

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE LOS  
MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL UTILIZAR BIODIESEL  
COMO COMBUSTIBLE**

**ANDRÉS ENRIQUE DÍAZ BUENDÍA**

**OSCAR JAVIER NAVAS MARIMÓN**



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS DT. Y C.**

**2004**

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE LOS  
MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL UTILIZAR BIODIESEL  
COMO COMBUSTIBLE**

**ANDRÉS ENRIQUE DÍAZ BUENDÍA**

**OSCAR JAVIER NAVAS MARIMÓN**

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título  
de Ingeniero Mecánico

Director

**JUAN FAJARDO CUADRO**

Asesor

**JOHN RAMIRO AGUDELO SANTAMARÍA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS DT. Y C.**

**2004**

Cartagena de indias, 19 de abril del 2004

Señores

**COMITÉ PROYECTO DE GRADO**

Facultad de Ingeniería Mecánica

La Ciudad

Distinguidos señores:

Por medio de la presente, me permito someter a su consideración la tesis titulada **“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL UTILIZAR BIODIESEL COMO COMBUSTIBLE”**.

Certifico como Asesor que esta tesis cumple con los objetivos propuestos y que, por lo tanto, califica como requisito para optar el título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente,

**JUAN GABRIEL FAJARDO CUADRO**

Cartagena de indias, 19 de abril del 2004

Señores

**COMITÉ PROYECTO DE GRADO**

Facultad de Ingeniería Mecánica

La Ciudad

Distinguidos señores.

Por medio de la presente nos permitimos informarles que el proyecto de grado titulado “**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO Y AMBIENTAL DE LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL UTILIZAR BIODIESEL COMO COMBUSTIBLE**” ha sido desarrollado de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como autores del proyecto consideramos que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado ante ustedes.

Cordialmente,

**ANDRÉS ENRIQUE DÍAZ BUENDÍA   OSCAR JAVIER NAVAS MARIMÓN**

**Artículo 107.**

La Universidad Tecnológica de Bolívar, se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados y no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Cartagena de Indias D. T. y C. 19 de abril de 2004

A Dios, por que nunca me abandonó por mas duro que fuera el camino y siempre me ayudó a levantarme por mas grande que fuera el tropiezo.

A mi padre, porque siempre creyó en mi y nunca desfalleció en su esfuerzo por realizarme como profesional, te agradezco mucho tu apoyo, sin ti este logro nunca hubiese sido posible. Muchas gracias.

A mi madre, por su apoyo espiritual y sabios consejos, siempre estuviste ahí a lo largo de este camino brindandome una palabra de aliento.

A mi tia Margarita, por su comprensión y apoyo incondicional. Te quiero mucho.

A mi esposa Yenedith y mi hijo Orlando Andrés, la luz de mi vida,

**ANDRÉS ENRIQUE**

A Dios por guiarme en todo momento y no dejarme desfallecer en este duro recorrido de la vida.

A mi padre por estar siempre ahí en los momentos que más lo necesite, gracias por hacer realidad este sueño.

A mi madre por su apoyo y consejos para lograr esta gran meta. Muchas gracias.

A la memoria de mi abuela a quien le dedico este triunfo.

A mi hermano por su apoyo y no dejarme renunciar por muy duro que pareciera. Gracias.

**OSCAR JAVIER**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

**JUAN FAJARDO CUADRO**, Director del proyecto, gracias por su colaboración en todo momento.

**JOHN RAMIRO AGUDELO**, por su interés en sacar adelante este proyecto y su oportuna colaboración.

**PEDRO QUINTERO**, por facilitarnos el motor para realizar este estudio.

**FAMILIA ARAUJO SCALDAFERRO**, por su colaboración.

**JAIME MARTINEZ HERNÁNDEZ, RAUL MONTERO G., JUAN MONTERO H., FELIPE TORRES C., JAVIER ZABALETA TORRES, RICARDO SIERRA**, por su colaboración técnica.

**FAMILIA VILLADIEGO BUENDÍA**, por facilitarnos las instalaciones para realizar este estudio.

A todos muchas gracias, sin ustedes esto no hubiese sido posible.

## TABLA DE CONTENIDO

		<b>Pág.</b>
	<b>LISTA DE TABLAS</b>	Xiv
	<b>LISTA DE FIGURAS</b>	Xv
	<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	Xvi
	 <b>CAPITULO 1</b>	 1
	Introducción	1
1.1	Objetivo General	2
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Alcance	2
1.4	El Biodiesel (Definición y Características)	3
1.4.1	Definición de Biodiesel	4
1.4.2	Propiedades del Biodiesel	4
1.4.3	Principales ventajas del biodiesel	5
1.4.4	Principales desventajas del biodiesel	6
1.4.5	Parámetros del Biodiesel	7
1.4.6	Contaminación Ambiental	9
1.5	Organización	11
	 <b>CAPITULO 2</b>	 13
	<b>OBTENCIÓN DEL BIODIESEL</b>	13
2.1	Producción de Biodiesel a Partir de Aceites Vegetales	13

	Crudos	
2.2	Producción de Biodiesel a Partir de Aceite Vegetal Usado (Avu)	16
2.2.1	Mezclado.	16
2.2.2	Separación	17
2.2.3	Glicerina	19
2.2.4	Jabón	19
2.2.5	Lavado	20
2.2.6	Valoración	21
2.2.7	El cálculo	23
2.2.8	Calidad	23
2.3	Proyecto Para La Producción De Biodiesel A Partir De Palma Africana En Colombia	24

### **CAPITULO 3** 27

#### **EXPLORACIÓN ANALÍTICA DE LOS EFECTOS EN LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN Y POTENCIA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL SUMINISTRARLE BIODIESEL COMO COMBUSTIBLE** 27

3.1	Exploración en la potencia del motor	27
3.2	Exploración de los efectos en los productos de la combustión	29

### **CAPITULO 4** 32

	<b>VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS EN LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN Y POTENCIA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL SUMINISTRARLE BODIESEL PURO (B100) COMO COMBUSTIBLE.</b>	<b>32</b>
4.1	Instrumentación de la Planta Eléctrica	32
4.1.1	Especificaciones de la Planta Eléctrica	33
4.1.2	Especificaciones de los Equipos de Medición de Emisiones	34
4.1.3	Especificaciones de los Equipos de Medición de Corriente y Voltaje	35
4.1.4	Especificaciones del Equipo de Medición de Temperatura	36
4.1.5	Especificaciones del Equipo de Medición de Velocidad del Motor	37
4.1.6	Especificaciones del equipo de Medición de Consumo de Combustible	38
4.2	Desempeño Del Motor De La Planta Eléctrica Al Utilizar Diesel (Acpm) O Biodiesel Puro (B100) Como Combustible	39
4.3	Emisiones contaminantes de motores de combustión interna	42
4.3.1	Medición de la Opacidad	44
4.3.2	Temperatura de los Gases de Escape y Temperatura de Aceite	46
4.4	Valoración Económica	46
	<b>CAPITULO 5</b>	<b>48</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>48</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>49</b>

<b>A. PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIONES PARA</b>	<b>49</b>
<b>PLANTA ELECTRICA</b>	
<b>REFERENCIAS</b>	<b>51</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1 ASTM PS121 para Biodiesel puro (100%)	7
Tabla 1.2. Normas Alemanas para Biodiesel (DIN V51606)	8
Tabla 1.3. Principales propiedades de los aceites vegetales y ésteres de Girasol, de Colza y de Soja. Comparación con Gas-oil	8
Tabla 1.4.Fórmula de sustitución de ésteres metílicos vegetales y propiedades químicas	9
Tabla 1.5.Fórmula de sustitución de ésteres etílicos vegetales y propiedades químicas	9
Tabla 2.1 Proyecto de biodiesel en Colombia	26
Tabla3.1 Límites de emisiones de vehículos pesados. Motores diesel, gnc y glp ( en gr/kWh)	31
Tabla 4.1 Especificaciones planta eléctrica.	34
Tabla 4.2. Características técnicas del opacímetro SPX DIESELTUNE DX_230	35
Tabla 4.3 Características técnicas del multímetro digital con pinza amperímetrica AWSPERRY DSA-600	35
Tabla 4.4 Tipos de termocuplas y sus características	36
Tabla 4.5 Características técnicas del Tacómetro análogo TUROTEST	37
Tabla 4.6 Pérdida de potencia	40
Tabla 4.7 Principales contaminantes emitidos por motores de combustión interna y sus principales efectos	43
Tabla 4.8 Normas permisibles de opacidad de humos para fuentes móviles a diesel	44
Tabla 4.9 Datos obtenidos del porcentaje de opacidad producida por cada tipo de mezcla	45
Tabla4.10.Precios del mercado del B100 y del ACPM	47
Tabla A.1. Formato de toma de datos	50

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1. Esquema del proceso de obtención del biodiesel	15
Figura2.2 Sistema para separar dos líquidos de diferentes densidades	18
Figura 2.3 Vasija de reacción	18
Figura2.4 Sistema para separar dos líquidos de diferentes densidades utilizando electricidad,	18
Figura 2.5 Sistema de lavado de Biodiesel usando un contenedor de PVC translúcido con una válvula a 7-10 cm del fondo.	20
Figura 2.6 El agua y otras impurezas se hunden al fondo.	21
Figura 2.7 Producción mundial de aceite de palma, 2001	24
Figura 2.8 Distribución de área cultivada y producción de aceite de palma en Colombia, 2001	24
Figura2.9 Cultivos de aceite de palma en Colombia	25
Figura 3.1. Cálculo de la Potencia de un motor de cuatro tiempos y encendido por compresión, al suministrarle Diesel y Biodiesel como combustible, en función de la relación	29
Figura 3.2. Comparación de las concentraciones de NO <sub>x</sub> y CO obtenidas analíticamente al evaluar las ecuaciones (3.9), (3.10), (3.11) y (3.12)	30
Figura 3.3. Cálculo de la temperatura de llama adiabática para Diesel y Biodiesel en función de AFR.	31
Figura 4.1 Esquema ilustrativo del montaje para las pruebas	33
Figura 4.2 Planta eléctrica(motor AGRALE M-80, Generador BRUSH DE 7.0 kWa)	33
Figura 4.3 Opacímetro SPX DIESELTUNE DX 230.	34
Figura 4.4 Multímetro digital con pinza amperítrica AWSPERRY DSA-600	36
Figura 4.5 Termocupla TIPO K	36
Figura 4.6 Indicador digital AUTOMICS T4WM	37

Figura 4.7 Tacómetro análogo TUROTEST	37
Figura 4.8 Medidor de consumo de combustible (método volumétrico)	38
Figura 4.9 Cronómetro digital CASIO HS-3	38
Figura 4.10 Comparación de curvas de potencia del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiesel puro (B100), diesel (ACPM) y mezclas (B20 y B50) como combustibles.	40
Figura 4.11 Curvas de eficiencia del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiesel puro (B100), diesel (ACPM) y mezclas (B20 y B50) como combustibles.	41
Figura 4.12 Consumo específico de combustible del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiesel puro (B100), diesel (ACPM) y mezclas (B20 y B50) como combustibles.	42
Figura 4.13 Porcentaje de opacidad producido por los diferentes tipos de mezcla.	45
Figura 4.14 Temperatura de los gases de escape y de aceite del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiesel puro (B100) y diesel (ACPM) como combustibles.	46
Figura 4.15 Valoración económica	47

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Relación de aire combustible relativa
$\eta$	Eficiencia del motor
$\eta_G$	Eficiencia del generador
$\eta_i$	Rendimiento térmico
$\eta_v$	Rendimiento volumétrico
$\$/kW-h$	Costo de kW-h
$AFR$	Relación aire combustible actual o real
$AFR_s$	Relación aire combustible estequiometrica
$cc$	Cilindrada del motor ( $cm^3$ )
$(\dot{C}\dot{V})_{COMB}$	Precio del combustible por flujo (o consumo) volumétrico estándar de combustible ( $\$/h$ )
$C_{COMB}$	Consumo de combustible
$I$	Corriente
$K_a$	Relación de calores específicos del aire
$K_f$	Relación de calores específicos del combustible
$K_m$	Relación de calores específicos de la mezcla
$LHV$	Poder calorífico inferior
$LHV_V$	Poder calorífico inferior volumétrico
$m_m$	Rata de masa de la mezcla que ingresa al motor
$N$	Revoluciones por minuto del motor (rpm)
$P$	Potencia
$p_i$	Presión a la que ingresa la mezcla al motor
$P_{MAX}$	Son los valores máximos de potencia entregados en cada caso por el motor de la planta eléctrica al trabajar con ACPM o Biodiesel
$p_o$	Presión ambiente
$Q$	Calor específico
$R_a$	Constante del aire
$r_c$	Relación de compresión
$R_f$	Constante del combustible
$R_m$	Constante de la mezcla
$T_i$	Temperatura a la que ingresa la mezcla al motor
$T_o$	Temperatura ambiente
$V$	Voltaje
$\alpha$	Factor de corte
B100	Biodiesel puro
B20	Mezcla de 20% Biodiesel y 80% ACPM
B50	Mezcla de 50% Biodiesel y 50% ACPM
B0	ACPM

## CAPITULO 1

### INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son alcoholes, éteres, ésteres y otros compuestos químicos, producidos a partir de biomasa, como las plantas herbáceas y leñosas, residuos de la agricultura y actividad forestal, y una gran cantidad de desechos industriales, como los desperdicios de la industria alimenticia.

El término biomasa hace referencia a toda materia que puede obtenerse a través de fotosíntesis. La mayoría de las especies vegetales utilizan la energía solar para crear azúcares, partiendo de sustancias simples como el agua y el dióxido de carbono, almacenando esta energía en forma de moléculas de glucosa, almidón, aceite, etc.

Entre los biocombustibles podemos incluir al biodiesel, bioetanol, biometanol, y muchos otros. Los dos productos más desarrollados y empleados de esta clase de combustibles son, el biodiesel y el bioetanol.

La idea de utilizar productos vegetales en el corazón mismo del motor no es ninguna novedad. Sólo con citar la experiencia del creador del motor de encendido por compresión, o motor diesel, el propio Rudolf Diesel, quien utilizó aceite de maní para impulsar una de sus creaciones en la exposición de París de 1900, nos indica, que las raíces de este asunto se remontan un centenar de años atrás.

Durante estos cien años, y fundamentalmente, en la segunda mitad del siglo veinte, se sucedieron un sin fin de investigaciones y experiencias, las que llevaron como estandarte la frase **“el aceite de cocina será el combustible del futuro”**, a la cual se le ha otorgado un significativo impulso en estos últimos años.[1]

La sustitución de los combustibles denominados fósiles o tradicionales, derivados del petróleo, por otros, de origen vegetal, cobra una gran importancia

en nuestros días por varias razones fundamentales, como el hecho de provenir de una fuente renovable, ser un instrumento de lucha contra el deterioro medioambiental, además de un factor de desarrollo de la agricultura e industrias derivadas, y otros beneficios que serán desarrollados con posterioridad.

El propósito del presente trabajo es analizar la factibilidad técnica, ambiental y económica del biodiesel, sintetizado a partir del cultivo de palma africana; y a la vez informar sobre el empleo de otras materias primas involucradas en este proceso. Concretamente, esta tesis busca alcanzar los siguientes objetivos.

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio del desempeño mecánico y ambiental de los motores diesel al utilizar biodiesel.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Realizar una exploración bibliográfica de las ventajas y desventajas de utilizar biodiesel como combustible.
- b. Realizar una exploración bibliográfica de la obtención del biodiesel.
- c. Explorar analíticamente el efecto en la potencia de un motor diesel al suministrarle biodiesel.
- d. Explorar analíticamente el efecto en los gases de escape de un motor diesel al suministrarle biodiesel.
- e. Validar experimentalmente los resultados obtenidos en c y d.

### **1.3 ALCANCE**

Con el objeto de comprobar la viabilidad en el uso del biodiesel como combustible alternativo en los motores de encendido por compresión. En el presente trabajo se comparó, siguiendo un mismo protocolo de experimentaciones el desempeño mecánico y las emisiones contaminantes

de una planta eléctrica al ser operada con ACPM, biodiesel y mezclas de estos dos combustibles en diferentes porcentajes.

Mediante este trabajo será posible determinar que tan benéfico resulta el uso o no del biodiesel como combustible alternativo.

#### **1.4 EL BIODIESEL (DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS)**

El Biodiesel es un combustible obtenido a partir de aceites vegetales que funciona en cualquier motor Diesel. La utilización de combustibles vegetales, en motores Diesel, es casi tan antigua como el mismo motor. El inventor del motor Diesel, Rudolf Diesel utilizó en el año 1900 aceite de maní como combustible, para una demostración de la adaptabilidad del motor. Se han hecho numerosos trabajos experimentales sobre la utilización de combustibles vegetales entre los años 1930 – 1940. La crisis del petróleo en los fines de la década del 70 y comienzos del 80, acompañados de la incertidumbre reinante sobre lo que podía acontecer con los recursos no renovables, especialmente sobre los derivados del petróleo, reflató la idea de los biocombustibles. Actualmente, existen cientos de artículos escritos de todas partes del mundo sobre la utilización de aceites vegetales (en especial Biodiesel) como combustibles. Estos combustibles han pasado de ser experimentales, y ya forman parte de la canasta de combustibles habituales.

Varios aceites han sido probados para Biodiesel. Generalmente, estos aceites, han sido aquellos que abundan en el país de la investigación. En Estados Unidos, el aceite de Soja es el que ocupa un primer lugar en su utilización, en Europa lo es el de colza, mientras que en países de clima tropical, se está investigando el aceite de coco, o el de palma. Se ha llegado a probar grasas animales y aceites de cocina usados, entre otros, pero no todos han tenido resultados satisfactorios, aparecieron problemas de incrustaciones y depósitos de sólidos en los conductos, problemas de temperatura, de combustión, etc.[2]

### **1.4.1 Definición de biodiesel**

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

Por ese motivo la ASTM (American Society for Testing and Materials) define al Biodiesel como “el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores Diesel”. [2]

### **1.4.2 Propiedades del Biodiesel**

Los motores diesel de hoy requieren un combustible que sea limpio al quemarlo, además de permanecer estable bajo las distintas condiciones en las que opera. El Biodiesel es el único combustible alternativo que puede usarse directamente en cualquier motor diesel, sin ser necesario ningún tipo de modificación. Como sus propiedades son similares al combustible diesel de petróleo, se pueden mezclar ambos en cualquier proporción, sin ningún tipo de problema. En Estados Unidos, existen ya numerosas flotas de transporte público que utilizan Biodiesel en sus distintas mezclas.

Las bajas emisiones del biodiesel hacen de él un combustible ideal para el uso en las áreas marinas, parques nacional y bosques y sobre todo en las grandes ciudades. Biodiesel tiene muchas ventajas como combustible. Por ejemplo, puede obtenerse a partir de cultivos abundantes en nuestro país, como la palma, u otros cultivos, generando un rédito para el sector agrícola y un aumento de la tasa de empleo. [3]

### 1.4.3 Principales ventajas del biodiesel

- Biodiesel es el único combustible alternativo en EE.UU. en cumplir con los requisitos de la EPA (Environmental Protection Agency), bajo la sección 211(b) del "Clean Air Act"
- Biodiesel es el único combustible alternativo que funciona en cualquier motor diesel convencional, sin ser necesaria ninguna modificación. Puede almacenarse en cualquier depósito donde el diesel de petróleo se guarda.
- Biodiesel puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el combustible diesel de petróleo. La mezcla más común es de 20% de biodiesel con 80% diesel de petróleo, denominado "B20."
- El ciclo biológico en la producción y el uso del Biodiesel reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico, y casi 100% las de dióxido de azufre. La combustión de Biodiesel disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemado, y entre 75-90% en los hidrocarburos aromáticos. Biodiesel , además proporciona significativas reducciones en la emanación de partículas y de monóxido de carbono, que el diesel de petróleo. Biodiesel proporciona un leve incremento o decremento en óxidos de nitrógeno dependiendo del tipo motor. Distintos estudios en EE.UU. , han demostrado que el biodiesel reduce en 90% los riesgos de contraer cáncer.
- Biodiesel contiene 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre. El uso de biodiesel puede extender la vida útil de motores porque posee mejores cualidades lubricantes que el combustible de diesel de petróleo, mientras el consumo, encendido, rendimiento, y torque del motor se mantienen prácticamente en sus valores normales.
- Biodiesel es seguro manejar y transportar porque es biodegradable como el azúcar, 10 veces menos tóxico que la sal de la mesa, y tiene un flash-point de aproximadamente 150° C comparado al diesel de petróleo cuyo flash-point es de 50° C.
- Biodiesel puede hacerse a partir, de cultivos que abundan en nuestro país, como por ejemplo la palma africana.

- Biodiesel es un combustible que ya ha sido probado satisfactoriamente en mas de 15 millones de Km. en EE.UU. y por más de 20 años en Europa.
- Los olores de la combustión en los motores diesel por parte del diesel de petróleo, son reemplazados por el aroma de las palomitas de maíz o papas fritas.
- La Oficina de Presupuesto Del Congreso, y el Departamento Americano de Agricultura, junto con otros organismos han determinado que el Biodiesel es la opción más económica de combustible alternativo que reúne todos los requisitos del Energy Policy Act.[4]

#### **1.4.4 Principales desventajas del biodiesel**

Los ésteres de aceites vegetales tienen viscosidades comparables y números de cetano similares o superiores a los del gasoil (tal como puede apreciarse en la Tabla 1.3), lo que permite, a pesar de su menor poder calorífico, su utilización en motores Diesel como sustitutos parcial o totalmente del gasoil. A continuación se detallan las principales diferencias de comportamiento con el gas-oil, desde el punto de vista del proceso de combustión:

- Una ligera pérdida de potencia, como consecuencia del poder calorífico ligeramente inferior. Este efecto, se ve parcialmente compensado por la mayor densidad de los ésteres, por lo que el incremento de consumo volumétrico es sólo ligeramente superior.
- Una cierta dilución del aceite de lubricación por mezcla con el éster vegetal, con la consiguiente pérdida de viscosidad, que puede llegar hasta el 5%.
- Una supuesta mayor tendencia a formación de compuestos pesados, debido a la presencia de algunos enlaces insaturados (cuantificados por medio del índice de Yodo), con la consiguiente formación de depósitos y obstrucciones. Algunas experiencias, sin embargo, cuestionan dicha tendencia y por el contrario demuestran cierta capacidad detergente.

- Una combustión algo más rápida, pues la presencia de oxígeno disminuye la proporción de aire estequiométrico necesario para la reacción, facilitando el proceso de mezcla.[4]

#### 1.4.5 Parámetros del Biodiesel

ASTM y DIN ha especificado distintas pruebas que se le deben hacer a los combustibles para asegurar su correcto funcionamiento. Estas se muestran en las tablas 1.1 y 1.2.

*Tabla 1.1 ASTM PS121 para Biodiesel puro (100%) [2]*

<b>PROPIEDAD</b>	<b>MÉTODO ASTM</b>	<b>LIMITES</b>	<b>UNIDADES</b>
Flash Point (Punto de Inflamación)	D93	100.0 min	° C
Agua y sedimentos	D2709	0.050 max	Vol %
Residuos de carbón, muestra 100%	D4530	0.050 max	Wt %
Cenizas sulfatadas	D874	0.020 máx.	Wt %
Viscosidad cinemática, 40 °C	D445	1.9 – 6.0	mm <sup>2</sup> /Seg.
Sulfuros	D2622	0.05 máx.	Wt %
Cetanos	D613	40 min	
Cloud Point (Punto de Frío)	D2500	opcional	°C
Corrosión al cobre	D130	No. 3b máx.	
Número ácido (Alcalinidad Total)	D664	0.80 max	Mg KOH/g
Glicerol libre	A	0.20 max	Wt%
Glicerol total	A	0.40 max	Wt%

Tabla 1.2. Normas Alemanas para Biodiesel (DIN V51606) [2]

PROPIEDAD	MÉTODO	LIMITES	UNIDADES
Densidad (15°C)	ISO 3675	0.875-0.900	G/ml
Viscosidad Cinemática (15°C)	ISO 3104	3.5-5.0	Mm <sup>2</sup> /s
Flash Point (Punto de Inflamación)	ISO 2719	100 mín.	°C
CFPP <sup>a</sup>	DIN EN 116		°C
Invierno		-20 máx.	
Verano		-10 máx.	
Sulfuros	ISO 4260	0.01 máx.	% peso
Residuos carbónicos	ISO 10370	0.30 máx.	% peso
Cetanos (CN)	ISO 5165	49 mín.	
Cenizas	ISO 6245	0.01 máx.	% peso
Agua	ASTM D1744	300 máx.	mg/kg
Impurezas	DIN 51419	20 máx.	mg/kg
Corrosión al cobre	ISO 2160	1 máx.	
Número ácido (Alcalinidad Total)	DIN 51558	0.5 máx.	mg KOH/g
Metanol	A	0.3 máx.	% peso
Monoglicéridos	A	0.8 máx.	% peso
Diglicéridos	A	0.1 máx.	% peso
Triglicéridos	A	0.1 máx.	% peso
Glicerina libre	A	0.02 máx.	% peso
Glicerina total	A	0.23 máx.	% peso
Índice de yodo	DIN 53241	115 máx.	G Iodo/100 g
Fósforo	A	10 máx.	mg/kg

A. El método utilizado, aún no se encuentra estandarizado.

Tabla 1.3. Principales propiedades de los aceites vegetales y ésteres de Girasol, de Colza y de Soja. Comparación con Gas-oil [5]

	Gas-oil	Aceites			Esteres		
		Girasol	Colza	Soja	Girasol	Colza	Soja
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	830	924	916	924	890	880	885
Poder Calorífico inf. (MJ/kg)	43	36.9	37.4	37.0	37.1	37.6	37.2
Poder Calorífico inf. (MJ/l)	35.7	34.1	34.3	34.2	33.0	33.1	32.9
Número de Cetano	48/51	33	44/51	34.8	45/46	52/56	50.7
Viscosidad (cSt)	3/5	65.8	77.8	31.3	6.4	7.5	4.0
POFF (°C)	-20/-10	10/20	10/20	10/20	-1/-3	-12/-15	-
Contenido másico de azufre (ppm)	350*	0	0	0	0	0	30

\*Según se exige en la normativa europea para gas-oil de automoción (EN-590)

Tabla 1.4. Fórmula de sustitución de ésteres metílicos vegetales y propiedades químicas [5]

<b>Ester Metílico</b>	<b>Fórmula resumida del hidrocarburo de sustitución</b>	<b>Peso molecular (gr/mol)</b>	<b>Contenido másico en Oxígeno (%)</b>	<b>Relación H/C</b>	<b>N° medio enlaces dobles</b>	<b>Relación másica estequiométrica aire/éster</b>
Girasol	$C_{18.94}H_{34.82}O_2$	294.58	10.86	1.838	1.53	12.51
Colza	$C_{18.96}H_{35.23}O_2$	295.23	10.84	1.858	1.35	12.54
Soja	$C_{18.83}H_{34.59}O_2$	293.02	10.92	1.837	1.57	12.50
Palma	$C_{18.07}H_{34.93}O_2$	284.24	11.26	1.933	0.60	12.55
Cardo	$C_{18.79}H_{34.68}O_2$	292.64	10.93	1.846	1.45	12.50

Tabla 1.5. Fórmula de sustitución de ésteres etílicos vegetales y propiedades químicas [5]

<b>Ester Etílico</b>	<b>Fórmula resumida del hidrocarburo de sustitución</b>	<b>Peso molecular (gr/mol)</b>	<b>Contenido másico en Oxígeno (%)</b>	<b>Relación H/C</b>	<b>N° medio enlaces dobles</b>	<b>Relación másica estequiométrica aire/éster</b>
Girasol	$C_{19.94}H_{36.82}O_2$	308.61	10.37	1.847	1.53	12.61
Colza	$C_{19.96}H_{37.23}O_2$	309.26	10.35	1.865	1.35	12.64
Soja	$C_{19.83}H_{36.59}O_2$	307.05	10.42	1.845	1.57	12.60
Palma	$C_{19.07}H_{36.93}O_2$	298.27	10.73	1.937	0.60	12.66
Cardo	$C_{19.79}H_{36.68}O_2$	306.67	10.43	1.853	1.45	12.61

#### 1.4.6 Contaminación Ambiental

El calentamiento de la atmósfera es el principal desafío medioambiental que hoy afronta la humanidad a nivel mundial. Importa a todos; ninguna población es ajena al problema y a sus consecuencias. Se expresa de varias formas:

- Aumento de la frecuencia de catástrofes climáticas con graves daños a las personas y los bienes materiales
- Derretimiento de los polos, afectando especialmente a poblaciones costeras y países insulares
- Aparición de nuevas enfermedades
- Erosión de tierras cultivables

El calentamiento global es consecuencia del aumento del contenido de ciertos gases en la atmósfera. Esos gases, denominados de "efecto invernadero", impiden la disipación de la energía radiante que recibe la

Tierra. Cuando el contenido era bajo, la radiación de onda corta penetraba normalmente la atmósfera, y daba lugar a los procesos normales de fotosíntesis que constituyen la fuente de la cadena alimentaria. Los excedentes de energía volvían al espacio exterior bajo la forma de radiaciones de onda larga (térmica o infrarrojas).

Cuando la atmósfera fue recibiendo crecientes cantidades de gases de efecto invernadero, la radiación de onda corta no sufrió inconvenientes para seguir atravesando la atmósfera. Pero la de onda larga, al volver, rebota en las moléculas de estos gases, provocando el calentamiento global y continuo del medio ambiente.[4]

Los dos gases responsables del fenómeno son el anhídrido carbónico: CO<sub>2</sub> y el metano. Importa en consecuencia reducir la concentración de estos gases en la atmósfera. En el caso del dióxido de carbono, ello ocurre debido mayormente al uso de combustibles fósiles (petróleo y carbón) como fuente de energía. Se tiene por objeto buscar la posibilidad de usar combustibles alternativos que sean capaces de reducir la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

Existen muchas alternativas para avanzar en la solución de este problema. En la reciente Conferencia de las Partes de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente ("COP 4"), realizada en Buenos Aires, se pasó revista a todos los avances que se han producido a nivel mundial para atender a este desafío. Allí surgió con fuerza el potencial de los biocombustibles, que se obtienen a partir de materias primas de origen agrícola, y por lo tanto renovables. El principio de la fotosíntesis, como mecanismo de captación de dióxido de carbono, establece el punto de partida del reciclado de este gas. Al sustituirse (en forma parcial o total) los combustibles actuales (naftas, gasoil, fuel oil), sin necesidad de modificar los motores o el diseño de los vehículos, puede lograrse un balance de emisiones mucho más favorable.

Las propuestas que se presentaron sobre este punto en esa Conferencia, basadas en experiencias, desarrollos y aplicaciones concretas en muchos

países, dan pautas concretas sobre la viabilidad de los biocombustibles. El balance energético, con las nuevas tecnologías, es positivo. También lo es el balance ambiental. En el plano económico, todavía no compiten con los derivados del petróleo, pero muchos países están implementando políticas ambientales que permiten compensar estas diferencias de costos. Uno de los aspectos que precisamente quedó como conclusión en la Conferencia, es el establecimiento de mecanismos de mercado para el comercio de emisiones, donde los biocombustibles serían elegibles. El mecanismo funciona ya en la industria de generación eléctrica de EE.UU. para gases responsables de lluvia ácida: los emisores deben comprar cuotas de emisión a los que cuentan con excedentes sobre las pautas de reducción establecidas por el Gobierno.[4]

## **1.5 ORGANIZACIÓN**

En el capítulo 2 se describe el proceso de obtención del biodiesel tanto de aceite nuevo como de aceite usado así como el proyecto de producción de biodiesel a partir de palma africana en Colombia.

En el capítulo 3 se explora analíticamente los efectos en los productos de la combustión y la potencia de los motores de encendido por compresión al utilizar biodiesel puro (B100) y diferentes mezclas (B50 y B20).

En el capítulo 4 se valida experimentalmente los efectos en los productos de la combustión y potencia de un motor al suministrarle biodiesel puro (B100) y diferentes mezclas (B50 y B20).

Se describe la instrumentación utilizada para el desarrollo de las experimentaciones.

Se presentan los resultados experimentales del desempeño mecánico y opacidad de humos del motor de la planta eléctrica al utilizar ACPM, B100, B50 o B20 como combustible.

Se presenta una valoración económica de utilización de Biodiesel y sus mezclas con diesel a diferentes porcentajes.

Finalmente, El capítulo 5 presenta las conclusiones y recomendaciones producto de este trabajo.

## **CAPITULO 2**

### **OBTENCIÓN DEL BIODIESEL**

Los aceites vegetales pueden obtenerse por procedimientos convencionales a partir de plantas oleaginosas como el girasol, la soja, la palma africana y la colza. Aunque los aceites vegetales se han utilizado en el pasado como combustibles, para su utilización en motores precisan, no obstante, de una preparación consistente en un desengomado y filtración previos. Las semillas son prensadas mecánicamente separándose el aceite y la torta. Normalmente, se somete a las semillas a un calentamiento previo y a la acción de un solvente, con lo que se logran rendimientos de extracción de aceites cercanos al 100%. La torta, que se obtiene como residuo del prensado, tiene un alto contenido en proteína y se comercializa para alimentación animal ayudando a disminuir los costos del proceso de extracción.[4]

Los aceites vegetales sin modificar causan diversos problemas que obligan a la modificación de los motores. Para evitarlos se recurre a transformarlos químicamente mediante un proceso de transesterificación capaz de mejorar sustancialmente las características como carburante de los aceites vegetales.

#### **2.1 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES VEGETALES CRUDOS**

La obtención de biodiesel se basa en la reacción con metanol o etanol (transesterificación) de las moléculas de triglicéridos para producir ésteres. De esta manera se consigue que las moléculas grandes y ramificadas iniciales, de elevada viscosidad y alta proporción de carbono, se transformen en otras de cadena lineal, pequeñas, con menor viscosidad y porcentaje de carbono, de características físico-químicas y energéticas más similares al petrodiesel (ACPM).

Básicamente el proceso se inicia con la refinación del aceite vegetal, ya que normalmente es necesario reducir los contenidos de agua y ácidos grasos, a

posteriori este aceite debe ser esterificado mediante su reacción con alcohol metílico o etílico (metanol o etanol) en presencia de un catalizador (hidróxido de sodio o de potasio) obteniéndose el éster correspondiente y dos coproducto, la glicerina y fertilizante de potasio. La glicerina obtenida normalmente es de uso general, pero si se desea desarrollar glicerina apta para cosmetología o farmacología debe reprocesársela hasta una pureza del 99,5%. [1]

Otros procesos integrales (Tal como los desarrollados por West Central Soy, la división de manufacturas de West Central Cooperative de Ralston Iowa EEUU), además de lograr los productos básicos señalados precedentemente desarrollan aditivos, lubricantes solventes y limpiadores.

Independientemente de lo expresado precedentemente, cabe señalar que la obtención "casera" de biodiesel es relativamente sencilla, ya que como bien lo expresa Korus et al [1](2000), el agregado de 28,8% en peso de etanol al aceite de colza, en presencia de un 1% en peso de hidróxido de potasio permiten obtener el combustible, para ello solo es necesario disolver el catalizador en el alcohol, agregar la mezcla al aceite y agitar vigorosamente. Al cabo de 120 minutos y a temperatura ambiente, se ha producido el biocombustible que se separa por decantación ya que se ubica en primer lugar en el contenedor donde se lo mezcló.

Peterson (1994) [1] señala que la obtención de metil ésteres requiere un 22,5% de metanol en volumen y un 1% de catalizador también en volumen, mientras que para la obtención de etil ésteres estos porcentajes varían al 27,38% y al 1,18% respectivamente. Se los mezcla como en el caso anterior y se agitan vigorosamente por dos horas, luego de reposar 10 minutos comienza la separación de la emulsión lograda la cual se completa en unas dos horas, aunque una perfecta separación de la casi totalidad de los productos finales requiere mas de 20 horas, finalmente se lo lava y clarifica con ácido tánico (1 gr de ácido por litro de agua).

El proceso químico es relativamente sencillo. Sin embargo para producir un biodiesel de calidad deben optimizarse las variables de proceso, tales como el

exceso de metanol, la catálisis del mismo, desactivación del catalizador, agitación, temperatura y en general todas las variables del proceso. La viscosidad del éster es almo menos de dos veces superior a la del ACPM, frente a las 10-20 veces las del aceite vegetal crudo.

En resumen el proceso de obtención del biocombustible puede esquematizarse de la siguiente manera:

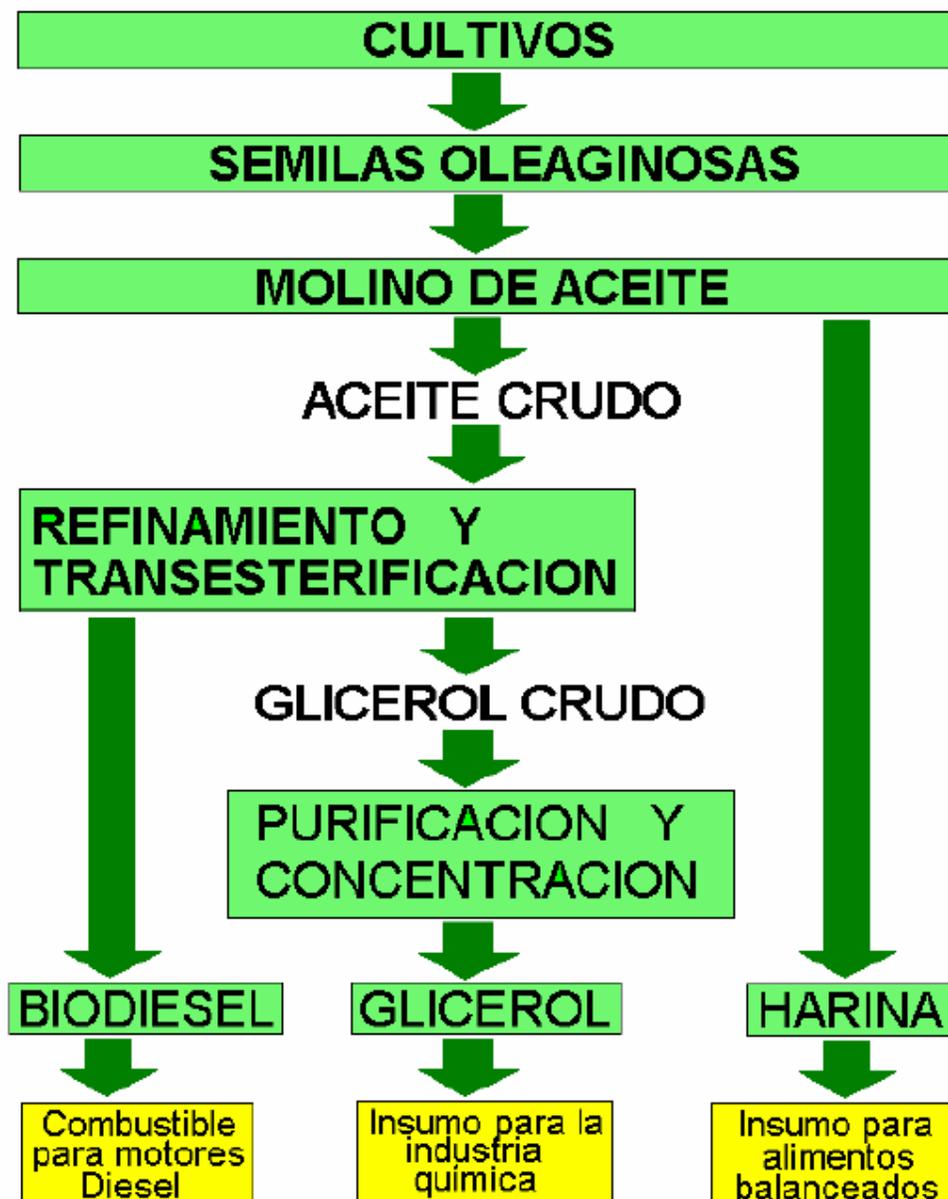


Figura 2.1. Esquema del proceso de obtención del biodiesel [6]

## 2.2 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE VEGETAL USADO (AVU)

Los Aceites Vegetales Usados AVU de cocina son una fuente atractiva para producir Biodiesel, pero son más difíciles de convertir porque contienen un 2-10% de ácidos grasos libres (la causa del sabor rancio) y pueden provocar grandes problemas. Primero de todo, es necesario retirar toda Agua presente en el Aceite Usado. Calientelo a 104°C durante una hora ó hasta que no se puedan ver burbujas. Es necesario valorar el aceite para determinar qué cantidad de ácidos grasos libres contiene.

La cantidad de metanol necesaria para la reacción es de un 15-20% de la masa del AVU. Diferentes AVUs pueden tener distintas densidades, dependiendo del tipo de aceite del que deriven originalmente y de cuanto tiempo han sido usados en el fondo de la freidora. Si no se está seguro de la densidad, lo mejor es ser generoso con el metanol, como puede ser un 20%.

El metanol se mezcla en solución con hidróxido sódico, para así crear metóxido sódico en una reacción exotérmica ( es decir, desprende calor cuando se forman los enlaces). **¡Este metóxido sódico debe ser tratado con extrema precaución! ¡No inhale ningún vapor!**. Si se produjeran salpicaduras en la piel, la misma ardería sin que se notara (mataría los nervios), por lo que se ha de lavar inmediatamente.[6]

El metóxido sódico es también muy corrosivo para las pinturas. Los mejores tipos de envases para manejarlo son los de acero inoxidable. Los almacenes de equipamiento usado para restaurantes, son un buen lugar para buscarlos. Suelde los accesorios de fontanería cuando resultare necesario.

### 2.2.1 Mezclado

Cualquier hélice o agitador acoplado a un taladro de 5 cm. posicionado con seguridad en una guía funciona bastante bien como mezclador. Se añade metóxido sódico y se bate con el AVU desde 50 minutos a una hora.

Durante el curso de esta hora, el proceso de transesterificación separa el metil-éster del glicerol. El  $\text{CH}_3\text{O}$  del metanol desune las cadenas de éster y  $\text{OH}$  de  $\text{NaOH}$  y estabiliza el glicerol.

Tras agitar los reactivos a 48-55 °C durante una hora, deje que la solución se asiente y caliéntela durante ocho o más horas. Los metil-esteres menos densos flotan en la parte superior y la glicerina, más densa, se congela en el fondo del contenedor en una fuerte masa gelatinosa.[6]

### **2.2.2 Separación**

Una forma alternativa de hacer esto es permitir que los reactivos se asienten durante una hora tras el mezclado, manteniéndolo por lo menos a 37 °C; separe cuidadosamente los esterres mientras el glicerol se mantenga aun semi-liquido.

Esto se puede hacer sacando los reactivos del fondo de contenedor mediante drenaje utilizando un manguito transparente. Tan pronto como aparezca menos denso y oscuro los esterres en el manguito, desvíe los contenidos a un contenedor separado.

La glicerina (aunque no está aun solidificada) tendrá un color marrón oscuro y los esterres un color a miel. Inspeccione lo que fluye a través del tubo visible: cuando los esterres más ligeramente coloreados aparezcan desvíe este fluido a un contenedor separado. Si se perdiera alguno, es sencillo recuperarlo posteriormente del contenedor de glicerina solidificada. Esta glicerina se forma a unos 37 °C.[6]

La figura 2.2 muestra un ejemplo de un sistema para separar dos líquidos de diferentes densidades. Este puede servir como un buen pre-filtro o ser usado para separar aceites, jabón y glicerina / esterres. Los sistemas de limpieza de

combustible de los barcos de la Marina cumplen bien su función cubriendo las necesidades de filtros.[6]

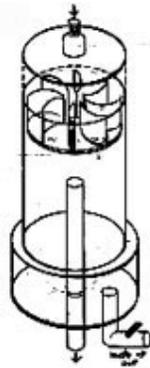


Figura 2.2

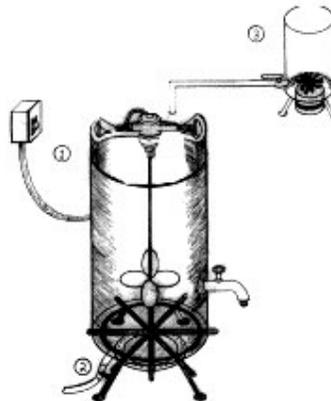


Figura 2.3

La figura 2.3 muestra la vasija de reacción (#1) donde el AVU se mezcla y calienta. El calentamiento se lleva a cabo por el (#2) un hornillo, un quemador de propano, aunque un fogón de diesel podría funcionar bien. La figura 2.3 también muestra una batidora (#3) usado para mezclar el metóxido sódico.

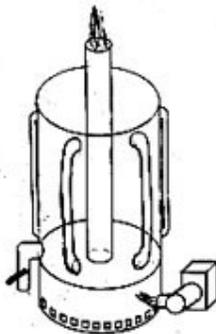


Figura 2.4

Se ilustra en la figura 2.4 una alternativa propuesta para usar una muy pequeña cantidad de electricidad. Este sistema usaría un quemador tipo horno, funciona con los esteres recogidos para calentar su vasija de reacción. La acción de agitación de la vasija se crea por corrientes de inversión térmica generadas por tubos de enfriamiento externo de la vasija y un respiradero de extracción amortiguado que sube por su centro.

### 2.2.3 Glicerina

La glicerina recogida puede ser compostada tras haber sido ventilada durante tres semanas para permitir que se evapore el metanol residual. Otra forma de eliminación, aunque un poco más complicada, podría ser separar sus componentes. La mayoría de sus componentes son metanol, glicerina pura (un producto valioso para medicinas, tinturas, lociones capilares o de manos, arreglos secos de planta, junto con otros usos) y cera. La destilación es unidireccional, esto es, es frecuente que culmine, pero la glicerina tiene un alto punto de ebullición, mientras que bajo una presión de vacío este método es difícil.

Esta glicerina también produce un excelente desengrasador / jabón industrial. Una buena forma de purificarlo consiste en derretirlo de nuevo mediante calor en una doble caldera. Una vez que ha vuelto a ser líquido, las impurezas (trozos de freidurías) se hundirán al fondo y su color se volverá más uniforme.[6]

### 2.2.4 Jabón

Suspendido en el metil éster recogido habrá también algunos residuos jabonosos. Son el efecto de los iones  $\text{Na}^+$  del hidróxido sódico ( $\text{NaOH}$ ) en reacción con algún agua que se ha creado de la unión del metanol con las cadenas de esteres. Si la reacción tiene más cantidad de jabón de la que es habitual, se debe a que cierta cantidad de sosa ha entrado en contacto con el agua, antes de que tuviera ninguna posibilidad de reaccionar con el metanol.

Es importante guardar la batidora y todos los utensilios con los que entra en contacto la sosa lo más secos posible. La posibilidad de tener una buena y limpia separación de esteres respecto a la glicerina con un poco de subproducto jabonoso, es mucho mejor en un día de verano seco y cálido que en un día húmedo de invierno.

Existe más de una escuela de pensamiento sobre como llevar los esteres desde esta etapa al tanque de combustible. Una de ellas consiste en dejar

reposar durante un tiempo (una semana) para posibilitar que a la mayoría de los residuos jabón se sedimenten antes de hacer correr los esteres a través de un sistema de filtrado para llevarlos a los depósitos de combustible de casa / vehículo.[6]

### 2.2.5 Lavado

Otro sistema consiste en lavar con agua los jabones del combustible. Cuando se limpian los esteres por primera vez, es mejor añadir al agua una pequeña cantidad de ácido acético ( vinagre). El ácido acético baja el pH de la solución a unos valores más cercanos al neutro.

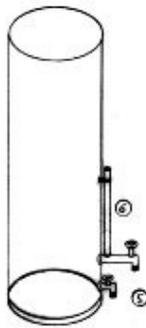


Figura 2.5

La figura 2.5 muestra un sistema sencillo de lavado usando un contenedor de PVC translúcido con una válvula a 7-10 cm del fondo. Para procesos de 18,9 litros utilice de los cubos de 18,9 a 26,4 litros que se pueden encontrar en cualquier lugar hoy en día . Si no puede encontrar un contenedor translúcido, uno fabricado con un tubo de visión (#6) debe funcionar.

Llénelo con agua hasta que esté a mitad de camino entre el fondo del contenedor y la válvula; entonces, llénelo con los esteres a lavar. Tras una suave agitación (Ud. no quiere levantar los jabones) seguidos de 12 a 24 horas de sedimentación, el aceite y el agua se separarán, el aceite limpio puede ser decantado fuera de la válvula, saliendo el agua jabonosa más para ser drenada fuera del fondo(#5).

Este proceso se debe repetir 2 - 3 veces para remover una cantidad cercana al 100 % de los jabones. Los segundos y terceros lavados pueden hacerse con

agua sola. Tras el tercer lavado, cualquier agua restante se remueve recalentando el aceite lentamente.[6]

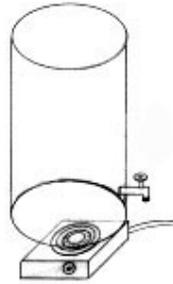


Figura 2.6

(Figura 2.6), el agua y otras impurezas se hunden al fondo. El producto final debe tener un pH 7.

Las impurezas se pueden dejar en el recalentador para el próximo proceso por lotes o bien ser removida si hay grandes acumulaciones. Los jabones puede ser concentrados, los esteres de sobra puede ser decantados hacia afuera y lo que queda es un jabón biodegradable bueno para usos de tipo industrial (desengrasadores, etc...). Los esteres transesterificados y limpiados pueden volverse más claros con el paso del tiempo conforme cualquier resto de jabón se desprenda de la solución.

### 2.2.6 Valoración

Para determinar la cantidad adecuada de NaOH se debe realizar una valoración de la grasa que ha de ser transesterificada. Para hacer esta valoración se debe hacer una solución de un gramo de NaOH en un litro de agua destilada. Ponga la solución en un agitador para asegurarse de que se disuelve completamente. Esta muestra se utiliza entonces como probador de referencia para el proceso de valoración. Es importante no dejar que la muestra se contamine, ya que puede ser usada para varias valoraciones.

Para preparar la valoración, mezcle 10 mililitros de alcohol de isopropilo puro (99%) (alcohol de frotado) en un pequeño contenedor con 1 mililitro de muestra

de AVU. Tome la muestra de valoración del AVU de la vasija de reacción (Figura 2.5 #1) tras haber sido calentado y batido.[6]

Añada a esta solución 10 gotas de fenolftaleína, un indicador ácido-base que se queda descolorido en ácido y rojo en base. Se puede comprar fenolftaleína para piscinas o en almacenes proveedores de tubos calientes. Es importante anotar que tiene una vida propia de alrededor de un año y que es muy sensible a la degradación por la luz, por lo que tras un cierto tiempo comenzará a dar lecturas erróneas.

Utilizando un cuentagotas oftálmico graduado (con incrementos marcados en décimas de mililitros) o algunos otros instrumentos calibrados (de tiendas de material sanitario) y mientras está al tanto de las cantidades, deje gotear cantidades medidas de solución NaOH / agua (un par de décimas de mililitros cada vez), en la solución de AVU / isopropil / fenolftaleína.

Haga seguir a cada gota la agitación vigorosa de la solución. En tiempo frío el AVU se puede congelar y no funcionar, por lo que la valoración necesita ser llevada a cabo en un espacio caldeado. Si las condiciones son las correctas, eventualmente la solución se tornará de púrpura brillante. Este es el indicador de color para un rango de pH de 8-9. ¡Es importante encontrar la cantidad adecuada, para alcanzar precisamente este pH sin dejar caer demasiadas gotas!

Es buena idea hacer este proceso entero un par de veces más, como una manera de asegurar que su número es el correcto. Se advierte que dependiendo del tipo de grasa, de a qué temperatura se ha calentado en la freidora, de lo que se cocinó en él y durante cuanto tiempo fue usada, la cantidad de solución NaOH / agua necesaria para la valoración estaba habitualmente entre 1.5 a 3 mililitros. La fenolftaleína se puede sustituir también por papel tornasol.

### 2.2.7 El cálculo

El siguiente paso es determinar la cantidad de NaOH necesaria para catalizar la reacción que va a tener lugar. Tome el número de mililitros derivados de la valoración, multiplíquelos por el número de litros de grasa a ser transesterificada y (lo que he encontrado que funciona mejor), multiplique este número de nuevo por 1,15. Este truco fue observado después de hacer multitud de procesos por lotes y encontrar que una pequeña cantidad extra de NaOH daba lugar a una más completa separación de esteres respecto del glicerol. Se recomienda tanto esta forma como el no añadir el 15% de NaOH extra, para ver cual trabaja mejor.[6]

Hay una cosa más que calcular. Cada litro de aceite vegetal limpio (fresco -- que nunca haya sido cocinado) necesita habitualmente 3,5 gramos de NaOH para catalizar la reacción que va a tener lugar. Así, de nuevo, por cada litro de AVU que vaya a ser transesterificado añada 3,5 gramos adicionales de NaOH.

### 2.2.8 Calidad

La calidad de este combustible puede ser comprobada examinándolo visualmente y controlando su pH. El pH del producto final puede ser controlado con un papel de pH: necesita ser neutral (pH 7). Cuando se examine visualmente, debe tener aspecto de aceite vegetal limpio con un tinte ligeramente marrón, similar al zumo de manzana filtrado.

Se supone que no ha de haber ninguna capa, partícula o enturbamiento en él. Las capas pueden ser residuos jabonosos sobrantes, re-limpíelo. Los enturbamientos pueden ser agua que todavía permanece, re-calientelo. Las partículas pueden ser cualquier cosa e indicar que el filtro ha fallado.

Todos los aceites se limpian considerablemente cuando se calienta pero la prueba es, cuando se enfría de nuevo permanece todavía claro? Si no está todavía claro, debe dejarlo sedimentar durante una semana o dos adicionales, debe ser suficiente para aclararlo.[6]

### 2.3 PROYECTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE PALMA AFRICANA EN COLOMBIA

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%) figura 2.2. El cultivo de palma de aceite en el país ha tenido un importante desarrollo. Actualmente se cuenta con unas 170.000 has cultivadas y la producción de aceite de palma crudo asciende a 547.000 ton/año (figura 2.3).[7]

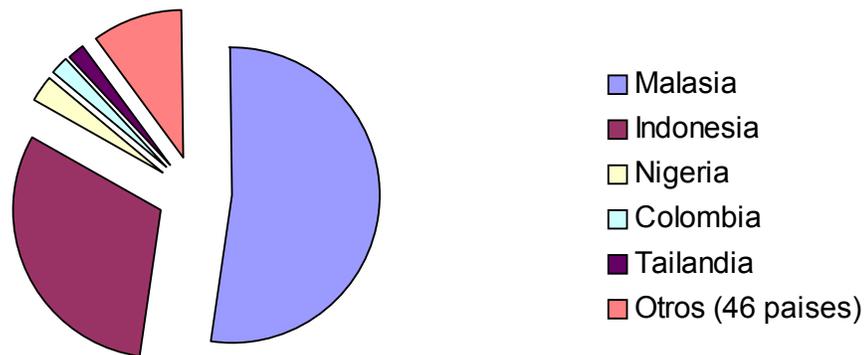


Figura 2.7 Producción mundial de aceite de palma, 2001 [7]

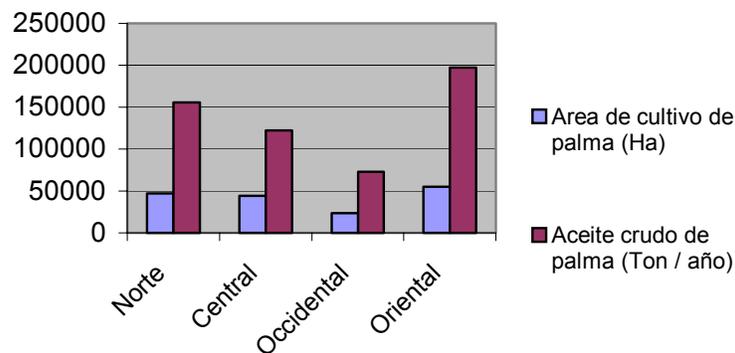
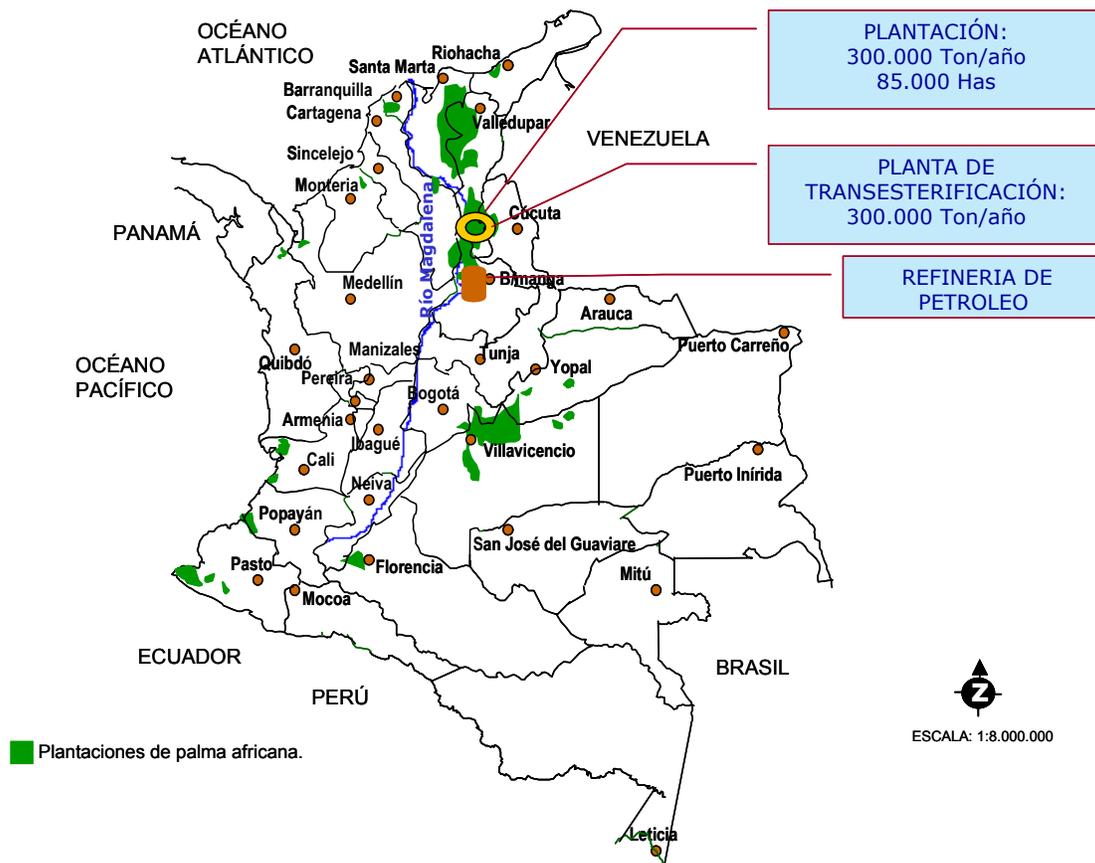


Figura 2.8 Distribución de área cultivada y producción de aceite de palma en Colombia, 2001[7]

Colombia produce cerca de 60.000 barriles/día de ACPM para vehículos. Al utilizar un 10% de aceite vegetal esterificado equivaldría a 6.000 barriles/día, aproximadamente 300.000 tm/año de aceite de palma, cifra cercana al 50% de la producción nacional anual generando 100.000 Ha cultivadas en palma africana y más de 100.000 empleos entre directos e indirectos.

Debido a que en los años anteriores el precio del ACPM ha sido inferior a los de la gasolina, el país se ha venido dieselizando, por lo que la máxima producción posible de ACPM de Ecopetrol se está acercando a la demanda, lo que significa que en ausencia de nuevas refinerías de petróleo, el país se vería abocado a importar ACPM en los próximos años. El biodiesel evitaría dicha importación con un ahorro significativo de divisas.

Figura 2.9 Cultivos de palma de aceite complejos agroindustriales producción de biodiesel [7]



*Tabla 2.1 Proyecto de biodiesel en Colombia [7]*

Capacidad de la planta	150.000 Ton / año de biodiesel
Inversión	U\$ 16'000.000
Localización	Barrancabermeja
Inicio de operaciones	2007
Precio de materia prima	U\$ 320 / Ton aceite de palma
TIR	> 20%
Precio de biodiesel	U\$ 1.25 / galón
Se requiere un aumento del 4% en los precios del diesel (2002)	

## CAPITULO 3

### EXPLORACIÓN ANALÍTICA DE LOS EFECTOS EN LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN Y POTENCIA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL SUMINISTRARLE BIODIESEL COMO COMBUSTIBLE

Mediante la exploración analítica de los efectos en los productos de la combustión y la potencia de los motores de encendido por compresión al trabajar con Diesel (ACPM) y Biodiesel puro (B100), se determinará si las emisiones contaminantes, así como la potencia aumentan o disminuyen al utilizar este combustible alternativo.

#### 3.1 Exploración en la potencia del motor

La exploración en los efectos de la potencia del motor se realizó utilizando combustible diesel (ACPM) y biodiesel puro (B100), a diferentes relaciones de aire combustible relativas ( $\lambda$ ), en el rango de 0.8 a 1.4.  $\lambda$  se define como:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_s} \quad (3.1)$$

donde

AFR            relación aire combustible actual o real

AFR<sub>s</sub>        relación de aire combustible estequiométrica

La potencia de un motor de combustión interna depende directamente del flujo de masa de la mezcla que ingresa al motor (Ec. 3.3), del calor suministrado por el combustible (calor específico, Ec.3.5) y del rendimiento térmico del motor (Ec.3.6) y se define en la ecuación 3.2 [8].

$$P = m_m q \eta_t \eta_v \quad (3.2)$$

donde:

$P$         potencia

$q$         calor específico

$\eta_t$       rendimiento térmico

$\eta_v$       rendimiento volumétrico

$$m_m = \frac{1}{2} \frac{cc}{100^3} \frac{N}{60} \frac{p_i}{R_m T_i} \quad (3.3)$$

donde:

$m_m$  rata de masa de la mezcla que ingresa al motor

$cc$  cilindrada del motor ( $\text{cm}^3$ )

$N$  revoluciones por minuto del motor (rpm)

$p_i$  presión a la que ingresa la mezcla al motor

$T_i$  temperatura a la que ingresa la mezcla al motor

$R_m$  constante de la mezcla

$$R_m = \frac{R_f + R_a AFR}{1 + AFR} \quad (3.4)$$

donde

$R_f$  constante del combustible

$R_a$  constante del aire

$AFR$  relación aire combustible

$$q = \frac{LHV}{1 + AFR} \quad (3.5)$$

donde:

$LHV$  poder calorífico inferior

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_c^{K_m - 1}} \left[ \frac{\alpha^{K_m} - 1}{K_m (\alpha - 1)} \right] \quad (3.6)$$

donde :

$r_c$  relación de compresión

$K_m$  relación de calores específicos de la mezcla =  $C_p/C_v$

$\alpha$  factor de corte. En la práctica ( $\alpha$ ) no es mayor al 10% de la carrera.

Asumimos un 8% de L

$$\alpha = 0.08(r_c - 1) + 1 \quad (3.7)$$

$$K_m = \frac{K_f + K_a AFR}{1 + AFR} \quad (3.8)$$

donde:

$K_f$  relación de calores específicos del combustible

$K_a$  relación de calores específicos del aire

Al calcular la potencia de un motor de 4 tiempos y encendido por compresión a partir de la ecuación 3.2, se obtienen los resultados mostrados en la figura 3.1, dichos resultados indican que la potencia de un motor disminuye al suministrarle biodiesel puro (B100) como combustible, debido al menor poder calorífico del B100 con respecto al ACPM.

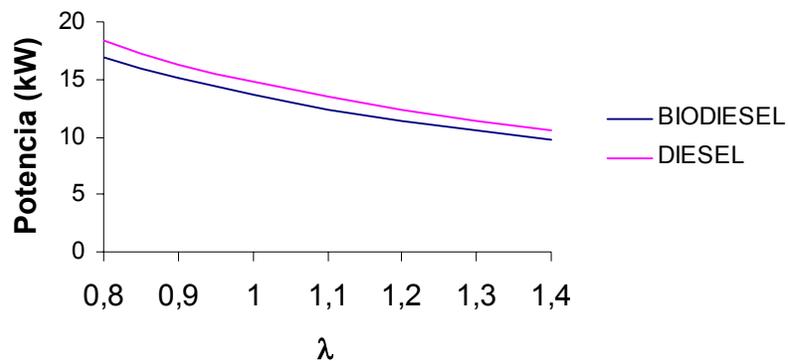


Figura 3.1. Cálculo de la Potencia de un motor de cuatro tiempos y encendido por compresión, al suministrarle Diesel y Biodiesel como combustible, en función de la relación aire combustible.

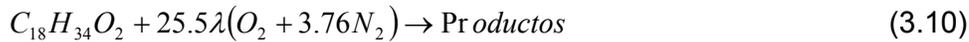
### 3.2 Exploración de los efectos en los productos de la combustión

Los efectos en los productos de la combustión se analizaron empleando las ecuaciones [9] (3.9), (3.10), (3.11) y (3.12) [11], para combustible diesel (ACPM), biodiesel puro (B100) y mezclas B20 y B50 respectivamente, (con la ayuda de softwares especializados como Stanjan y CpropepShell), la cual permite determinar la concentración de equilibrio de los productos de la combustión.

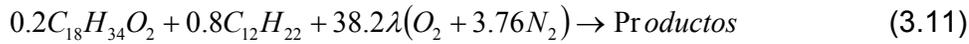
Para Diesel (ACPM):



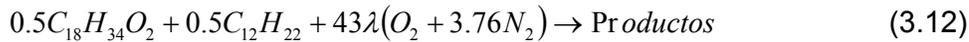
Para Biodiesel puro (B100):



Para B20:



Para B50:



La figura 3.2 son las comparaciones de CO y NOx obtenidas analíticamente al evaluar las ecuaciones (3.9), (3.10), (3.11) y (3.12), respectivamente.

La figura 3.2 de igual modo nos muestra que las diferencias entre las emisiones de NOx y CO relacionadas con biodiesel no son muy significativas por tal motivo en la parte experimental se midió opacidad.

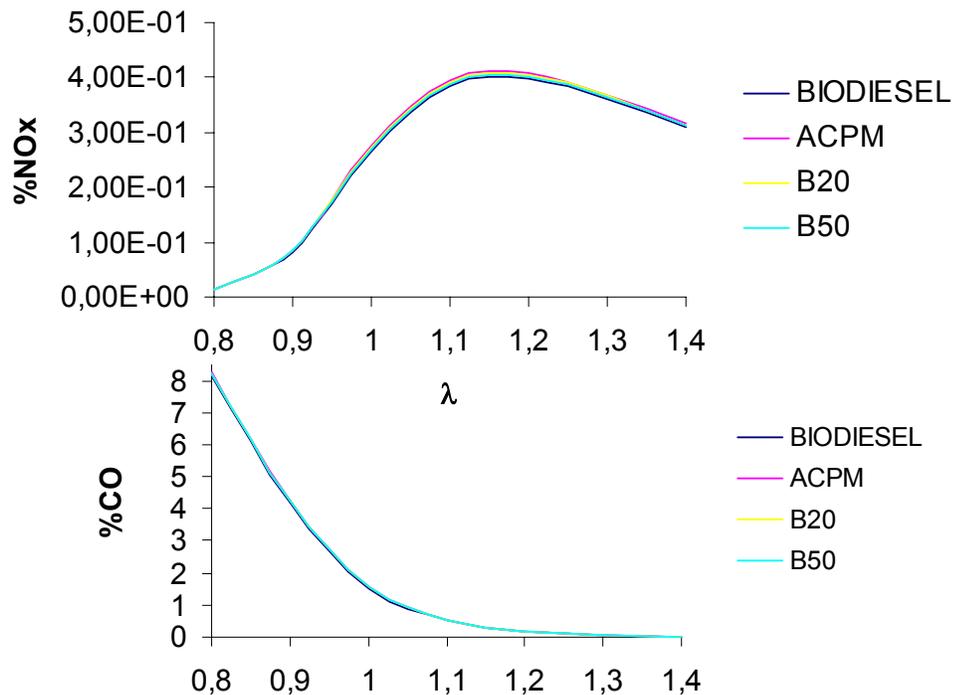


Figura 3.2. Comparación de las concentraciones de NOx y CO obtenidas analíticamente al evaluar las ecuaciones (3.9), (3.10), (3.11) y (3.12)

La tabla 3.1 muestra los límites de emisiones de vehículos de motores diesel bajo las normas EURO.

Tabla 3.1 Límites de emisiones de vehículos pesados. Motores diesel, gnc y glp ( en gr/kWh) [10]

Modalidades de vehículos y tipos de pruebas	CO	HC	CH <sub>4</sub>	NOx	Masa de partículas	Humos (min <sup>-1</sup> )	
EURO I (1.10.1993)	4.5	1.1	---	8.0	0.612 < 85Kw 0.360 > 85Kw	---	
EURO II (1.10.01996)	4.0	1.1	---	7.0	0.15	0.8	
EURO III (nuevos tipos de motores y de vehículos: (1.100.2000))	ESC/ELR	2.1	0.66	---	5.0	0.1 0.13	0.8
	ETC	5.45	0.78	1.6	5.0	0.16 0.21	---
EURO IV 1° fase (nuevos tipos de motores y de vehículos: (1.100.2005))	ESC/ELR	1.5	0.46	---	3.5	0.02	0.5
	ETC	4.0	0.55	1.1	3.5	0.03	---
EURO IV 2° fase (nuevos tipos de motores y de vehículos: (1.100.2008))	ESC/ELR	1.5	0.46	---	2.0	0.02	0.5
	ETC	4.0	0.55	1.1	2.0	0.03	---
VEM (Vehículos ecológicos mejorados)	ESC/ELR	1.5	0.25	---	2.0	0.02	0.15
	ETC	3.0	0.4	0.65	2.0	0.02	---

ESC: pruebas que miden la masa de gases y partículas

ELR: pruebas que miden la opacidad de los humos

ETC: pruebas en ciclo transitorio

En la figura 3.3 se muestran los efectos en la temperatura de llama adiabática para diesel, biodiesel y sus mezclas, contra  $\lambda$ , observando un ligero aumento en la temperatura de los productos derivados del petróleo.

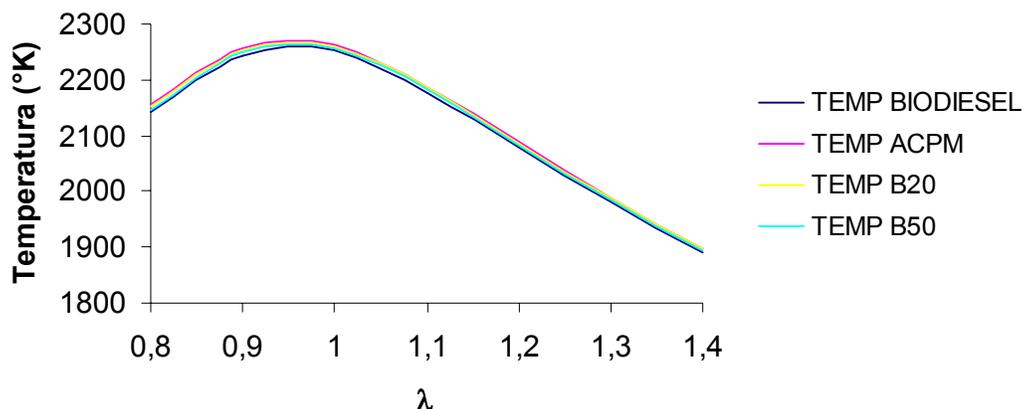


Figura 3.3. Cálculo de la temperatura de llama adiabática para Diesel y Biodiesel en función de AFR.

## **CAPITULO 4**

### **VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS EN LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN Y POTENCIA DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN AL SUMINISTRARLE BIODIESEL PURO (B100) COMO COMBUSTIBLE.**

Con el objeto de validar los resultados obtenidos analíticamente, se empleo un motor diesel AGRALE M-80, acoplado a un generador marca BRUSH de 7.0 kWa.

El análisis experimental de los efectos en la potencia y en los productos de la combustión del motor se realizó utilizando combustible diesel (ACPM) y biodiesel puro (B100), para establecer un cuadro comparativo entre ambos combustibles.

#### **4.1 INSTRUMENTACIÓN DE LA PLANTA ELÉCTRICA**

En las experimentaciones se utilizó: La planta eléctrica mencionada anteriormente, un banco de bombillos (con el cual se cargaba a la planta eléctrica), un tacómetro análogo (acoplado al eje de la planta), dos termocuplas tipo K (conectadas a un indicador digital), un cronometro digital, un medidor de consumo de combustible tipo volumétrico (utilizando una bureta graduada), analizador de gases (opacímetro). La potencia del motor se determinó a partir de la potencia eléctrica (voltaje y corriente) entregada por el generador eléctrico acoplado al motor de la planta eléctrica, con la ayuda de un voltímetro y un amperímetro. Un esquema ilustrativo es el que se muestra en la figura 4.1.

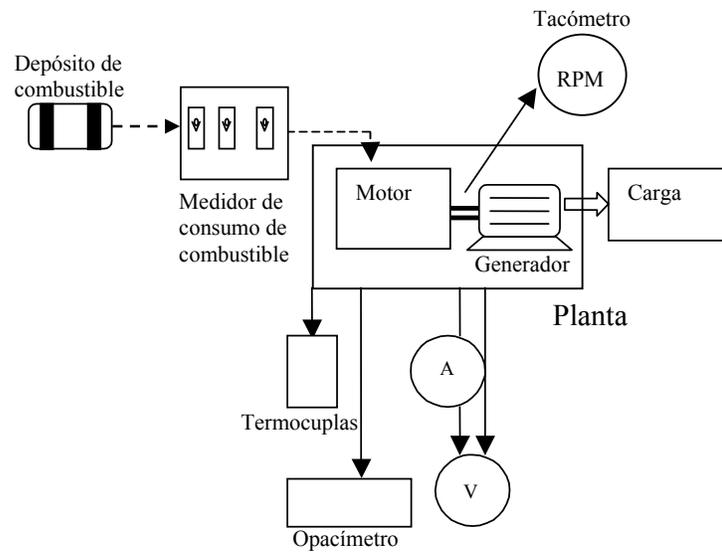


Figura 4.1 Esquema ilustrativo del montaje para las pruebas.

#### 4.1.1 Especificaciones de la planta eléctrica

La planta eléctrica empleada se muestra en la figura 4.2 y se especifica en la tabla 4.1.



Figura 4.2 Planta eléctrica (motor AGRALE M-80, generador BRUSH DE 7.0 kWa)

Tabla 4.1 Especificaciones planta eléctrica [11], [12]

PLANTA ELÉCTRICA		
Generador	Motor	Miscelánea
Marca : BRUSH Tipo : con escobillas - trifásico Frecuencia AC : 60 HZ Potencia máxima AC : 7.0 kWa Potencia nominal AC : 6.5 kWa Corriente nominal AC : 30.4 Amps @ 220 Volts Método de acoplamiento : Directo	Marca : AGRALE Referencia : M-80 Tipo:4-Tiempos, OHV, refrigerado con aire Potencia nominal: 7.6 Hp @ 2500 rpm Diámetro x Carrera : 80mm x 100mm Cilindrada : 520cc Relación de compresión : 20:1 Refrigeración : Convección forzada Lubricación : Colector sumergido Capacidad de aceite : 2.5 L Método de encendido : Manual por manubrio	Capacidad tanque combustible : 12.5 L Combustible recomendado : ACPM Horas de operación continua : 12 Dimensiones (L x W x H) : 52" x 24" x32" Peso seco : 900 lb

#### 4.1.2 Especificaciones de los equipos de medición de emisiones

El medidor de opacidad utilizado es de tipo óptico, el cual fue el utilizado para cuantificar la cantidad de material particulado emitido por cada mezcla. Es capaz de detectar el porcentaje de opacidad en vacío, en aceleración y en máxima velocidad de un motor. El equipo es portátil, fabricado por la firma SPX Dieseltune DX230 (Figura 4.3) que viene acompañado de una caja decodificadora que envía los datos directamente a una computadora. Las especificaciones se muestran en la tabla 4.2.



Figura 4.3 Opacímetro SPX DIESELTUNE DX 230.

Tabla 4.2. Características técnicas del opacímetro SPX DIESELTUNE DX\_230 [13].

Parámetro	Longitud de onda	Exactitud	Rango
Opacidad	0.25 m	$\pm 1.0\%$ a escala completa (estática)	0 – 100 % opacidad
Característica	Descripción		
Condiciones ambientales de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura ambiente: -15 – 40° C.</li> <li>• Humedad relativa: 10 – 90%.</li> </ul>		
Tiempo de respuesta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menos de 0.4 segundos.</li> </ul>		
Limpieza del lente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizar un trapo suave cada 250 pruebas aprox.</li> </ul>		
Calibración de los sensores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autocalibración: cada vez que se enciende el equipo, éste toma hasta 10 minutos para la autocalibración de todos sus sensores. Para esto debe colocarse la sonda en aire fresco (aire limpio). En caso de no lograrse la autocalibración, o cuando el sensor ha estado en uso durante periodos prolongados, se procede a la calibración manual.</li> <li>• Calibración manual: ésta se realiza utilizando filtros de densidad neutrales.</li> </ul>		

#### 4.1.3 Especificaciones de los equipos de medición de corriente y voltaje

El equipo utilizado para medir voltaje y la corriente entregada por la planta eléctrica fue un multímetro digital con pinza amperimétrica AWSPERRY DSA-600 como la de la figura 4.4. Sus especificaciones aparecen en la tabla 4.3

Tabla 4.3 Características técnicas del multímetro digital con pinza amperimétrica AWSPERRY DSA-600 [14]

Parámetro	Exactitud	Resolución	Rango
Corriente AC	1.5%	10 mA	20/200/600 <sup>a</sup>
Voltaje	AC	100mV	200/750V
	DC	1mV	2/200/1000V
Resistencia	1%	100m $\Omega$	200 $\Omega$ /200k $\Omega$
Continuidad	Respuesta: 100ms		



Figura 4.4. Multímetro digital con pinza amperímetro AWSPERRY DSA-600

#### 4.1.4 Especificaciones del equipo de medición de temperatura

Para medir la temperatura de los gases de escape y aceite se utilizaron dos termocuplas tipo K (Figura 4.5), conectadas a su indicador digital marca AUTOMICS T4WM (Figura 4.6). La Tabla 4.4 especifica los tipos de termocuplas y sus características.

Tabla 4.4 Tipos de termocuplas y sus características [15]

Tipo de Termocupla	Metal	Rango NBS Temp °C	Error
E	Níquel -10% Cromo / Constanan*	-270 a 1000°C	1.7–4.4
J	Hierro / Constanan	-210 a 760°C	1.1–2.9
K	Níquel-16% Cromo / Níquel	-270 a 1372°C	1.1–2.9
R	Platino –10% Rodio / Platino	-50 a 1768°C	1.4 –3.8
S	Platino –13% Rodio / Platino	-50 a 1768°C	1.4–3.8
T	Cobre / Constanan	-270 a 400°C	0.8–2.9

\*Cobre – Níquel



Figura 4.5 Termocupla TIPO K



Figura 4.6 Indicador digital AUTOMICS T4WM

#### 4.1.5 Especificaciones del equipo de medición de velocidad del motor

La velocidad del motor en RPM se medio con un tacómetro análogo marca TUROTEST como el que se muestra en la figura4.7 y se especifica en la tabla 4.5



Figura 4.7 Tacómetro análogo TUROTEST

Tabla 4.5 Características técnicas del Tacómetro análogo TUROTEST[16]

Resolución	Rango
100 RPM	0-2500 RPM (revoluciones por minuto)

#### 4.1.6 Especificaciones del equipo de medición de consumo de combustible

Para medir el consumo de combustible se utilizó el método volumétrico, el cual consiste en un recipiente graduado (ml) donde se deposita el combustible (figura 4.8). Mientras fluye éste al motor irá bajando el nivel en el recipiente hasta llegar a la marca superior, poniéndose a funcionar el cronómetro en ese instante, cuando el nivel llegue a la marca inferior se detiene el reloj, luego el volumen consumido por el motor entre estas dos marcas se convierte a Kgm/hr. [15]



*Figura 4.8 Medidor de consumo de combustible (método volumétrico)*

Para la medición del tiempo utilizamos un cronómetro digital marca CASIO HS-3 como el que se muestra en la figura 4.9.



*Figura 4.9 Cronómetro digital CASIO HS-3*

#### 4.2 DESEMPEÑO DEL MOTOR DE LA PLANTA ELÉCTRICA AL UTILIZAR DIESEL (ACPM) O BIODIESEL PURO (B100) COMO COMBUSTIBLE

El desempeño de un motor puede caracterizarse por sus curvas de torque y potencia, obtenidas según procedimientos estándar de la SAE sobre dinamómetros de banco, se establece una carga mecánica determinada y se permite que el motor se estabilice en una velocidad de rotación. [17]

Debido a que las experimentaciones se realizaron en una planta eléctrica, la potencia se determinó de forma indirecta, es decir a partir de la corriente y el voltaje (Ec. 4.1) entregados por el generador eléctrico acoplado al motor de la planta, en lugar de un dinamómetro de banco, estableciendo cargas eléctricas en vez de cargas mecánicas. Esta práctica es recomendada por ASME cuando se quiere determinar el desempeño del motor de una planta eléctrica [17]. La eficiencia del generador se asumió constante.

$$P = \frac{VI}{\eta_G} \quad (4.1)$$

donde

$V$       voltaje

$I$       corriente

$\eta_G$     . eficiencia del generador

En la figura 4.10 se comparan las curvas de potencia del motor de la planta eléctrica al trabajar con biodiesel puro (B100), diesel (ACPM) y las mezclas B20 y B50.

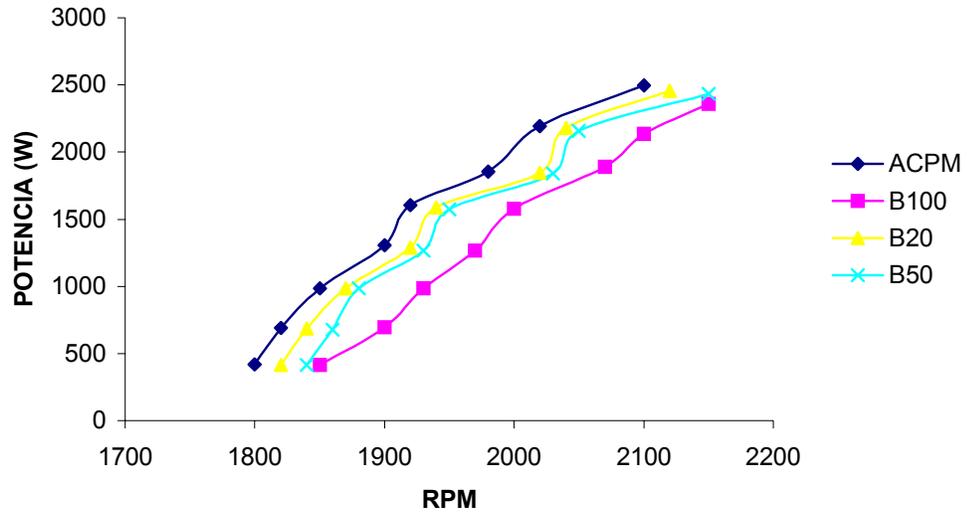


Figura 4.10. Comparación de curvas de potencia del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiesel puro (B100), diesel (ACPM) y mezclas (B20 y B50) como combustibles.

En la tabla 4.6 se muestran los porcentajes de pérdida de potencia que experimenta la planta eléctrica al trabajar con biodiesel puro (B100), y las mezclas B20 y B50, tal porcentaje se calculó comparando el valor máximo de potencia entregado por la planta al utilizar B100, B20 y B50 con el valor máximo que entregaba la planta cuando trabajaba con ACPM.

Tabla 4.6 Pérdidas de potencia

Tipo de combustible	% pérdida de potencia
B100	5.58
B20	1.52
B50	2.35

La eficiencia de un motor se define como la relación entre la potencia que entregada este y el calor que le suministra el combustible (Ec. 4.2). La figura 4.11 ilustra la eficiencia en función de las RPM del motor de la planta eléctrica, al trabajar con diesel o con biodiesel puro.

$$\eta = \frac{P}{\dot{V}_{Comb} LHV_V} \quad (4.2)$$

donde

$\dot{V}_{Comb}$  flujo volumétrico estándar de combustible ( $m^3/s$ )

$LHV_V$  poder calorífico inferior del combustible ( $J/m^3$ )

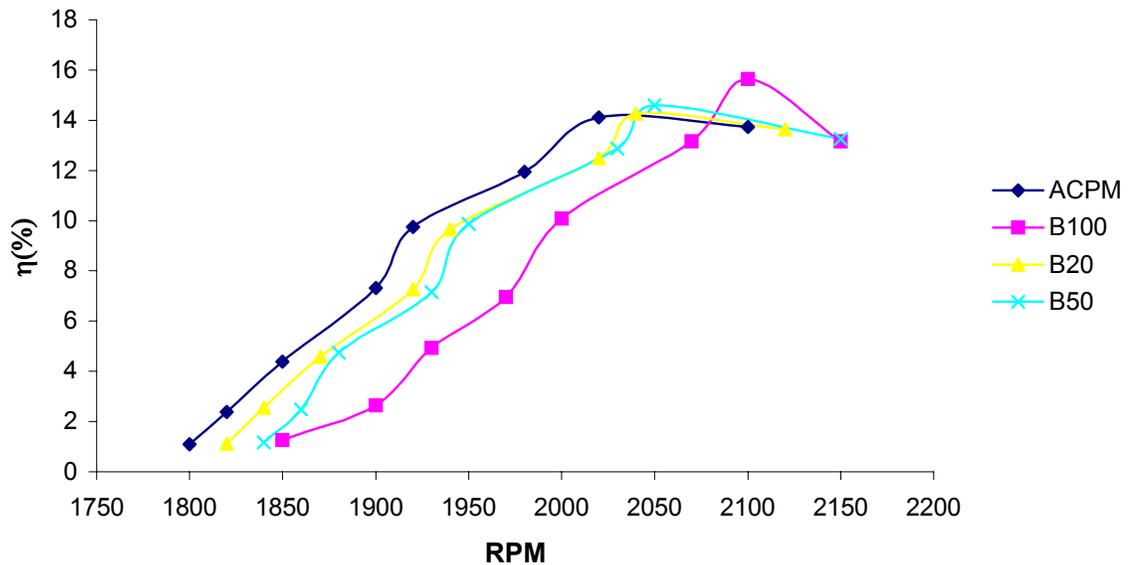


Figura 4.-11 Curvas de eficiencia del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiésel puro (B100) , diesel (ACPM) y mezclas (B20 y B50) como combustibles.

La figura 4.11 muestra que la diferencia entre la eficiencia de ambos combustibles es pequeña, lo cual hace del biodiésel una alternativa viable para reemplazar al diesel.

Las tendencias observadas en el proyecto en cuanto al consumo de combustible (figura 4.12) fue de un leve incremento para el biodiésel de aproximadamente 14 % con respecto al diesel.

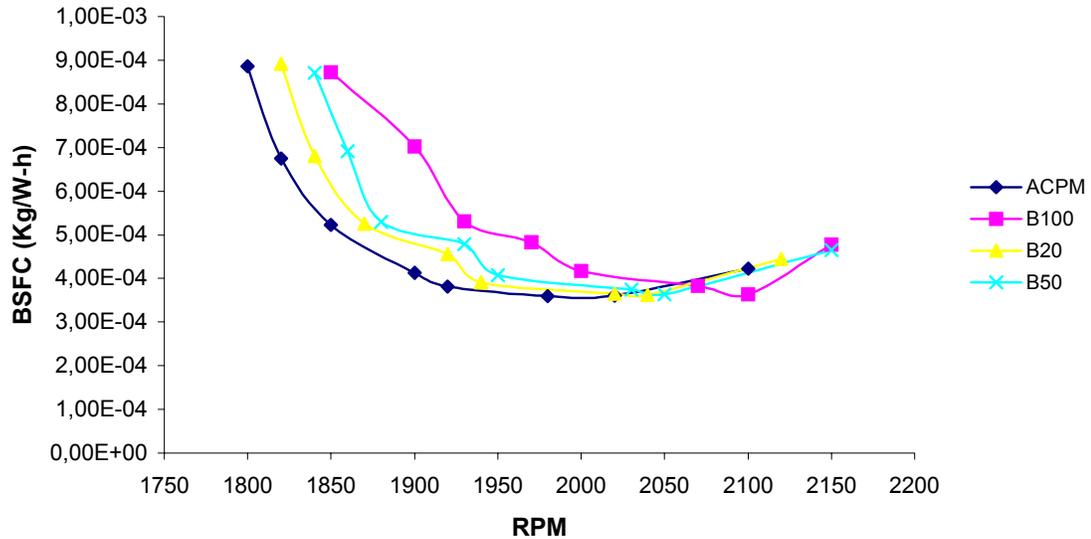


Figura 4.12 Consumo específico de combustible del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiesel puro (B100), diesel (ACPM) y mezclas (B20 y B50) como combustibles.

### 4.3 EMISIONES CONTAMINANTES DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Es quizás la combustión, como proceso responsable de gran parte de la energía térmica y eléctrica mundial, la reacción más importante de cuantas reacciones químicas industriales existen, a pesar del hecho de que los productos resultantes de la combustión, las emisiones o aerosoles de combustión<sup>\*</sup>, no tienen valor alguno comparado con los combustibles quemados para obtenerlos. Sin embargo el impacto ambiental que estos productos resultantes pueden ocasionar hace necesaria la aplicación de normativas que condicionarán el desarrollo e implementación de controles tecnológicos de un costo añadido significativo en todo proceso de combustión.

<sup>\*</sup> Los aerosoles de combustión son sistemas bifasicos de particulas sólidas o líquidas, generadas en el proceso de la combustión, en suspensión en un medio gaseoso constituido por los propios gases del proceso.[4]

Durante la fase de combustión y poscombustión las principales emisiones que se liberan del proceso son: gases y vapores en elevada concentración, materia particulada, compuestos orgánicos y elementos traza.[4]

Los gases están formados mayoritariamente por gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y compuestos halogenados. Gases precursores de la lluvia ácida: dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ); además de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

*Tabla 4.7 Principales contaminantes emitidos por motores de combustión interna y sus principales efectos [17]*

<b>Contaminante</b>	<b>Efectos sobre la salud humana y el ambiente</b>
Material particulado (PM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Incrementa la incidencia de enfermedades respiratorias (Infecciones respiratorias, bronquitis crónica, decremento en función pulmonar, etc.)</li> <li>○ Incrementa la rata de mortalidad.</li> <li>○ Incrementa los ataques asmáticos.</li> <li>○ Efectos cancerígenos y mutagénicos.Efectos globales</li> <li>○ Reduce la visibilidad (Smog de Londres)</li> </ul>
Óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Reacciona con la atmósfera y forma <math>\text{SO}_3</math>. El <math>\text{SO}_3</math> se combina con vapor de agua para formar lluvia ácida</li> <li>○ Destruye la clorofila e impide el proceso de la fotosíntesis.Modifica el Ph de los ríos y lagos, afectando la vida acuática.Corroe las estructuras metálicas y obras de interés cultural e histórico</li> </ul>
Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Fuerte irritante pulmonar</li> <li>○ Produce fibrosis pulmonar crónica y bronquitis</li> </ul> <p>Efectos globales</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Smog fotoquímico</li> <li>○ Lluvia ácida</li> <li>○ Destrucción catalítica de la capa de ozono</li> </ul>
Hidrocarburos no quemados (HC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Irritan los ojos</li> <li>○ Irritan vías respiratorias</li> <li>○ Algunos VOC pueden ser carcinógenos y mutagénicos.Las emisiones de <math>\text{CH}_4</math> y <math>\text{C}_2\text{H}_6</math> son gases que producen efecto invernadero.</li> </ul>
Monóxido de carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Reacciona con la hemoglobina de la sangre 210 veces más rápido que el oxígeno. Forma carboxihemoglobina, reduciendo la capacidad portadora de oxígeno de la sangre</li> <li>○ Exposición a concentraciones muy elevadas produce asfixia, pérdida de coordinación y reflejos. Puede causar la muerte.</li> </ul>
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Afecta la piel en concentraciones altas</li> <li>○ Desplaza al oxígeno en recintos cerrados</li> </ul> <p><b>Efectos globales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Calentamiento global de la tierra</li> </ul>

En general, cualquier emisión de combustión va a depender en primer lugar (y será representativa) de las propiedades del combustible, que es el precursor de la misma; pero no menos importante será el escenario donde se genera, es decir la tecnología de combustión utilizada (motores de combustión interna).

Otro factor que se debe tener en cuenta es la opacidad<sup>□</sup> de los humos emitidos por fuentes móviles con motores diesel, los cuales en condición de aceleración libre<sup>&</sup> no podrán exceder los valores de la tabla 4.8.

*Tabla 4.8 Normas permisibles de opacidad de humos para fuentes móviles a diesel [18].*

Año-modelo	Vehículo liviano	Vehículo mediano	Vehículo pesado
	opacidad	opacidad	Opacidad
2001 y posteriores	40 %	40 %	40 %
1996 – 2000	50 %	50 %	50 %
1991 – 1995	55 %	55 %	55 %
1986 – 1990	60 %	60 %	60 %
1981 – 1985	65 %	65 %	65 %
1980 y anteriores	70 %	70 %	70 %

#### 4.3.1 Medición de la opacidad

El medidor de opacidad utilizado es de tipo óptico con una longitud de onda de 0,25m fue el utilizado para cuantificar la cantidad de material particulado emitido por cada mezcla. Es capaz de detectar el porcentaje de opacidad en vacío, en aceleración y en máxima velocidad de un motor.

---

<sup>□</sup> Opacidad: es el grado de reducción que ocasiona una sustancia al paso por ella de la luz visible.[18]

<sup>&</sup> Aceleración libre: es el aumento de revolución de motor de la fuente móvil llevado rápidamente a máxima aceleración estable, sin carga y en neutro (cajas manuales) y en parqueo (cajas automáticas).[18]

Tabla 4.9 Datos obtenidos del porcentaje de opacidad producida por cada tipo de mezcla.

COMBUSTIBLE	LECTURAS	% OPACIDAD (Aceleración máxima)
B100	Toma 1	17,6
	Toma 2	20,8
	Toma 3	31,6
	Promedio	23,3
B50	Toma 1	19,8
	Toma 2	24,7
	Toma 3	36,5
	Promedio	27
B20	Toma 1	24,5
	Toma 2	38,3
	Toma 3	41,2
	Promedio	34,6
B0	Toma 1	19,6
	Toma 2	63,5
	Toma 3	51,3
	Promedio	44,8

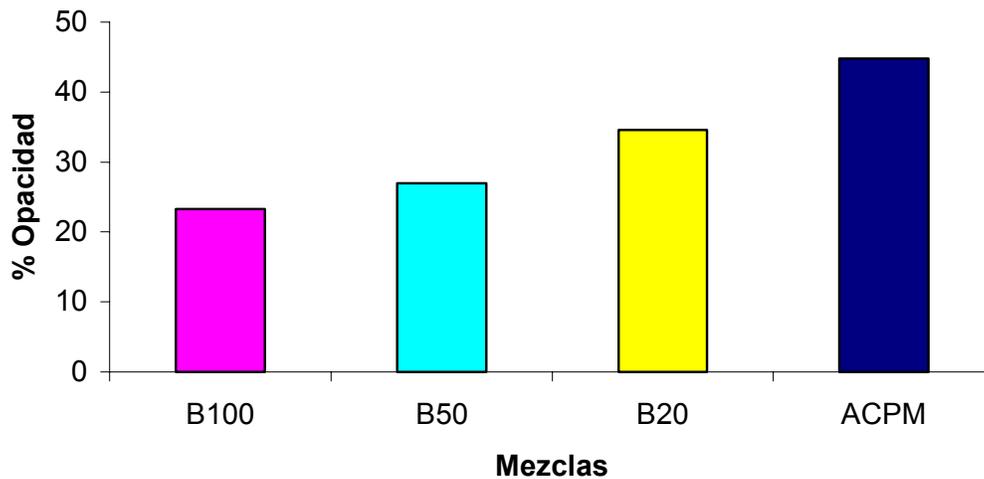


Figura 4.13 Porcentaje de opacidad producido por los diferentes tipos de mezcla.

Claramente se observa, en la Figura 4.13, la existencia de una gran reducción de la cantidad de material particulado producido en la combustión a medida que se aumenta la cantidad de biodiesel utilizado.

### 4.3.2 Temperatura de los gases de escape y temperatura de aceite

En la Figura 4.14 observamos que la temperatura de los gases de escape son mayores empleando biodiesel puro debido a la mayor presencia de carbono en su composición. También se observa que la temperatura del aceite en ambos combustibles presenta la misma tendencia, y no se percata una diferencia significativa o aumento considerable.

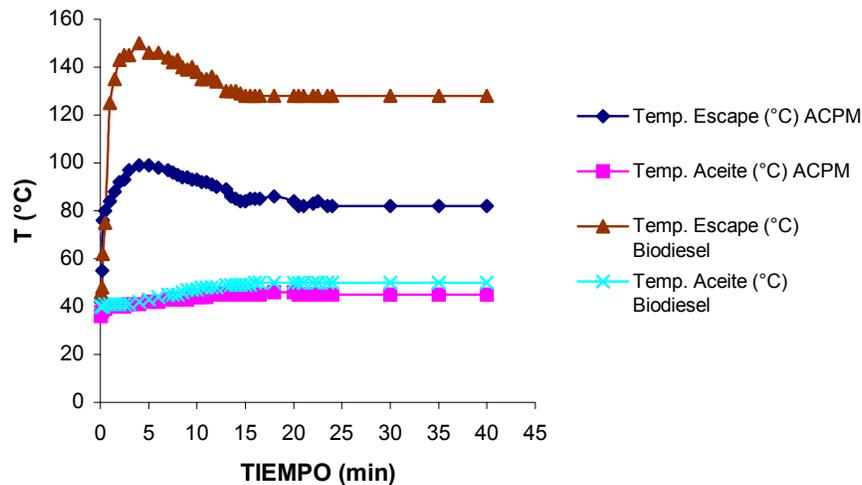


Figura 4.14 Temperatura de los gases de escape y de aceite del motor de una planta eléctrica (AGRALE M-80) de 4 tiempos de 520 cc 7.6 HP (5.6 kW) @ 2500 rpm y relación de compresión 20:1, operando con biodiesel puro (B100) y diesel (ACPM) como combustibles.

## 4.4 VALORACIÓN ECONÓMICA

La valoración económica se realizó teniendo en cuenta los costos de los fluidos de trabajo. Básicamente se comparó lo que cuesta producir un kilovatio hora (Kw.-h) de energía eléctrica operando la planta con diesel y lo que cuesta cuando se opera la planta con biodiesel puro.

La Tabla 4.10 muestra los precios del mercado del B100 y del ACPM.

Tabla 4.10. Precios del mercado del B100 y del ACPM [19] [7].

Fluido	unidad	precio
ACPM	\$/Gal	3091
B100	\$/Gal	3500

El costo del kilovatio-hora se determinó de la ecuación 4.3

$$\$/Kw-h = \frac{(C\dot{V})_{COMB}}{Pot_{MAX}} \quad (4.3)$$

donde

$(C\dot{V})_{COMB}$  Precio del combustible por flujo (o consumo) volumétrico estándar de combustible (\$/h)

$Pot_{MAX}$  Son los valores máximos de potencia entregados en cada caso por el motor de la planta eléctrica al trabajar con ACPM, B100, B20 o B50 (Figura 4.15)

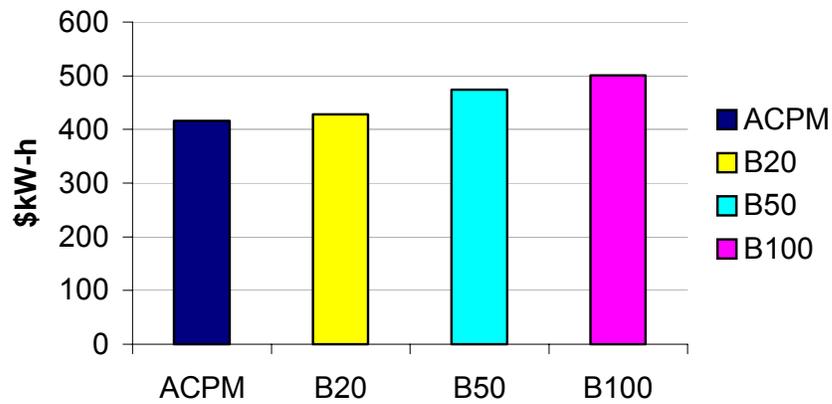


Figura 4.15 Valoración económica

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se desarrolló la exploración analítica, instrumentación y pruebas con el objeto de evaluar la alternativa de utilización de Biodiesel como combustible en motores de encendido por compresión, indagando sobre aspectos relacionados con la potencia, rendimiento, consumo de combustible y emisiones, encontrando los siguientes resultados:

- La potencia disminuye cuando se utiliza Biodiesel como combustible o se aumenta su porcentaje en la mezcla, esto se debe al menor poder calorífico del biocombustible con respecto al del diesel convencional.
- El consumo de combustible aumenta para el biodiesel y sus mezclas entre 14% y 20% para B20 y B50 respectivamente, este aspecto también está relacionado con el menor poder calorífico del biocombustible.
- La opacidad de los humos disminuye en tanto se agrega biodiesel a la mezcla entre 20% y 30% para B20 y B50 respectivamente, dependiendo directamente de la afinación del motor y del buen estado de sus componentes (sistema de inyección).

Las siguientes son nuestras recomendaciones para un próximo análisis:

- Realizar el estudio anterior en un vehículo para analizar el comportamiento del biodiesel en una fuente móvil (pruebas de carretera).
- Estudiar el comportamiento del biodiesel y sus diferentes mezclas en motores de mayor tamaño y tipo marinos.

## ANEXOS

### A. PROTOCOLO DE OPERACIÓN PARA LA PLANTA ELECTRICA

Las experimentaciones se llevaron a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. Verificar que todos los instrumentos y equipos estén conectados correctamente.
2. Realizar inspección y corrección de fugas.
3. Suministrar combustible al depósito y llenar el dispositivo de medición de consumo de combustible.
4. Arrancar el motor con ACPM.
5. Graduar el voltaje de la planta en 110 voltios (sin carga).
6. Suministrarle carga eléctrica a la planta utilizando bombillos de 100 W.
7. Regular el voltaje de la planta con el sistema de aceleración de la misma a medida que se aumenta la carga.
8. Registrar las lecturas de (Tabla A.1):
  - Voltaje y corriente entregados por la planta eléctrica.
  - Tiempo de consumo de  $\Delta V$  de combustible.
  - Temperatura de los gases de escape y de aceite del motor.
  - Velocidad del motor en RPM.
  - Opacidad de humos.
9. Incrementar la carga eléctrica en 100 W y volver al ítem 6 hasta que la carga sea máxima.
10. Apagar el motor.
11. Realizar el cambio de combustible (B100, B20 y B50), y repetir los ítems del 5 al 10.



## REFERENCIAS

- [1] [www.bcr.com.ar](http://www.bcr.com.ar)
- [2] [www.biodiesel.com.ar](http://www.biodiesel.com.ar)
- [3] [www.veggievan.org](http://www.veggievan.org)
- [4] CIEMAT. Tecnologías energéticas e impacto ambiental. Ed. Mc-Graw Hill. España. 2001
- [5] Armas, O. Estudio de prestaciones y emisiones contaminantes provocadas por biogasóleos autóctonos y por gasóleos emulsionados. Red temática utilización de combustibles en motores térmicos. Colombia. 2002
- [6] [www.journeytoforever.org](http://www.journeytoforever.org)
- [7] CORPODIB. Proyecto para la producción de biodiesel a partir de palma africana en Colombia.
- [8] Beltrán, R. Principios de conversión térmica de energía. Uniandes. Colombia. 1997.
- [9] Wylen, V. Fundamentals of thermodynamics. Limusa Wiley. Mexico. 1999
- [10] AUTOCITY, Los vehículos euro (2° parte). Revista AUTOCITY N° 35. España. 2002
- [11] [www.agrale.com.br](http://www.agrale.com.br)
- [12] [www.brushelectrics.com](http://www.brushelectrics.com)
- [13] Operators manual SPX Dieseltune DX.230 Smokemeter. USA. 1998
- [14] [www.awsperry.com](http://www.awsperry.com)
- [15] Tovar, G; Pájaro, D. Diseño y construcción de un banco didáctico para el estudio y análisis de los parámetros básicos de funcionamiento de un motor encendido por compresión. UTB. Colombia. 2002
- [16] [www.turotest.com](http://www.turotest.com)
- [17] Fajardo, J. Conversión de una planta eléctrica de gasolina a gas natural. Uniandes. Colombia. 2003
- [18] Resolución N° 005 de Enero 9 de 1996. Ministerios del Medio Ambiente y de Transporte.
- [19] [www.ecopetrol.gov.co](http://www.ecopetrol.gov.co)