas de laboratorio y establecer si los aceites combustibles cumplen con tales requisitos.

Son aproximadamente siete las características fisicoquímicas de los aceites combustibles que se consideran de suma importancia para el desarrollo de este trabajo de investigación, las cuales se describen a continuación:

**Gravedad API:** De sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*, es una función especial de la densidad relativa de un volumen. Se define como la relación de la masa de un volumen dado de un líquido a 15.56 °C respecto a la masa de un volumen igual de agua pura a la misma temperatura.

Este parámetro, describe que tan pesado o liviano es un combustible comparándolo con el agua. Si la gravedad API es mayor a 10, entonces el

combustible es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en ésta. También se utiliza para comprar densidades de derivados del petróleo, por ejemplo, si una fracción de petróleo flota sobre otra, significa que es más liviana, y por tanto su gravedad API es mayor.

Densidad: Es la relación masa/volumen medida a una temperatura definida y su unidad de medida es  $\text{kg/m}^3$ . La densidad o masa específica de un aceite combustible es una propiedad muy importante, ya que si el aceite combustible tiene una densidad muy alta, podría no fluir durante los períodos de arranque, obstaculizando las bombas de combustible, filtros e inyectores.

Índice de cetano: Físicamente, el índice de cetano representa el retardo de la ignición del combustible en la cámara de combustión, es decir, cuanto más elevado es el índice de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de la combustión. Por el contrario, aquellos carburantes con un bajo índice de cetano requieren mayor tiempo para que ocurra la ignición y después queman muy rápidamente, produciendo altos índices de elevación de presión en dicha cámara. El índice de cetano está relacionado con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión.

Una combustión de calidad ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante. Si el índice de cetano es demasiado bajo, la combustión es inadecuada y da lugar a ruido excesivo en el motor, aumento de las emisiones, reducción en el rendimiento y aumento de la fatiga del motor. En resumen, el índice de cetano es un indicativo cinético de la eficiencia de la reacción que se lleva a cabo en los motores de combustión interna.

Poder Calorífico: Es una de las principales características de un combustible y representa la cantidad de energía que se produce en la combustión completa de una unidad de masa o de volumen.

El poder calorífico de un combustible varía en función de su composición química e indica la eficiencia termodinámica con la que ocurre la transformación de la energía, para pasar de energía química a energía mecánica.

Punto de escurrimiento: También conocido como *Pour Point*, es la menor temperatura a la cual un aceite combustible todavía fluye, cuando es sometido a enfriamiento bajo condiciones definidas. Dicho de otra manera, se puede definir como la temperatura mínima de un aceite combustible, luego de la cual, al disminuir la temperatura, éste deja de fluir.

Esta característica es importante ya que es un indicador de la temperatura mínima a la cual el combustible aún puede pasar por la bomba de inyección sin causar taponamientos en la misma.

Punto de enturbamiento: También conocido como *Cloud Point*, es la menor temperatura a la cual se observa nieve o turbidez en el combustible, lo cual indica el principio de la cristalización del mismo y marca el inicio del cambio de un estado líquido a un estado sólido, ya que las moléculas cambian de un estado caótico desordenado en su fase líquida, a una estructura monocristalina más o menos ordenada.

Esta característica es muy importante cuando las temperaturas ambiente de operación de los motores son muy bajas, ya que desde que se pone en marcha el motor, el combustible debe estar en condiciones de circular inmediatamente a través de las tuberías e inyectores, de lo contrario, se corre el riesgo de taponamiento de tuberías, filtros, y demás componentes del sistema de inyección del motor.

Punto de inflamación: También conocido como *Flash Point*, es la temperatura más baja en la cual los vapores de la superficie del combustible se inflaman

momentáneamente al contacto con una llama, y que desaparece al retirar la misma.

Esta propiedad es muy importante en temas de seguridad del manejo de los combustibles, ya que mientras menor sea el punto de inflamación de un producto, mayores son los riesgos de fuego, volatilidad y evaporación.

Viscosidad cinemática: Es el cociente de la viscosidad absoluta entre la densidad, e indica el tiempo necesario para que un volumen dado de sustancia recorra una longitud dada. Es la característica que indica la capacidad de lubricación de un combustible.

La viscosidad cinemática es muy importante para determinar el tamaño promedio de las gotas que se forman cuando el combustible es inyectado en el cilindro del motor. Si la forma del chorro y tamaño promedio de gotas de combustible es muy diferente de aquellos para el cual el motor fue diseñado, existirán problemas en la combustión, formación de depósitos, y el aceite de lubricación será contaminado por ésteres u otros productos de combustión incompleta.

## **2.1 Legislación regional y nacional sobre combustibles**

Las especificaciones de los aceites combustibles varían considerablemente de un país a otro, debido a que algunos de los parámetros fisicoquímicos deben adecuarse a las condiciones propias de cada país o región del mundo, por ejemplo, el punto de enturbamiento de un diesel 2D en Europa es menor que el que se especifica para Guatemala, debido a que las temperaturas de una noche de invierno europea son mucho menores que en nuestro país, de hecho, el punto de enturbamiento del diesel 2D en Guatemala es de 0 grados Celsius, mientras que en Europa es de menos 10 grados Celsius. Lo mismo sucede con los demás parámetros de los aceites combustibles, ante lo cual, los países han

decidido legislar las características que deben cumplir los combustibles para su comercialización, con el objeto de proteger al consumidor y que los combustibles que se distribuyen en el país, no ocasionen daños a los motores.

### **2.1.1 Normativa en Centro América**

Los cinco países del istmo centroamericano intentaron establecer una República Federal tras su independencia de España en 1821, pero los débiles vínculos económicos e infraestructurales, heredados del período colonial, contribuyeron al fracaso del proyecto. No obstante, la idea de la integración persistió y se dio un nuevo intento en 1951, al crear la Organización de los Estados Centroamericanos (ODECA) la cual dio paso en la década de 1960, a la firma del Tratado General de Integración Económica Centroamericana, el cual entró en vigencia en 1961 y estableció el marco básico para los esfuerzos de integración económica hasta la fecha.

El principal objetivo del Tratado General era crear un mercado común y una unión aduanera para fomentar y facilitar el comercio intraregional, con condiciones específicas sobre temas comerciales y aranceles externos unificados. De esa cuenta, se creó el Consejo de Ministros de Integración Económica (COMIECO), integrado por los Ministros de Economía y los Presidentes de los Bancos Centrales de los países miembros, el cual se ocupa de la coordinación, armonización y convergencia de las políticas económicas de los países miembros.

El COMIECO es el ente encargado de aprobar los Reglamentos Técnicos que se elaboren sobre diversos temas comerciales, tal es el caso de los Reglamentos Técnicos Centro Americanos relacionados con combustibles, los cuales son una norma de carácter referencial y se convierten en obligatorios hasta el momento en que cada país los publica como propios mediante acuerdos o decretos nacionales.

El Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.17:06 “Productos de petróleo. Aceite Combustible Diesel. Especificaciones”, establece las características fisicoquímicas que debe cumplir el diesel para uso automotriz en los cinco países de la región centroamericana. Este reglamento es una adaptación de las especificaciones que aparecen en la norma ASTM D 975-06 (Grado No. 2-D) de Estados Unidos.

A continuación se detallan las características fisicoquímicas exigidas para el diesel en el Reglamento Técnico Centroamericano 75.02.17:06.

### **Cuadro III. Especificaciones técnicas del diesel 2D en Centroamérica**

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Apariencia	---	Claro y brillante
Aditivos	---	Reportar
Color ASTM	---	Reportar
Índice de cetano calculado	---	45 mínimo
Número de cetano	---	45 mínimo
Corrosión tira de cobre	---	No. 2 máximo
Contenido de cenizas	fracción de masa (% de masa)	0.01 máximo
Contenido de azufre total	fracción de masa (% de masa)	0.50 máximo
Residuo de carbón Conradson en 10 % residuo	fracción de masa (% de masa)	0.10 máximo
Residuo de carbón Ramsbottom en 10 % residuo	fracción de masa (% de masa)	0.13 máximo
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% de volumen)	0.05 máximo
Punto de inflamación	° C	52 mínimo
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	Reportar
Punto de escurrimiento	° C	Reportar
Punto de enturbamiento	° C	10 máximo (Ver nota limitación climática para

		Guatemala)
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	1.9 - 4.1
Destilación: 10% recuperados 50% recuperados 90% recuperados Punto final de ebullición	° C ° C ° C ° C	Reportar Reportar 360 máximo Reportar
Aromáticos	fracción de volumen (% de volumen)	Reportar

Nota por limitación climática para Guatemala: En relación al punto de enturbamiento, se acordó mantener en 10 °C máximo para Costa Rica, El Salvador, Honduras y Nicaragua. Para Guatemala, debido a sus condiciones climáticas y geográficas, se fija el punto de enturbamiento en un máximo de 0 °C.

Fuente: Elaboración propia con datos del Reglamento Técnico Centroamericano 75.02.17:06.

Algunos parámetros indican “reportar”, tal es el caso de la gravedad API, el punto de enturbamiento y los aditivos, esto se debe a que cuando se elaboró dicho reglamento, no todos los países del área contaban con datos históricos de dichos parámetros, por lo tanto se definieron como “reportar”, con el fin de obtener datos estadísticos y poder definir, en una posterior revisión del reglamento, los valores más adecuados de acuerdo a las condiciones de Centroamérica.

Por otra parte, el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07 “Biocombustible, Biodiesel (B100) y sus Mezclas con Aceite Combustible Diesel. Especificaciones”, establece las características que debe cumplir el biodiesel para su comercialización en los 5 países centroamericanos.

El objetivo del reglamento, el cual entró en vigencia el 24 de octubre del 2007, es especificar las características fisicoquímicas que debe cumplir el biodiesel

para ser utilizado o comercializado como combustible y es una adaptación de las especificaciones internacionales del biodiesel que aparecen en las normas ASTM D 6757-07 y EN 14214:2003, de Estados Unidos y la Unión Europea respectivamente.

Este reglamento no indica los porcentajes de mezcla a utilizarse en el país, ya que dicho parámetro queda a discreción y conveniencia de los países centroamericanos, sin embargo, si se utilizan porcentajes de mezcla hasta el 5 por ciento de biodiesel mezclado con diesel 2D, el combustible deberá cumplir con las especificaciones del Diesel 2D como mínimo. Para porcentajes de mezcla superiores al 5 por ciento, cada país deberá definir una norma de especificaciones para dicha mezcla.

A continuación se detallan las características físico-químicas exigidas para el biodiesel en el Reglamento Técnico Centroamericano 75.02.43:07.

#### **Cuadro IV. Especificaciones técnicas del biodiesel en Centroamérica.**

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Aditivos	---	Reportar
Contenido de ésteres	fracción de masa (% de masa)	0.965 (96.5) mínimo
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	Reportar
Estabilidad a la oxidación	H	6,0 mínimo
Punto de inflamación	° C	130.0 mínimo
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% en volumen)	0.00050 (0.050) máximo
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	1.9 - 6.5
Ceniza sulfatada	fracción de masa (% de masa)	0.00020 (0.020) máximo
Contenido de azufre total	mg/kg	15 máximo
Corrosión tira de cobre	---	Nº 3 máximo
Número de cetano	---	47 mínimo

Punto de enturbamiento	° C	Reportar
Residuo de carbón	fracción de masa (% de masa)	0.00050 (0.050) máximo
Número ácido	mg KOH / g	0.50 máximo
Glicerina libre	fracción de masa (% de masa)	0.00020 (0.020) máximo
Glicerina total	fracción de masa (% de masa)	0.00240 (0.240) máximo
Contenido de fósforo	fracción de masa (% de masa)	0.00001 (0.001) máximo
Temperatura de destilación	° C	360 máximo
Sodio y potasio combinados	mg/kg	5 máximo
Calcio y magnesio combinados	mg/kg	5 máximo

Fuente: Elaboración propia con datos del Reglamento Técnico Centroamericano 75.02.43:07.

Al igual que con el reglamento técnico del diesel, algunos parámetros indican “reportar”, tal es el caso de la gravedad API, el punto de enturbamiento y los aditivos, esto se debe a que cuando se elaboró dicho reglamento, los países del área no contaban con datos históricos de dichos parámetros, por lo tanto se definieron como “reportar”, con el fin de obtener datos estadísticos y poder definir, en una posterior revisión del reglamento, los valores más adecuados de acuerdo a las condiciones de Centroamérica.

El artículo 10 del reglamento indica que el mismo será revisado un año después de su entrada en vigencia y posteriormente cada dos años, sin embargo, el mismo no ha sido revisado desde abril del 2007, fecha en la cual fue elaborado.

### **2.1.2 Normativa en Guatemala**

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) es el ente rector en materia de política energética en Guatemala y cumple, por medio de la Dirección General de Hidrocarburos, su función de fiscalización de los productos petroleros que se comercializan en el país, para lo cual cuenta con un Laboratorio Técnico para determinar las especificaciones de muestras de los combustibles que se comercializan en el territorio nacional.

La Ley General de Comercialización de Hidrocarburos establece, en su Artículo 10, que la Dirección General de Hidrocarburos debe publicar anualmente mediante un Acuerdo Ministerial, la Nómima de Productos Petroleros en la cual se indican las características que dichos productos deben cumplir para su comercialización en el país.

La Nomina de Productos Petroleros incluye las especificaciones de calidad de los siguientes combustibles:

- a) Propano comercial
- b) Butano comercial
- c) Gasolina superior
- d) Gasolina regular
- e) Gasohol 90/10
- f) Gasolina de aviación
- g) Kerosene de iluminación
- h) Kerosene de aviación
- i) Aceite combustible diesel
- j) Bunker C

Para cada uno de estos combustibles, se indican las denominaciones, características y especificaciones de calidad que deben cumplir para poder ser importados, producidos o comercializados en Guatemala.

**Cuadro V. Especificaciones técnicas del diesel 2D en Guatemala.**

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Apariencia	---	Claro y brillante
Aditivos	---	Reportar
Color ASTM	---	Reportar
Índice de cetano calculado	---	45 mínimo
Número de cetano	---	45 mínimo
Corrosión tira de cobre	---	No. 2 máximo
Contenido de cenizas	fracción de masa (% de masa)	0.01 máximo
Contenido de azufre total	fracción de masa (% de masa)	0.50 máximo
Residuo de carbón Conradson en 10 % residuo	fracción de masa (% de masa)	0.10 máximo
Residuo de carbón Ramsbottom en 10 % residuo	fracción de masa (% de masa)	0.13 máximo
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% de volumen)	0.05 máximo
Punto de inflamación	° C	52 mínimo
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	Reportar
Punto de escurrimiento	° C	Reportar
Punto de enturbamiento	° C	0 máximo
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	1.9 - 4.1
Destilación: 10% recuperados 50% recuperados 90% recuperados Punto final de ebullición	° C ° C ° C ° C	Reportar Reportar 360 máximo Reportar
Aromáticos	fracción de volumen (% de volumen)	Reportar

Fuente: Elaboración propia con datos de la Nómima de Productos Petroleros.

Las especificaciones indicadas en la Nómina de Productos Petroleros, se basa en el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.17:06 “Productos de petróleo. Aceite Combustible Diesel. Especificaciones”, y se muestran en el cuadro V.

Por otra parte, las especificaciones de calidad del biodiesel que se comercialice en Guatemala, se establecen en el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07 “Biocombustible, Biodiesel (B100) y sus Mezclas con Aceite Combustible Diesel. Especificaciones”, sin embargo, dado que para que sea una norma oficial, cada país miembro debe oficializarlo mediante la publicación nacional a través de un Acuerdo Gubernativo o similar, cuestión que en Guatemala aún no ha sucedido, por lo tanto, las especificaciones indicadas en el RTCA siguen siendo de carácter referencial.

## **2.2 Pruebas de laboratorio**

Para determinar si una muestra de un combustible cumple con la legislación nacional existen laboratorios, como el del Ministerio de Energía y Minas, en donde se realizan pruebas siguiendo los métodos oficiales para determinar los parámetros fisicoquímicos de dichas muestras. Para comparar el contenido y eficiencia energética de las muestras obtenidas de los aceites combustibles, diesel 2D, biodiesel FAME y biodiesel HEBD, objeto de este trabajo de investigación, se realizaron pruebas en el Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas, para determinar sus respectivos parámetros fisicoquímicos, los cuales se muestran a continuación.

### **Diesel 2D**

Para realizar la prueba, se compró un galón de diesel 2D en una estación de servicio en la ciudad capital, de la cual se envió aproximadamente 1 litro al

Laboratorio Técnico del Ministerio de Energía y Minas para su análisis. El cuadro VI muestra los resultados.

**Cuadro VI. Resultados de laboratorio del diesel 2D.**

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Índice de cetano calculado	---	47
Número de cetano	---	45.7
Corrosión tira de cobre	---	No. 1
Contenido de azufre total	fracción de masa (% de masa)	0.27
Residuo de carbón Ramsbottom en 10 % residuo	fracción de masa (% de masa)	0.12 máximo
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% de volumen)	0.00
Punto de inflamación	° C	64
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	34
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	2.8
Destilación: 10% recuperados	° C	212
50% recuperados	° C	272
90% recuperados	° C	329
Punto final de ebullición	° C	362
Aromáticos	fracción de volumen (% de volumen)	36.0
Calor de combustión	MJ/kg	45.68

Fuente: Elaboración propia con datos del Informe del Laboratorio Técnico del MEM.

### **Biodiesel FAME**

En el caso del biodiesel FAME, se obtuvo un galón de biodiesel producido por una empresa procesadora de embutidos, quien transforma en biodiesel el aceite vegetal reutilizado proveniente de restaurantes de pollo frito. Los resultados se muestran en el cuadro VII.

**Cuadro VII. Resultados de laboratorio del biodiesel FAME.**

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	28.6
Punto de inflamación	° C	112
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% en volumen)	< 0.00050 (< 0.050)
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	5.1
Contenido de azufre total	mg/kg	No detectable
Corrosión tira de cobre	---	Nº 1
Índice de cetano	---	46
Carbón Ramsbottom	fracción de masa (% de masa)	0.00040 (0.040)
Temperatura de destilación	° C	328
10% recuperados	° C	333
50% recuperados	° C	348
90% recuperados	° C	353
Punto final de ebullición		
Calor de combustión	MJ/kg	40.14

Fuente: Elaboración propia con datos del Informe del Laboratorio Técnico del MEM.

### **Biodiesel HEBD**

El biodiesel HEBD utilizado para las pruebas se obtuvo de la empresa *West River Chemicals*, el cual fue producido a partir de aceite de girasol. El cuadro VIII muestra los resultados.

**Cuadro VIII. Resultados de laboratorio del biodiesel HEBD.**

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	36.0
Punto de inflamación	° C	81
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% en volumen)	< 0.00050 (< 0.050)
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	5.5
Contenido de azufre total	mg/kg	No detectable
Corrosión tira de cobre	---	Nº 1
Índice de cetano	---	55
Carbón Ramsbottom	fracción de masa (% de masa)	0.00070 (0.070)
Temperatura de destilación	° C	253
10% recuperados	° C	304
50% recuperados	° C	354
90% recuperados	° C	358
Punto final de ebullición		
Calor de combustión	MJ/kg	42.67

Fuente: Elaboración propia con datos del Informe del Laboratorio Técnico del MEM.

### **2.2.1. Comparación de los resultados de las pruebas de laboratorio de los 3 aceites combustibles y las normas nacionales y regionales de combustibles.**

Como se explicó en el capítulo anterior, existen distintos métodos de producción de biodiesel, por tanto, para poder realizar una comparación entre las ventajas de cada método y establecer la tecnología más apropiada para producir biodiesel, es necesario establecer las características fisicoquímicas de los mismos para determinar el contenido energético y rendimiento, de tal forma que su uso produzca un rendimiento lo más cercano al diesel fósil.

A continuación se muestra un cuadro con los parámetros fisicoquímicos establecidos en la normativa legal guatemalteca y los resultados de las pruebas de laboratorio de la muestra de diesel 2D.

**Cuadro IX. Comparación entre los parámetros establecidos en la normativa legal y el diesel 2D analizado.**

<b>Características</b>	<b>Unidades</b>	<b>Norma</b>	<b>Muestra</b>
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	Reportar	34.0
Punto de inflamación	° C	52 mínimo	64
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% en volumen)	0.05 máximo	0.00
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	1.9 - 4.1	2.8
Contenido de azufre total	mg/kg	0.50 máximo	0.27
Corrosión tira de cobre	---	Nº 2 máximo	Nº 1
Índice de cetano	---	Mínimo 45	47
Carbón Ramsbottom	fracción de masa (% de masa)	0.13 máximo	0.12
Temperatura de destilación	° C	Reportar	212
10% recuperados	° C	Reportar	272
50% recuperados	° C	360 máximo	329
90% recuperados	° C	Reportar	362
Punto final de ebullición			
Calor de combustión	MJ/kg	-----	45.68

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los cuadros V y VI.

De acuerdo a los resultados de laboratorio, la muestra de diesel 2D analizada, cumple con la normativa legal para su comercialización en el país, ya que todos los parámetros están dentro de los límites que establece la Nómima de Productos Petroleros del Ministerio de Energía y Minas.

Es importante señalar que se realizó una prueba de laboratorio para establecer el calor de combustión, o poder calorífico del diesel 2D, el cual obtuvo un valor de 45.68 MJ/kg. Este será el valor de referencia para analizar las 2 muestras de biodiesel.

**Cuadro X. Comparación entre los parámetros establecidos en la normativa legal y el biodiesel analizado.**

Características	Unidades	Norma	Biodiesel FAME	Biodiesel HEBD
Gravedad API	°API kg/m <sup>3</sup>	Reportar	28.6	36.0
Punto de inflamación	°C	130 mínimo	112	81
Agua y sedimentos	fracción de volumen (% en volumen)	0.00050 (0.050) máximo	< 0.00050 (< 0.050)	< 0.00050 (< 0.050)
Viscosidad cinemática	mm <sup>2</sup> /s	1.9 - 6.5	5.1	5.5
Contenido de azufre total	mg/kg	15 máximo	No detectable	No detectable
Corrosión tira de cobre	---	Nº 3 máximo	Nº 1	Nº 1
Índice de cetano	---	47 mínimo	46	55
Carbón Ramsbottom	fracción de masa (% de masa)	0.00050 (0.050) máximo	0.00040 (0.040)	0.00070 (0.070)
Temperatura de destilación	° C	---	328	253
10% recuperados	° C	---	333	304
50% recuperados	° C	360 máximo	348	354
90% recuperados	° C	---	353	358
Punto final de ebullición				
Calor de combustión	MJ/kg	---	40.14	42.67

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los cuadros IV, VII y VIII.

Al efectuar el análisis de laboratorio de las dos muestras de biodiesel, se puede apreciar que ninguno cumple con lo establecido en el Reglamento Técnico

Centroamericano de biodiesel, ya que hay varios parámetros que se salen de la especificación.

En el caso del punto de inflamación, ambas muestras de biodiesel están por debajo de lo normado, esto podría representar un peligro en su manejo, ya que hay una diferencia de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el caso de la muestra de biodiesel FAME, y  $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la muestra de biodiesel HEBD. Con los valores registrados del punto de inflamación de las dos tipos muestras de biodiesel, podrían existir riesgos de fuego, volatilidad y evaporación en su almacenamiento, transporte y distribución.

Al analizar el índice de cetano, se observa que la muestra de biodiesel FAME no cumple con la especificación por una unidad, mientras la de biodiesel HEBD rebasa lo establecido en ocho unidades, lo cual indica que la muestra utilizada de HEBD tiene mejores características de combustión que la muestra de biodiesel FAME e incluso que el diesel 2D, lo que podría representar un mejor rendimiento y se verificará en el capítulo siguiente.

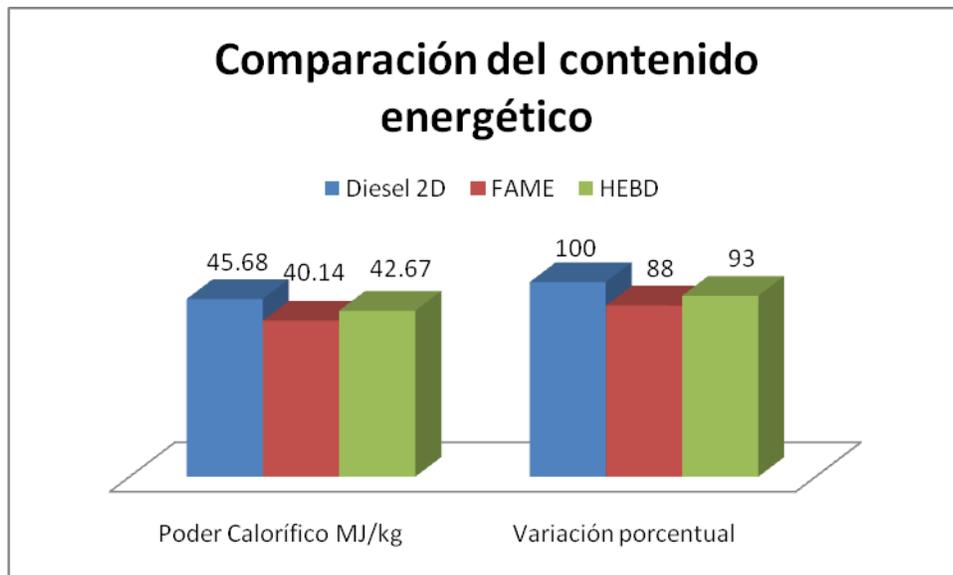
El parámetro denominado Carbón Ramsbottom, la muestra de biodiesel FAME se encuentra dentro de la especificación, mientras la de biodiesel HEBD no cumple por estar 0.02 por ciento de la masa, por encima de lo establecido, lo cual podría indicar que esta muestra de biodiesel tiene una tendencia más alta a producir depósitos de carbón en los inyectores de los motores y los cilindros.

Para el calor de combustión o poder calorífico de las muestras de biodiesel analizadas, podemos observar que la de biodiesel FAME obtuvo un valor de  $40.14\text{ MJ/kg}$ , mientras que la muestra de biodiesel HEBD registró  $42.67\text{ MJ/kg}$ .

Al comparar estos valores con el calor de combustión del diesel 2D, el cual reveló  $45.68\text{ MJ/kg}$ , se observa que la muestra de biodiesel HEBD tiene un

poder calorífico equivalente al 93 por ciento en relación al diesel fósil, mientras la muestra de biodiesel FAME únicamente el 88 por ciento. Esto indica que la muestra utilizada de biodiesel HEBD tiene mayor contenido energético lo cual, en la fase experimental de las pruebas mecánicas, se deberá traducir en una mayor eficiencia energética.

**Figura 3. Comparación del contenido energético de los tres aceites combustibles de acuerdo a su poder calorífico.**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los cuadros IX y X.

Para el resto de parámetros, ambas muestras de biodiesel están dentro de los límites que establece la especificación. Merece atención especial el contenido de azufre total, que los resultados de laboratorio indican “no detectable”, lo cual es uno de los principales beneficios ambientales del biodiesel, ya que durante la combustión no se generan emisiones de óxido de azufre.



### **3. PRUEBA DE RENDIMIENTO PARA ACEITES COMBUSTIBLES**

Para establecer el rendimiento de las muestras de diesel 2D, biodiesel FAME y biodiesel HEBD, se realizó una prueba para medir la cantidad de vatios-hora generados en una planta eléctrica portátil.

#### **Descripción del ensayo**

La prueba se realizó en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el laboratorio de química y en el laboratorio de operaciones unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, utilizando los siguientes materiales y equipos:

- 2 litros de diesel 2D
- 2 litros de biodiesel FAME
- 2 litros de biodiesel HEBD
- 1 litro de hexano
- 1 Medidor de calidad de energía eléctrica
- 1 Planta de generación de energía eléctrica con capacidad de 2 kW
- 1 Resistencia eléctrica para calentar agua de 1 kW
- 3 recipientes de 19 litros (cubetas de pintura)
- 15 micropipetas
- 3 beacker de 200 ml
- 2 soportes universales
- 13 envases de 255 ml para almacenamiento de muestras
- Agua

Inicialmente se prepararon las muestras de 100 ml de los tres tipos de aceite combustible con los que se realizaría la prueba de rendimiento y se etiquetaron de la manera siguiente:

**Cuadro XI. Descripción de las muestras de aceites combustibles al 100 por ciento.**

Nombre	Descripción
B0	Muestra de 100 % diesel 2D
B100 <sub>FAME</sub>	Muestra de 100 % biodiesel tipo FAME
B100 <sub>HEBD</sub>	Muestra de 100 % biodiesel tipo HEBD

Fuente: Elaboración propia.

Al observar que sobraba suficiente combustible, se decidió preparar muestras adicionales mezclando el diesel 2D con biodiesel, de tal manera que se pudiera comprobar el efecto que tiene en la eficiencia del motor, la mezcla de diesel fósil y biodiesel en diferentes proporciones. De esa cuenta, se prepararon las siguientes muestras de 100 ml:

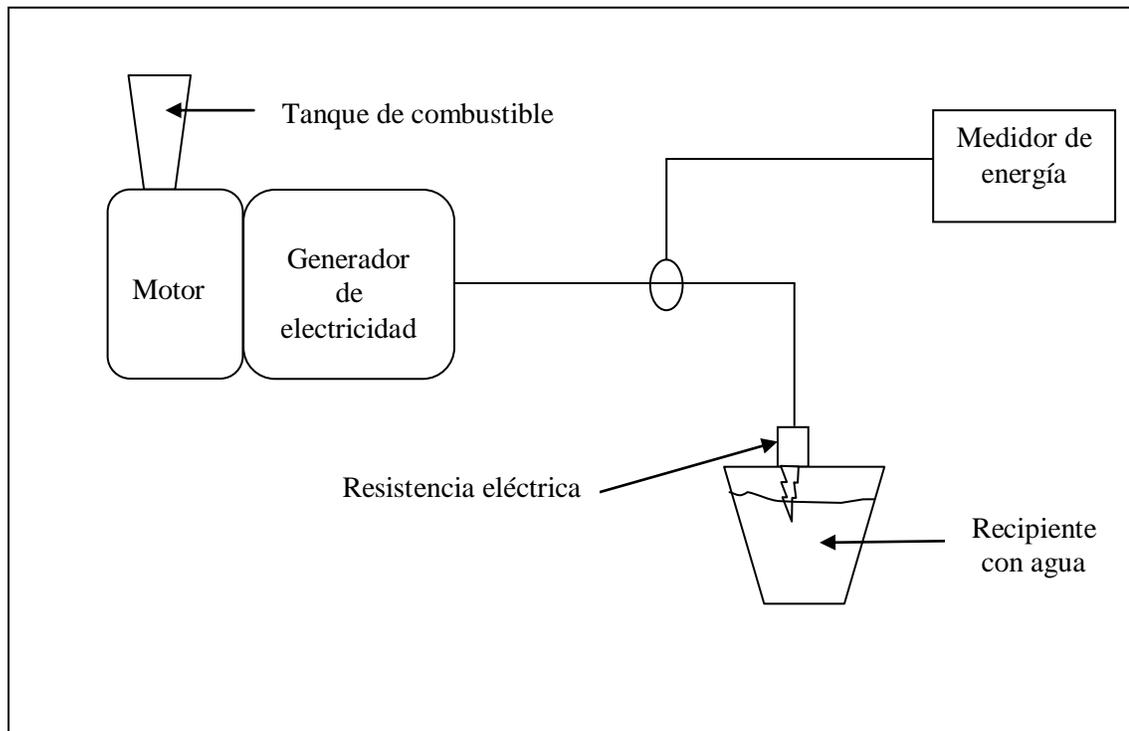
**Cuadro XII. Descripción de las muestras de distintos tipos de mezcla de diesel 2D con biodiesel.**

Nombre	Descripción
B5 <sub>FAME</sub>	Muestra con 5 % de biodiesel tipo FAME y 95 % de diesel 2D
B10 <sub>FAME</sub>	Muestra con 10 % de biodiesel tipo FAME y 90 % de diesel 2D
B20 <sub>FAME</sub>	Muestra con 20 % de biodiesel tipo FAME y 80 % de diesel 2D
B50 <sub>FAME</sub>	Muestra con 50 % de biodiesel tipo FAME y 50 % de diesel 2D
B80 <sub>FAME</sub>	Muestra con 80 % de biodiesel tipo FAME y 20 % de diesel 2D
B5 <sub>HEBD</sub>	Muestra con 5 % de biodiesel tipo HEBD y 95 % de diesel 2D
B10 <sub>HEBD</sub>	Muestra con 10 % de biodiesel tipo HEBD y 90 % de diesel 2D
B20 <sub>HEBD</sub>	Muestra con 20 % de biodiesel tipo HEBD y 80 % de diesel 2D
B50 <sub>HEBD</sub>	Muestra con 50 % de biodiesel tipo HEBD y 50 % de diesel 2D
B80 <sub>HEBD</sub>	Muestra con 80 % de biodiesel tipo HEBD y 20 % de diesel 2D

Fuente: Elaboración propia

Al tener listas las 13 muestras, con un volumen de 100 ml cada una, se procedió a la instalación de los equipos necesarios para realizar la prueba, de acuerdo a la figura 4.

**Figura 4. Configuración del equipo para realizar la prueba de eficiencia.**



Fuente: Elaboración propia.

Para iniciar la prueba, se arrancó el generador de electricidad utilizando 300 ml de diesel 2D para limpiar las líneas de combustible del generador y evitar que los posibles residuos afectaran las mediciones a realizar, luego se marcó el tanque de combustible de manera que se utilizara el mismo volumen de combustible en cada una de las corridas. Cada prueba consistió en 3 corridas de la misma muestra para poder realizar un promedio, cada corrida consistió de los siguientes pasos:

- Colocar el volumen de la muestra en el tanque de combustible, de acuerdo a la marca establecida en el mismo
- Llenar con agua fresca el recipiente que contiene la resistencia eléctrica
- Preparar el medidor de energía para la toma de lectura
- Arrancar el motor del generador e iniciar la toma de lectura del medidor de energía
- Una vez consumido el volumen de combustible, apagar el medidor de energía y registrar el valor de vatios-hora generados
- Apagar el motor

Después de realizar cada prueba, es decir al realizar 3 corridas de una misma muestra, se procedió a limpiar con la siguiente muestra, las líneas de combustible del generador, de tal manera que los residuos de la muestra anterior no contaminara la prueba de la siguiente muestra.

La primera prueba se realizó con la muestra B0, la cual fue la que sirvió de referencia para comparar los demás resultados. El siguiente cuadro muestra el orden en el cual se corrieron las pruebas con las distintas muestras:

**Cuadro XIII. Orden con el cual se realizaron las pruebas de eficiencia.**

Número de orden	Descripción de la muestra
1	B0
2	B5 <sub>FAME</sub>
3	B10 <sub>FAME</sub>
4	B20 <sub>FAME</sub>
5	B50 <sub>FAME</sub>
6	B80 <sub>FAME</sub>
7	B100 <sub>FAME</sub>

8	B5 <sub>HEBD</sub>
9	B10 <sub>HEBD</sub>
10	B20 <sub>HEBD</sub>
11	B50 <sub>HEBD</sub>
12	B80 <sub>HEBD</sub>
13	B100 <sub>HEBD</sub>

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que, una vez realizada la prueba de la muestra B100<sub>FAME</sub>, se limpio con 300 ml de diesel 2D las líneas de combustible del generador, para evitar que al realizar las pruebas con el biodiesel HEBD, tuviera restos del biodiesel FAME.

### 3.1. Resultados del ensayo

Las pruebas se realizaron el mismo día, para mantener las mismas condiciones del motor en cuanto a su temperatura de trabajo, de tal forma que cada prueba se realizara bajo condiciones similares y los resultados pudieran ser comparables.

#### Diesel 2D

Los resultados de las pruebas con el diesel 2D se muestran en el cuadro XIV.

**Cuadro XIV. Resultados obtenidos con las muestras de diesel 2D.**

	Vatios-hora generados (Wh)			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
B0	188	187	187	187.3

Fuente: Elaboración propia.

Considerando el diesel 2D como la referencia para comparar los demás resultados, se tomará el valor de 187.3 vatios-hora como la línea base.

### Biodiesel FAME

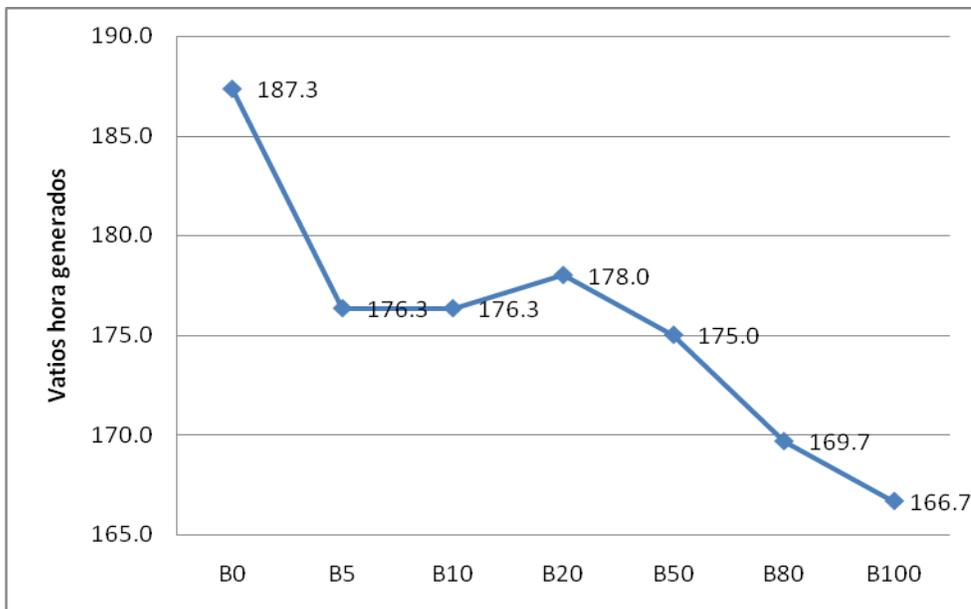
Los resultados de las pruebas con el biodiesel FAME se muestran en el cuadro XV.

**Cuadro XV. Resultados obtenidos con las muestras de biodiesel FAME.**

	Vatios-hora generados (Wh)			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
B5 <sub>FAME</sub>	176	177	176	176.3
B10 <sub>FAME</sub>	177	176	176	176.3
B20 <sub>FAME</sub>	179	177	178	178.0
B50 <sub>FAME</sub>	177	173	175	175.0
B80 <sub>FAME</sub>	171	168	170	169.7
B100 <sub>FAME</sub>	173	163	164	166.7

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 5. Eficiencia energética de distintas mezclas de biodiesel FAME.**



Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 muestra la variación en el rendimiento del motor con diferentes porcentajes de mezcla de diesel 2D con biodiesel FAME. La gráfica muestra que el combustible B0 (diesel 2D al 100 por ciento) tiene un rendimiento superior al B100 (biodiesel FAME al 100 por ciento), lo cual es la confirmación de lo establecido en las pruebas de laboratorio, ya que el B0 mostró un poder calorífico de 45.68 MJ/kg, mientras el B100 únicamente 40.14 KJ/kg. La diferencia porcentual en rendimiento de vatios-hora generados, entre el B0 y el B100 es de 11 por ciento.

Es importante destacar que, aún con pequeños porcentajes de biodiesel FAME, el rendimiento en el motor se reduce, lo cual se debe a que el biocombustible mostró, de acuerdo a los resultados del laboratorio, un índice de cetano de 46, una unidad por debajo de la especificación.

### **Biodiesel HEBD**

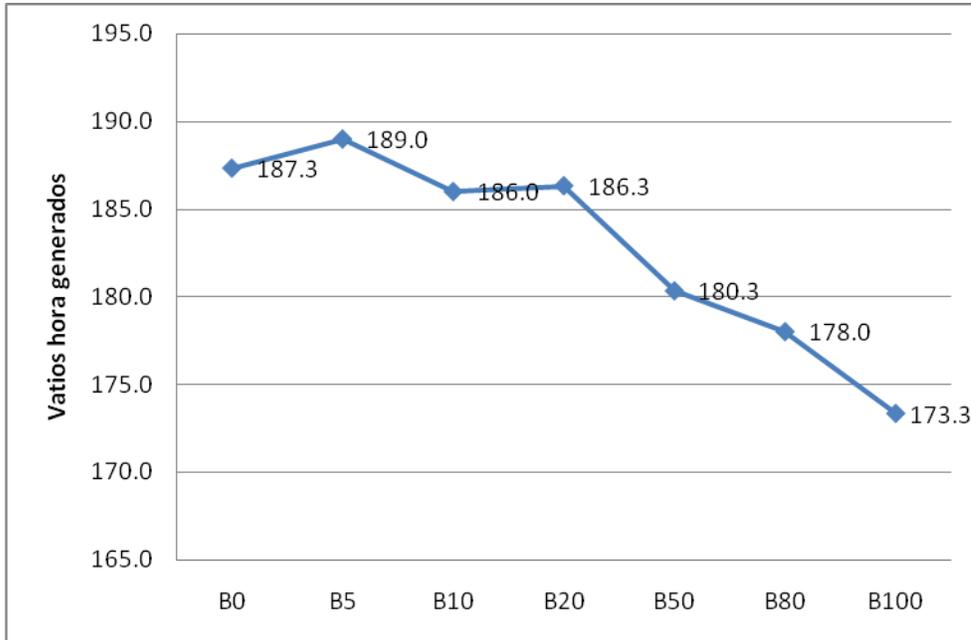
Los resultados de las pruebas con el biodiesel HEBD se muestran en el cuadro XVI.

**Cuadro XVI. Resultados obtenidos con las muestras de biodiesel HEBD.**

	Vatios-hora generados (Wh)			
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
B5 <sub>HEBD</sub>	188	191	188	189.0
B10 <sub>HEBD</sub>	185	186	187	186.0
B20 <sub>HEBD</sub>	186	186	187	186.3
B50 <sub>HEBD</sub>	180	181	180	180.3
B80 <sub>HEBD</sub>	178	178	178	178.0
B100 <sub>HEBD</sub>	175	172	173	173.3

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6. Eficiencia energética de distintas mezclas de biodiesel HEBD.**



Fuente: Elaboración propia

La figura 6 muestra la variación en el rendimiento del motor con diferentes porcentajes de mezcla de diesel 2D con biodiesel HEBD. La gráfica muestra que el combustible B0 (diesel 2D al 100 por ciento) tiene un rendimiento superior al B100 (biodiesel HEBD al 100 por ciento), lo cual es la confirmación de lo establecido en las pruebas de laboratorio, ya que el B0 mostró un poder calorífico de 45.68 MJ/kg, mientras el B100 únicamente 42.67 KJ/kg. La diferencia porcentual en rendimiento de vatios-hora generados, entre el B0 y el B100 es de 6.5 por ciento, lo cual ofrece un mejor rendimiento que el ofrecido por el biodiesel FAME, que redujo 11 por ciento la eficiencia.

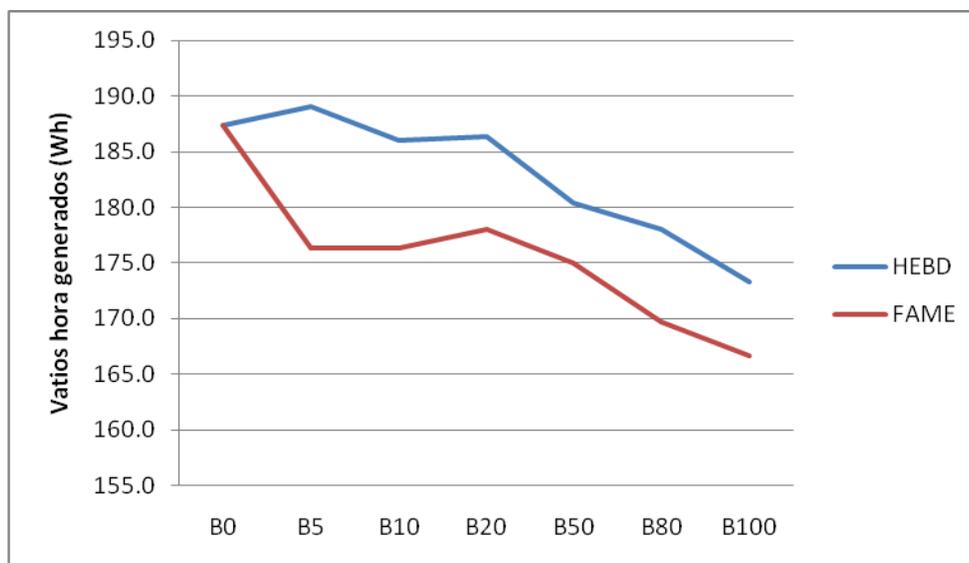
Un dato importante que se observa en la gráfica son los vatios-hora generados por la muestra B5, que son superiores a los generados por la muestra B0, esto se debe a que, aún cuando el poder calorífico del HEBD es inferior al diesel 2D, el índice de cetano del biodiesel HEBD es 9 unidades mayor que el del diesel

2D, lo cual compensó la eficiencia global en el rendimiento, incrementando la cantidad de vatios-hora generados, es decir, con la muestra B5 se mezclan las mejores propiedades de los dos combustibles, el alto poder calorífico del diesel 2D y el alto índice de cetano del biodiesel HEBD.

### 3.1.1 Comparación de los resultados de la prueba de rendimiento de las 3 muestras de aceites combustibles.

Luego de realizadas las pruebas con los tres tipos de aceite combustible, de acuerdo a la figura 7, se observa que cuando se utiliza el aceite combustible al 100 por ciento, el diesel 2D es el que presenta el mejor rendimiento, seguido por el biodiesel HEBD y por último el biodiesel FAME. Sin embargo, al realizar una mezcla de 5 por ciento de biodiesel HEBD y 95 por ciento de diesel 2D, se logró incrementar un 1 por ciento la eficiencia, debido a que se conjugan las mejores propiedades de ambos combustibles.

**Figura 7. Comparación de vatios-hora generados con distintas mezclas de biodiesel.**



Fuente: Elaboración propia.

La tendencia a reducir la eficiencia, mientras más alto es el valor de biodiesel presente en el combustible, es la misma para los dos tipos de biodiesel.

## CONCLUSIONES

1. Las propiedades fisicoquímicas de las muestras de biodiesel utilizado varían dependiendo de su método de fabricación.
2. La muestra de diesel 2D, a la cual se realizaron las pruebas de laboratorio, cumple con la normativa vigente en el país establecida en el Acuerdo Gubernativo 204-2007.
3. Ninguna de las dos muestras de biodiesel analizadas cumple con los parámetros fisicoquímicos establecidos en el Reglamento Técnico Centroamericano 75.02.43:07.
4. Del análisis de laboratorio y prueba de rendimiento se acepta la hipótesis nula, los aceites combustibles tienen distinto contenido energético dependiendo su origen.
5. La muestra de biodiesel FAME analizada tiene un contenido energético más bajo que la muestra del biodiesel tipo HEBD, lo cual se comprobó tanto en las pruebas de laboratorio como en la prueba de eficiencia efectuada.
6. La muestra analizada de biodiesel tipo HEBD tiene un contenido energético muy cercano al del diesel 2D.
7. Cuando se utilizó una mezcla de 5 por ciento de biodiesel HEBD y 95 por ciento de diesel 2D, se obtuvo un combustible que reunió las mejores características de cada componente, por una parte el alto contenido energético del diesel 2D y por otra, el alto índice de cetano del biodiesel HEBD.
8. La muestra B0 generó más vatios-hora en la prueba con el generador eléctrico, seguida de la muestra B100<sub>HEBD</sub>, mientras que la muestra B100<sub>FAME</sub> fue el que menos vatios-hora generó.



## RECOMENDACIONES

1. Es importante mantener los controles de calidad en la cadena de comercialización de hidrocarburos del país, a efecto de seguir disponiendo en el mercado local de combustibles que cumplen las especificaciones, como en el caso de la muestra de diesel 2D.
2. Es necesario fortalecer los controles de calidad en la producción de biodiesel en el país, sin importar el método de producción, para que los mismos cumplan las especificaciones de calidad y se puedan comercializar sin ningún inconveniente.
3. Se recomienda realizar pruebas de laboratorio para distintos porcentajes de mezcla entre diesel 2D y biodiesel, para determinar los parámetros fisicoquímicos importantes como el poder calorífico y el índice de cetano.
4. Al utilizar una mezcla de diesel 2D con biodiesel, se recomienda una proporción de 95 por ciento de diesel 2D y 5 por ciento de biodiesel HEBD, de tal manera que se pueda obtener una mejora en la eficiencia energética del combustible.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Burschel, Heinrich et al. **Leña: Una fuente energética renovable para Chile**. Chile: Editorial Universitaria, 2003, pág: 70-73.
2. Gallo, Waldyr. **Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras**. México. Cepal, 2007.
3. Hernández Castellanos, Maria Gabriela y García Guerra, César Alfonso. **Estudio para la generación de datos a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg, para una muestra de biodiesel elaborado con aceites usados de restaurantes de comida rápida**. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2009, pág: 17-35.
4. Knothe, Gerhard. **The Biodiesel Handbook**. Estados Unidos, Aocs Press, 2005, pág: 34-45.
5. Ministerio de Energía y Minas. **Ley de Comercialización de Hidrocarburos, Acuerdo Gubernativo 109-97**. Guatemala, 1997.
6. Ministerio de Energía y Minas. **Nómina de productos petroleros, Acuerdo Ministerial 204-2007**. Guatemala, 2007.
7. Ministerio de Energía y Minas. **Política Energética y Minera, 2008-2015. MEM-PRONACOM**. Guatemala, octubre 2007.

8. Ordoñez Cruz, Pedro Alejandro y Medrano, Antonio. **Síntesis de alcohol isopropílico a partir de glicerina obtenida del proceso de producción de biodiesel.** Trabajo de Graduación Maestría en Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, Escuela de Postgrado, 2008, pág: 1-11.
9. Petróleos de Venezuela. **El Pozo, ilustrado.** Venezuela, cuarta edición, PDVSA, pag: 12-40.
10. Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.17:06 **Productos de petróleo. Aceite combustible diesel. Especificaciones.** COMIECO, 2006.
11. Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07 Biocombustibles. **Biodiesel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel.** Especificaciones. COMIECO, 2007.
12. Salazar, José. **Hacia el libre comercio en las Américas.** Estados Unidos: Brookings Institution Press, 2001, pág: 48-55.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. [http://www.mem.gob.gt/Portal/Documents/Magazines/2009-02/480/REV-EST\\_2008\\_WEB.pdf](http://www.mem.gob.gt/Portal/Documents/Magazines/2009-02/480/REV-EST_2008_WEB.pdf)  
Estadísticas hidrocarburos año 2008.
2. <http://www.westernbiofuelsinc.com/pdfs/HEBF%20Technology%20Brochure.pdf>  
Características del biodiesel de alta entalpía.
3. [http://www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/Myths\\_and\\_Facts.pdf](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/Myths_and_Facts.pdf)  
Datos sobre el biodiesel
4. [http://www.biodieselpain.com/articulos/biocarburantes\\_madrid.pdf](http://www.biodieselpain.com/articulos/biocarburantes_madrid.pdf)  
Tecnología para la producción de biodiesel
5. <http://www.eclac.cl/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/3/29423/P29423.xml&xsl=/mexic>  
Producción de biodiesel en Centroamérica.



## ANEXOS



Fotografía 1. Vista general del equipo utilizado para realizar la prueba de eficiencia. Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, USAC. Tomada por Carlos Echeverría el 4 de octubre del 2008.



Fotografía 2. Medidor de calidad de energía eléctrica con el cual se registraron los valores de energía producida durante las pruebas. Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, USAC. Tomada por Carlos Echeverría el 4 de octubre del 2008.





Fotografía 3. Planta de generación de energía eléctrica con capacidad de 2 kW. Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, USAC. Tomada por Carlos Echeverría el 4 de octubre del 2008.



Fotografía 4. Resistencia eléctrica de 1 kW. Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería, USAC. Tomada por Carlos Echeverría el 4 de octubre del 2008.