

**EMPLEO DEL BIODIESEL COMO SUSTITUTO DE LOS COMBUSTIBLES  
LÍQUIDOS FÓSILES (DIÉSEL) Y LA DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES DE  
GASES DE EFECTO INVERNADERO DEBIDO A SU USO**

**HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**EMPLEO DEL BIODIESEL COMO SUSTITUTO DE LOS COMBUSTIBLES  
LÍQUIDOS FÓSILES (DIÉSEL) Y LA DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES DE  
GASES DE EFECTO INVERNADERO DEBIDO A SU USO**

**HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA**

**Monografía para Optar al Título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director**

**LEONARDO ACEVEDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor de esta monografía quiere agradecer a ECOPETROL, al Instituto Colombiano del Petróleo y a CENIPALMA, por los estudios y ensayos realizados en el tema de biocombustibles, los cuales sirvieron de apoyo durante la realización de este trabajo.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>3</b>
<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>3</b>
1.1 RECURSOS RENOVABLES .....	3
1.1.1 <i>Energía solar térmica</i> .....	3
1.1.2 <i>Energía solar fotovoltaica</i> .....	3
1.1.3 <i>Energía eólica</i> .....	4
1.1.4 <i>Energía hidráulica</i> .....	4
1.1.5 <i>Energía mareomotriz y de las olas</i> .....	4
1.1.6 <i>Energía geotérmica</i> .....	5
1.1.7 <i>Energía de la biomasa</i> .....	5
1.2 BIOCOMBUSTIBLES .....	6
1.2.1 <i>Clases de biocombustibles</i> .....	7
1.3 BIODIESEL.....	8
1.4 HISTORIA DEL BIODIESEL [5] .....	9
1.5 MATERIAS PRIMAS .....	13
1.5.1 <i>ACEITES Y GRASAS</i> .....	14
1.5.2 <i>Alcohol</i> .....	15
1.5.3 <i>Catalizadores y neutralizadores</i> .....	16
1.6 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	17
1.6.1 <i>Proceso por lotes (batch)</i> .....	17
1.6.2 <i>Proceso continuo</i> .....	18
1.6.3 <i>Sistema para cargas con alto contenido de ácidos grasos libres</i> .....	19
1.6.4 <i>Proceso BIOX</i> .....	21
1.6.5 <i>Proceso supercrítico – sistema sin catalizador</i> .....	21
1.7 POLÍTICAS DE DESARROLLO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES .....	23
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>25</b>
<b>2. PARAMETROS DE CALIDAD ESTABLECIDOS PARA EL BIODIESEL</b> .....	<b>25</b>
2.1 DESTILACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA [16 Y 17].....	25
2.2 PUNTO DE INFLAMACIÓN (FLASH POINT).....	25
2.3 VISCOSIDAD.....	26
2.4 CENIZAS SULFATADAS.....	26
2.5 AZUFRE .....	26
2.6 CORROSIÓN EN LÁMINA DE COBRE.....	26
2.7 NÚMERO DE CETANO.....	27
2.8 PUNTO DE NUBE .....	27
2.9 CARBÓN RESIDUAL .....	27
2.10 NÚMERO ÁCIDO .....	28
2.11 GLICERINA LIBRE.....	28
2.12 GLICERINA TOTAL .....	28
2.13 CONTENIDO DE FÓSFORO.....	28
2.14 ESTABILIDAD.....	29
2.15 ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO .....	29
2.16 ESTABILIDAD TÉRMICA .....	29
2.17 ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN .....	29
2.18 CONTENIDO DE MONOGLICÉRIDOS, DIGLICÉRIDOS Y TRIGLICÉRIDOS .....	30

2.19 CULTIVO DE OLEAGINOSAS EN COLOMBIA .....	30
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>33</b>
<b>3. EFECTO EN LAS EMISIONES POR EL TIPO DE COMBUSTIBLE UTILIZADO .....</b>	<b>33</b>
3.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA .....	33
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>37</b>
<b>4. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL, BIOCOMBUSTIBLE Y LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLES DIÉSEL CON BIOCOMBUSTIBLES. 37</b>	
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES.....	37
4.2 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE DIÉSEL CON BIODIESEL DE PALMA EN EL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES.....	37
4.3 VISCOSIDAD.....	37
4.4 CONTENIDO DE AZUFRE .....	38
4.5 NÚMERO DE CETANO.....	39
4.6 PODER CALORÍFICO.....	40
4.7 LUBRICIDAD .....	40
4.8 PROPIEDADES DE FLUJO EN FRÍO .....	41
4.9 COLOR ASTM .....	42
<b>CAPITULO V .....</b>	<b>43</b>
<b>5. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES CON COMBUSTIBLES Y BIODIESEL PUROS 43</b>	
5.1 EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO - MP .....	44
5.2 EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO – NO <sub>x</sub> .....	45
5.3 EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO – CO <sub>2</sub> .....	47
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>49</b>
<b>6. ESTÁNDARES Y REGULACIONES SOBRE CALIDAD DEL DIÉSEL Y BIODIESEL .....</b>	<b>49</b>
6.1 NORMA ASTM D975. STANDARD SPECIFICATION FOR DIESEL FUEL OILS .....	49
6.2 NORMA EN 590. AUTOMOTIVE FUELS. DIESEL. REQUIREMENTS AND METHODS. EUROPEAN AUTOMOTIVE DIESEL STANDARD.....	49
6.3 NORMA ASTM D6751. STANDARD SPECIFICATION FOR BIODIESEL FUEL BLEND STOCK (B100) FOR MIDDLE DISTILLATE FUELS .....	50
6.4 NORMA EN 14214. COMBUSTIBLES DE AUTOMOCIÓN. METIL ESTERES DE ÁCIDOS GRASOS (FAME) PARA USO EN MOTORES DIÉSEL. REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO 50	
6.5 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5444. BIODIESEL PARA USO EN MOTORES DIÉSEL. ESPECIFICACIONES.....	50
6.6 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1438. PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS. COMBUSTIBLES PARA MOTORES DIÉSEL .....	50
6.7 RESOLUCIÓN 1289 DE SEPTIEMBRE DE 2005. CALIDAD DEL BIOCOMBUSTIBLE PARA USO EN MOTORES DIÉSEL, EL COMBUSTIBLE DIÉSEL (ACPM) Y SU MEZCLA .....	51
6.8 BIOCOMBUSTIBLES .....	51
6.9 ACEITES VEGETALES.....	51
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN .....	8
<b>FIGURA 2.</b> SISTEMA BATCH PARA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	18
<b>FIGURA 3.</b> SISTEMA CONTINUO PARA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	19
<b>FIGURA 4.</b> SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE CARGAS CON ALTO FFA.....	20
<b>FIGURA 5.</b> SISTEMA DE PROCESAMIENTO BIODIESEL.....	21
<b>FIGURA 6.</b> PROCESO SUPERCRÍTICO .....	22
<b>FIGURA 7.</b> COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE DIÉSEL CON BIODIESEL DE PALMA.....	38
<b>FIGURA 8.</b> TENDENCIA EN EL CONTENIDO DE AZUFRE DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE DIÉSEL CON BIODIESEL DE PALMA. ....	39
<b>FIGURA 9.</b> TENDENCIA DEL NÚMERO DE CETANO PARA LAS MEZCLAS COMBUSTIBLE DIÉSEL CON BIODIESEL DE PALMA.....	39
<b>FIGURA 10.</b> TENDENCIA DEL PODER CALORÍFICO PARA LAS MEZCLAS DIÉSEL-BIODIESEL DE PALMA. ....	40
<b>FIGURA 11.</b> LUBRICIDAD DE LAS MEZCLAS DIÉSEL HDT-BIODIESEL DE PALMA (ESPECIFICACIÓN 450 MM MÁXIMO) .....	41
<b>FIGURA 12.</b> COMPORTAMIENTO DEL PUNTO DE FLUIDEZ DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE DIÉSEL CON BIODIESEL DE PALMA .....	42
<b>FIGURA 13.</b> COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO CUANDO SE UTILIZAN LOS COMBUSTIBLES PUROS .....	45
<b>FIGURA 14.</b> COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE NOX CUANDO UTILIZAN COMBUSTIBLES PUROS.....	46
<b>FIGURA 15.</b> COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO CUANDO SE UTILIZAN LOS COMBUSTIBLES PUROS. ....	47

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE BIODIESEL .....	12
<b>TABLA 2.</b> ACEITE VEGETAL A PARTIR DE DIFERENTES CULTIVOS. ....	15
<b>TABLA 3.</b> TASA DE CRECIMIENTO DE LOS DIFERENTES CULTIVOS DE OLEAGINOSAS EN COLOMBIA. ....	30
FUENTE: CÁLCULOS OBSERVATORIO AGROCADENAS CON BASE EN CIFRAS DE MISIÓN RURAL Y MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL .....	30
<b>TABLA 4.</b> PRODUCCIÓN AGRÍCOLA POR CULTIVOS EN COLOMBIA (TONELADAS ANUALES) .....	31
FUENTE: CÁLCULOS OBSERVATORIO AGROCADENAS CON BASE EN CIFRAS DE MISIÓN RURAL Y MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL .....	31
<b>TABLA 5.</b> ENTORNO MUNDIAL DEL MERCADO DE PALMA. ....	32

## RESUMEN

**TITULO: EMPLEO DEL BIODIESEL COMO SUSTITUTO DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS FÓSILES (DIÉSEL) Y LA DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DEBIDO A SU USO\***

**AUTOR: HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA**

**Palabras Clave:** Biodiesel, biocombustibles, biomasa, aceites vegetales, transesterificación.

### **DESCRIPCIÓN:**

La quema de combustibles fósiles para propósitos de transporte, es responsable por más del 21% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el planeta, lo que conlleva a deteriorar la calidad del aire que respiramos y contribuye con el calentamiento global de la tierra.

Además, considerando el continuo y exagerado incremento en los precios del petróleo y de sus derivados a nivel mundial, y teniendo en cuenta que la masiva utilización de combustibles fósiles ha llevado a reducir en alto grado las reservas existentes (las proyecciones establecen de 30 a 50 años), se concluye que es hora de fortalecer la investigación para el uso de fuentes de energías alternas, que no sean contaminantes y que sean sostenibles en el tiempo. En este contexto, los aceites vegetales como combustibles para motores diésel entran en escena.

El resultado principal de la revisión documental aquí presentada, fue dar a conocer las bondades encontradas al reemplazar los combustibles fósiles por biodiesel, ya que desde el punto de vista ambiental y económico presenta muchas ventajas atractivas, entre las que se destacan: 1) funciona en cualquier motor diésel convencional, 2) no requiere ninguna modificación, 3) puede almacenarse puro o en mezcla, 4) al igual que el diésel, es el único combustible alternativo que cumple con los requisitos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), 5) puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el combustible diésel de petróleo, 6) su combustión disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados y de un 75 a 90% los hidrocarburos aromáticos, 7) proporciona significativas reducciones en la emanación de partículas y de monóxido de carbono, 8) principalmente se produce a partir de recursos renovables, y -por último-, una característica clave es que pueden ser fácilmente integrados en los sistemas logísticos de distribución que actualmente se encuentran en operación.

---

\* Monografía para optar al Título de "Especialista en Ingeniería Ambiental"

\*\*Facultad de Ingeniería Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Leonardo Acevedo

## SUMMARY

**TITLE: USE OF BIODIESEL AS A SUBSTITUTE FOR LIQUID FUEL FOSSILS (DIESEL) AND THE DECREASE IN EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES DUE TO IT USE\***

**AUTHOR: HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA**

**Keywords:** Biodiesel, biofuels, biomass, vegetable oil, transesterification, fossil fuels, pollution

### **DESCRIPTION:**

The burning of fossil fuels for transport purposes, accounts for more than 21% of emissions of greenhouse gasses on the planet, which leads to deterioration of the quality of the air we breathe and contributes to global warming of the earth.

Moreover, considering the continuous and excessive increase in prices of petroleum and petroleum products worldwide, and given that the massive use of fossil fuels has led to greatly reduce the stock (down from the projected 30 to 50 years), we conclude that it is time to strengthen the research on the use of alternative energy sources, non-polluting and that are sustainable over time. In this context, vegetable oil as fuel for diesel engines come on stage.

The main outcome of the review document presented here, was give to know the benefits by replacing fossil fuels with biodiesel, since from an environmental and economic presents many attractive advantages, among which are: 1) works on any engine conventional diesel, 2) requires no modification, 3) can be stored in pure or mixed, 4) similar to the diesel fuel is the only alternative that meets the requirements of the Environmental Protection Agency of the United States (EPA) 5) can be used pure or mixed in any proportion with petroleum diesel fuel, 6) combustion decreases by 90% the amount of total unburned hydrocarbons and 75 to 90% aromatic hydrocarbons, 7) provides significant reductions in emission of particulates and carbon monoxide, 8) are mainly produced from renewable resources, and, finally, a key feature is that they can be easily integrated into the logistics of distribution systems currently in operation.

---

\* Monograph to apply for the academic qualification of "Environmental Engineering Expert"

\*\*Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Head teacher: Leonardo Acevedo

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se calcula que el transporte es responsable del 21 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye con un importante aporte al calentamiento global del planeta. Las pocas medidas que se han tomado frente a este problema han sido ineficientes, es por esto que para cumplir con los objetivos de sostenibilidad y en particular con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero aprobada en el Protocolo de Kioto, es esencial encontrar soluciones definitivas para reducir las emisiones en este sector.

Teniendo en cuenta que la mayoría de la energía utilizada en el sector del transporte proviene del petróleo y que las reservas de petróleo conocidas son limitadas, ya que están restringidas a unas pocas regiones del mundo, que con el paso del tiempo disminuirán y se harán cada vez más difíciles de explotar, es necesario comenzar a adoptar medidas que garanticen la reducción de la dependencia de estos combustibles y al mismo tiempo abrir la posibilidad de que combustibles alternativos entren en escena y compitan de manera equitativa con el costo de producción de los combustibles fósiles. Para lograr estos objetivos se requieren cambios en las políticas gubernamentales de los países, que incluyan la diversificación de las fuentes de energía y la investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías. De esta manera se obtendría indirectamente el mejoramiento del medio ambiente y la disminución en la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera.

Diferentes investigaciones, presentan a los biocombustibles como una fuente limpia y renovable de energía y una alternativa para reducir la emisión de gases contaminantes y el deterioro del medio ambiente. El uso de biocombustibles como el biodiesel, en la sustitución parcial del diésel del petróleo (petrodiesel) comienza a marcar una tendencia importante a nivel mundial, debido a la semejanza entre sus propiedades físico-químicas y en la posibilidad del uso directo en los motores actuales utilizados por el sector del transporte.

En Colombia, la producción de biodiesel con fines de mezcla con combustibles fósiles como el petrodiesel, es una alternativa económica viable, el país cuenta actualmente con más del 2% de los cultivos de palma africana a nivel mundial y en los últimos años se ha incentivado e intensificado su siembra, todo esto con el fin de minimizar la producción del diésel del petróleo en las refinerías y de esta manera aportar un grano de arena con el fin de atenuar los efectos de la creciente dieselización del sector del transporte.

Con esta monografía se busca generar un documento que dé a conocer el alto potencial del uso del biodiesel como aditivo para mezclas o como sustituto del

diésel de petróleo en el sector del transporte y la importante reducción que generaría su uso, en las emisiones de los gases contaminantes y de efecto invernadero. De igual manera se ampliará la información con respecto a aspectos económicos de obtención, materias primas, normas regulatorias, algunas comparaciones del biodiesel versus diésel de petróleo y el desempeño en el uso de los motores, entre otros.

Se espera que la información aquí presentada sirva de respaldo para futuros estudios que demuestren las mejoras obtenidas en la calidad de los combustibles y en la calidad del medio ambiente; al aplicar y al entrar en vigencia las leyes que promueven el uso de los combustibles limpios en el país.

# CAPÍTULO I

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1 RECURSOS RENOVABLES

Las fuentes energéticas renovables también denominadas “energías alternativas” o “no contaminantes”, son aquellas cuyo suministro es más o menos regular en el tiempo y tienen su característica principal en la renovación casi constante.

Respecto a la importancia de la promoción de las energías renovables la Unión Europea ha publicado un Libro Verde (o documento de reflexión) y un Libro Blanco (o documento de propuestas). En el Libro Verde “Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético” se hace un profundo análisis sobre la necesidad que tiene el mundo de liberarse de la dependencia de los combustibles fósiles al tiempo que no puede permitirse el lujo de desaprovechar los recursos renovables para aumentar el autoabastecimiento. El Libro Blanco “Para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitarios” de la comunicación de la Comisión “Energía para el futuro: Fuentes de Energías Renovables” fija objetivos y plantea el objetivo para el 2010 de ampliar el porcentaje de abastecimiento con energías renovables en la producción total de energía primaria, al 12% total. [1]

#### 1.1.1 Energía solar térmica

La energía proveniente del Sol lo hace en forma de radiación con diferentes longitudes de onda. Las más perceptibles para nosotros son las que conforman el espectro visible y que nos permite ver los colores, y las que conforman el espectro térmico (infrarrojo) y que mantienen la temperatura del planeta apta para la vida. El aprovechamiento solar para usos térmicos permite captar la energía del Sol y utilizarla para calentar un fluido (agua, aceite, gas, etc), pudiendo aprovechar este calor para diferentes usos que van desde la producción de electricidad a la generación de agua caliente para uso doméstico. [2]

#### 1.1.2 Energía solar fotovoltaica

Otro aprovechamiento posible de la energía solar, ampliamente asumido, es la de la transformación de la misma en energía eléctrica. Ello se realiza a través de los

denominados paneles fotovoltaicos. La cantidad de ellos que se deben disponer depende de la potencia eléctrica que se demande. Al igual que con los usos térmicos, los paneles fotovoltaicos requieren para su disposición un espacio exterior libre de sombras, junto a una orientación adecuada lo más perpendicular posible a los rayos solares.

### **1.1.3 Energía eólica**

A través de la energía eólica o del viento es posible obtener electricidad mediante la transformación mecánica que se produce en una máquina llamada aerogenerador: El proceso es idéntico al de las pequeñas dinamo que se disponen en las ruedas de las bicicletas para poder iluminar. Los aerogeneradores o molinos se encuentran entre las máquinas más antiguas para aprovechar la fuerza del viento, con usos diferentes al de obtener electricidad, tales como sistemas de bombeo directo de agua, molienda de grano, etc.

### **1.1.4 Energía hidráulica**

El agua evaporada por la acción del sol, que cae de nuevo a la tierra en forma de precipitaciones, al acumularse, adquiere cierta energía que es liberada al fluir por los cauces y descender de un nivel superior a un nivel inferior, produciendo energía cinética. Las centrales hidroeléctricas funcionan convirtiendo esta energía cinética (de movimiento) y potencial (de altura) de una masa de agua al pasar por un desnivel o salto, en energía eléctrica. El agua mueve una turbina cuyo movimiento de rotación es transferido mediante un eje a un generador de electricidad.

### **1.1.5 Energía mareomotriz y de las olas**

Consistente en aprovechar la energía de la masa de agua marina para la producción eléctrica con turbinas de manera análoga a la hidroeléctrica. En particular, hay zonas donde las mareas mueven masas importantes de agua generando enormes desniveles diarios con la gran cantidad de energía mecánica generada que ello supone. Este aprovechamiento energético está aún por explotar. Los expertos calculan que las mareas podrían aportar unos 635.000 GW/h (Gigavatios/hora) anuales, equivalentes a unos 1.045.000.000 barriles de petróleo ó 392.000.000 toneladas de carbón al año [2]. La formula más habitual de aprovecharla consiste en separar un estuario del mar mediante un dique y aprovechar la diferencia de nivel que se produce con las mareas. Es importante,

en este caso, evitar las afecciones al litoral o al curso de los ríos que pueden suponer embalsar el agua.

### **1.1.6 Energía geotérmica**

Del calor del interior de la tierra se puede generar también energía tanto para calentar agua, convertirla en vapor, mover con ella una turbina y producir electricidad, como para usar directamente el agua caliente en aplicaciones que la requieran o para calefacción por distritos. Para obtenerla, se puede perforar la corteza terrestre o bien aprovechar el agua ya caliente procedente de un manantial subterráneo. Actualmente, en unos 176 países se genera electricidad a partir de energía geotérmica, fundamentalmente en zonas volcánicas, por ejemplo en Islandia donde es considerada uno de los recursos de vital importancia. En Italia, en Nueva Zelanda, Indonesia y Canadá esta energía apoya el consumo tradicional. En Japón se espera producir este año cerca de 100MW, y en Filipinas, 2.000 MW. La energía geotérmica tiene varias ventajas: a diferencia con la energía mareomotriz y otras renovables el flujo de producción de energía es constante a lo largo del año ya que no depende de variaciones estacionales como lluvias, caudales de ríos, etc. Es un complemento ideal a otros sistemas, el tamaño de planta es relativamente pequeño y no se afecta al entorno con emisiones o alteraciones.

### **1.1.7 Energía de la biomasa**

Se denomina así a la energía obtenida por la combustión de residuos de tipo orgánico para la obtención tanto de energía térmica como eléctrica. Sus usos incluyen a diferentes sectores: residencial, agropecuario, industrial, servicios, etc. También se engloba en este grupo a los denominados biocarburantes obtenidos de múltiples vías como la recuperación de aceites vegetales usados (fritos) para fabricar biodiesel o los llamados cultivos energéticos, que se barajan como una posibilidad futura de gran interés para la sustitución progresiva de los actuales combustibles convencionales en el sector del transporte y la movilidad. También está el bioetanol como combustible al que se está dedicando atención como sustitutivo de las actuales gasolinas para el transporte y la movilidad.

Aunque se trata de una combustión y por tanto de la liberación de CO<sub>2</sub> en el proceso, al tratarse de residuos vegetales, sus tejidos (ramas, hojas, frutos, etc) absorben CO<sub>2</sub> de la atmósfera y el ciclo de dicho gas tiene unas emisiones netas al ambiente que se consideran contrarrestadas a diferencia de las de los combustibles fósiles.

Ejemplo de algunos residuos utilizados como biocombustibles son: leña, ramas, serrines, cortezas, algodón, bagazo, orujo de uva, hueso de aceituna, orujillo del aceituna, cáscara de almendra, cáscara de piñón, paja de cereales, etc.

## **1.2 BIOCOMBUSTIBLES**

Los combustibles fósiles son recursos no renovables por lo cual, es probable que en algún momento se agoten y sea necesario disponer de millones de años para su regeneración, debido a esto se ha despertado un gran interés en la búsqueda de alternativas y se han realizado numerosos estudios para determinar la viabilidad y disponibilidad de la aplicación de biocombustibles en su reemplazo.

Son muchas las ventajas de los biocombustibles con respecto a otras energías, como la menor contaminación ambiental, la sustentabilidad de los mismos y las oportunidades para sectores rurales. Desde este punto de vista los gobiernos se proponen disminuir su dependencia de los combustibles fósiles y así lograr mayor seguridad energética.

Los biocombustibles se obtienen de la biomasa, de toda sustancia orgánica renovable de origen animal o vegetal y/o de sus desechos metabólicos. Los biocombustibles más usados y desarrollados son el bioetanol y el biodiesel. Sin embargo existen otros biocombustibles tales como el biopropanol y biobutanol que son menos populares, pero que no pierden su importancia en su desarrollo e investigación científica y tecnológica, debido al alto precio de los combustibles fósiles y de su eventual declive.

En comparación con otras energías alternativas, como la proporcionada por el hidrógeno, el reemplazo de los combustibles fósiles por biocombustibles en el sector del transporte por carretera puede ser realizado con menores costos, debido a que no se requieren grandes cambios en la tecnología de los motores actualmente utilizados ni tampoco en el sistema de distribución. Utilizar otro tipo de energía, como la obtenida a través del hidrógeno, que se basa en una tecnología totalmente distinta, requeriría grandes cambios en el tema de capital. Esto no implica que se deban descartar nuevas fuentes de energía, sino que los biocombustibles serán los que tendrán más crecimiento en el corto plazo.

### 1.2.1 Clases de biocombustibles

Las fuentes de bioenergía presentan bajos niveles de emisiones de gas de efecto invernadero en comparación con las fuentes de energía fósil. La bioenergía puede producirse a partir de los biocombustibles sólidos como la leña, el carbón o los residuos agrícolas (que pueden quemarse directamente o gasificarse para producir calor y electricidad), los cultivos energéticos (como la caña de azúcar y plantas oleaginosas de las que se pueden producir combustibles líquidos como el bioetanol y el biodiesel), y de los residuos municipales, industriales y pecuarios (de los que pueden obtenerse combustibles gaseosos como el biogás).

- La biomasa tradicional es utilizada en países subdesarrollados, principalmente en zonas rurales. Esta energía es neutra en emisiones de CO<sub>2</sub> (utiliza fotosíntesis reciente), pero tiene elevados costos ambientales, sanitarios y económicos.
- Con respecto a la biomasa para generar electricidad, este sistema es utilizado en países industrializados con elevados recursos forestales, que utilizan madera para generar electricidad.
- Los biocombustibles líquidos proporcionan actualmente aproximadamente la energía equivalente a 20 millones de toneladas de petróleo (lo que equivale al 1% del combustible utilizado mundialmente para transporte por carretera) [56].

Como se mencionó anteriormente, los biocombustibles más usados y desarrollados en la actualidad son el bioetanol y el biodiesel.

- El bioetanol, también llamado etanol de biomasa, se obtiene a partir de maíz, sorgo, caña de azúcar, remolacha o de algunos cereales como trigo o cebada. En 2006, Estados Unidos, fue el principal productor de bioetanol (36% de la producción mundial), Brasil representa el 33,3%, China el 7,5%, la India el 3,7%, Francia el 1,9% y Alemania el 1,5%. La producción total de 2006 alcanzó 55 mil millones de Litros.
- El biodiesel, se fabrica a partir de aceites vegetales, usados o sin usar. En este último caso se suele usar, canola, soja, jatrofa, los cuales son cultivados para este propósito. El principal productor de biodiesel en el mundo es Alemania, que concentra el 63% de la producción. Le sigue Francia con el 17%, Estados Unidos con el 10%, Italia con el 7% y Austria con el 3%.

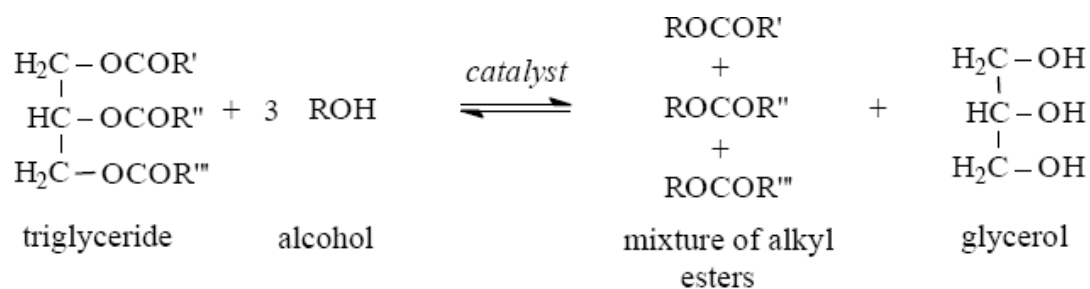
El uso directo de los aceites vegetales puros en los motores de encendido por compresión (ciclo diésel) es posible pero no viable, debido a que para ello se requiere realizar algunas modificaciones a los motores actuales. Con base en lo anterior, resulta más conveniente transformar los aceites crudos mediante un proceso de transesterificación que permita su utilización directa como combustible en un motor diésel, sin modificarlo.

### 1.3 BIODIESEL

Desde el punto de vista químico el biodiesel es una mezcla de los ésteres metílicos de los ácidos grasos triglicéridos de los aceites vegetales y/o grasas animales empleados como materia prima. [3]

Los principales componentes de los aceites vegetales y de las grasas animales son los triglicéridos; químicamente los triglicéridos son ésteres de ácidos grasos con glicerol. Los triglicéridos de los aceites vegetales y de las grasas animales, están conformados por numerosos ácidos grasos en diferentes proporciones. Los ácidos grasos tienen diferentes propiedades físicas y químicas que dependen de las propiedades de los aceites vegetales y de las grasas animales de donde provienen.

Para la obtención del biodiesel, los aceites vegetales y/o las grasas animales son sometidos a una reacción química llamada transesterificación, en esta reacción los aceites vegetales y las grasas animales reaccionan en presencia de un catalizador (generalmente una base), con alcohol para dar los correspondientes alquil ésteres, que provienen de la mezcla de ácidos grasos que se encuentran en la materia prima de los aceites vegetales y de las grasas animales utilizadas en el proceso.



Fuente: Transesterification of Vegetable oils: a review [4]

**Figura 1.** Reacción de transesterificación

El biodiesel es miscible con el petrodiesel en todas las proporciones; de hecho muchos países han liderado el uso de mezclas de biodiesel con el petrodiesel; sin embargo es importante aclarar que esas mezclas no pueden ser llamadas biodiesel. Generalmente las mezclas con petrodiesel son denotadas con siglas tales como B20, la cual indica una mezcla del 20% de biodiesel con 80% de petrodiesel. Otras notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: **B100** en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como **B5**, **B15**, **B30** o **B50**, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla [4].

El metanol es el principal alcohol usado en la producción de biodiesel debido a su menor costo, aunque otros alcoholes tales como el etanol o el iso-propanol pueden tener un mejor rendimiento en la producción de biodiesel y otorgarle mejores propiedades como combustible. A menudo el biodiesel también puede ser llamado como ácido graso de metil éster (FAME, por sus siglas en ingles).

La principal razón para que los aceites vegetales y las grasas animales deban ser sometidos a la reacción de transesterificación para producir alquil ésteres (biodiesel), es debido a la viscosidad cinemática del biodiesel, la cual es mucho mas cercana a la del petrodiesel. Por otra parte la alta viscosidad de los aceites vegetales y de las grasas sin trans-esterificar conlleva a problemas operacionales en los motores diésel, tales como la generación de depósitos en las partes del motor.

El biodiesel descompone el caucho natural, por lo que es necesario sustituir éste por elastómeros sintéticos en caso de utilizar mezclas de combustible con alto contenido de biodiesel.

#### **1.4 HISTORIA DEL BODIESEL [5]**

El uso de los biocombustibles líquidos es tan antiguo, como el de los combustibles de origen fósil y los motores de combustión. El uso por primera vez de aceites vegetales como combustibles, se remontan al año de 1900, siendo Rudolph Diesel, quien lo utilizara por primera vez en su motor de ignición - compresión y quien predijera el uso futuro de biocombustibles. Sin embargo cuando el petróleo irrumpió en el mercado se caracterizó por ser barato, razonablemente eficiente y de fácil disponibilidad. De hecho, uno de sus derivados principales fue llamado como "gasóleo", el cuál rápidamente se convirtió en el combustible más utilizado en el motor diésel.

De igual manera, cuando Henry Ford presentó su primer diseño de su automóvil Model T en 1908, esperaba utilizar el etanol como combustible. De hecho de 1920

a 1924 la Standard Oil Company comercializó un 25 % de etanol en la gasolina vendida en el área de Baltimore. Sin embargo, los elevados precios del maíz, junto con las dificultades de almacenamiento y transporte, hicieron abandonar el proyecto. A finales de la década de los veinte y durante la década de los treinta, se hicieron esfuerzos para recuperar sin éxito esta iniciativa. A raíz de esta decaída en la utilización del etanol, Henry Ford y diversos expertos unieron fuerzas para promover su recuperación. Se construyó una planta de fermentación en Atchinson (Kansas) con un potencial para fabricar 38.000 litros diarios de etanol para automoción. Durante los años treinta, más de 2.000 estaciones de servicio en el Medio Oeste vendieron este etanol hecho de maíz que denominaron "gasoil". No obstante eso, la competencia de los bajos precios del petróleo obligó al cierre de la planta de producción de etanol a mediados de los años cuarenta. Como consecuencia, se acabó el negocio de los granjeros americanos y el gasoil fue sustituido definitivamente por el petróleo.

Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en Brasil, sobre diésel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, en el que el biodiésel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que sucedía en el momento y al elevado costo del petróleo.

Las primeras pruebas técnicas con biodiésel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero solo hasta el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed Methyl Ester - metil éster del aceite de semilla de colza).

Las crisis energéticas que sacudieron el siglo XX y la preocupación mundial por la conservación del medio ambiente, fueron el motor estimulador para la búsqueda de nuevas fuentes energéticas. En la actualidad, el modelo energético está basado principalmente en el uso de energías no renovables como es el caso del uso de combustibles fósiles; sin embargo en los últimos años debido a diferentes razones como el precio del petróleo, la disminución de sus reservas y la dificultad en su producción han dado como resultado la desestabilización del modelo.

En otros momentos de la historia incidentes, no menos contundentes o dramáticos que la caída de las Torres Gemelas neoyorquinas, han provocado crisis energéticas mundiales. Octubre de 1973 pasó a la historia por la aparición de una fuerte crisis del petróleo asociada a la cuarta guerra árabe-israelí. Durante este mes, el precio de la gasolina, que se había mantenido prácticamente constante durante cinco años en los países industrializados, se dobló en cuestión de tres meses. El mundo desarrollado entero se resintió y los sectores más radicales

comenzaron a defender el ataque militar en los países árabes para defender sus intereses. La escasez de este recurso no renovable hizo peligrar el suministro y este hecho provocó la búsqueda de combustibles alternativos a los derivados del petróleo [6].

A finales de 1979, a raíz de la preocupación que desencadenó la primera crisis del petróleo, se comercializó en EUA la mezcla de gasolina y etanol. Los combustibles alternativos se convirtieron en la solución al posible problema que representaba el agotamiento de los recursos no renovables. Así, la American Oil Company y otras empresas abanderadas en el sector comenzaron a comercializar la mezcla de etanol para diluir la gasolina y aumentar el octanaje. En Brasil, la crisis del petróleo también tuvo una fuerte repercusión. En este país, en el año 1975 se encauzó el proyecto Proalcool, cuyo objetivo era la sustitución total de los combustibles de origen fósil. La alternativa propuesta era el bioetanol proveniente de la melaza de la caña de azúcar. Esta nueva industria permitió la creación de casi un millón de lugares de trabajo, repartidos en más de 700 destilerías, en instalaciones complementarias, en redes de transporte y fabricación de motores específicos para estos combustibles, etc.

La aparición de una segunda crisis del petróleo relacionada con el principio de la guerra irano-iraquí a principios de la década de los ochenta provocó una nueva caída en el consumo de petróleo. La extracción de este combustible experimentó un importante descenso antes de recuperarse a finales de la década gracias al bajo precio del crudo. Esto provocó el abandono de las estrategias de cambio energético encauzadas hacía ya unos años. La década de los noventa comenzó con una nueva crisis. Esta vez derivada de la invasión de Kuwait por Irak. Nuevamente, el precio del petróleo se volvió inestable y caro y los biocombustibles volvieron a la escena energética de la mayoría de los países.

Algunas de las medidas adoptadas en su momento fueron por ejemplo las que en el año 1985 planteaban la introducción de los biocombustibles en Europa. El objetivo era sustituir el 25 % del combustible fósil por bioetanol. Su aplicación no se aprobó por cuestiones de rentabilidad y costo. Sin embargo, se dedicaron sustanciosos fondos para la investigación y desarrollo de estas tecnologías.

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles.

El biodiesel puro es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilice en la transesterificación.

En Europa, es producido principalmente a partir del aceite de la semilla de canola (también conocida como colza o rapeseed) y el metanol, denominado comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas diésel puro o mezclado con aceite diésel, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%, generalmente. En Alemania y Austria se usa puro para máximo beneficio ambiental [7].

Además de la colza, en los últimos años se ha producido biodiesel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en Malasia para la producción de biodiesel PME y PEE (Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester). La siguiente tabla muestra los principales países del mundo productores de Biodiesel:

País	Producción (Millones de Galón / año 2006)
Alemania	507
Francia	147
Estados Unidos	75
Italia	60
República Checa	36
Austria	22
España	22
Dinamarca	21
Polonia	21
Reino Unido	20
Brasil	18
Australia	15
Suecia	2
Otros Países	27
<b>Total</b>	<b>994</b>

Fuente: Recopilada por Earth Policy Institute de F.O Licht datos citados por Suzanne Hunt y Peter Stair, "Biofuels Hit a Gusher," **Vital Signs 2006-2007**

**Tabla 1.** Principales Países Productores de Biodiesel

## 1.5 MATERIAS PRIMAS

El biodiesel puede ser producido a partir de una gran variedad de fuentes naturales, primordialmente de los aceites vegetales, entre los más comunes están: aceite de soya, de palma africana, de semillas de algodón, de maní, de girasol, de coco, de semillas de colza, de higuera, etc. De igual manera el biodiesel se puede producir a base de las grasas animales (sebo) como también de los aceites de cocina gastados. La elección de la fuente de suministro para producir biodiesel depende en gran medida de la geografía, debido a que no en todas las regiones se pueden cultivar las mismas plantas para la producción de aceites vegetales.

El biodiesel tiene una serie de ventajas respecto del diésel derivado de petróleo, pero la principal razón para su utilización es el hecho de que presenta un impacto ambiental mucho menor que los derivados del petróleo. Al ser producido a partir de aceites vegetales o grasas de cualquier origen, es decir, recursos renovables, produce una ventaja neta en lo que se refiere al ciclo de carbono, no produciendo acumulación del mismo en el ambiente.

El contenido de azufre en las mezclas de biodiesel con petrodiesel es usualmente menor a las 11 ppm. En un diésel regular el contenido de azufre está alrededor de 1600 ppm, mientras que para un diésel de bajo azufre en 500 ppm y para el ultra-bajo azufre es de 50ppm.

Sin embargo, los costos asociados a este nivel de purificación son elevados, por lo que para lograrlos, la alternativa de aditar el diésel con biodiesel se vuelve una necesidad. Adicionalmente, el biodiesel presenta una gran lubricidad que extiende la vida útil del motor, no es tóxico, y es fácilmente biodegradable.

La producción de biodiesel utilizando materiales de alta acidez, y por tanto menor valor, requiere la puesta a punto de un proceso con dos pasos de catálisis, una catalizada ácida, y otra por álcalis. La acidez de estos materiales viene dada por ácidos grasos libres, que en presencia de una base y agua se transforman en jabones. Por este motivo, este tipo de materia prima no puede ser reaccionada en la forma clásica (catálisis alcalina) con altos rendimientos.

La utilización de aceites usados de cocina presenta como ventajas el hecho de aprovechar residuos, que por tanto son de muy bajo valor [4 y 7]. Los estudios reportados en la bibliografía para el aprovechamiento de estos materiales, se centran en aceites de baja acidez. También existen trabajos usando grasas animales [7 y 4], pero en todos los casos de baja acidez.

En los casos en que se reportan estudios usando catálisis ácida, se realizan con el objeto de transformar tanto los ácidos grasos como los triglicéridos [4]. Estos últimos, sin embargo, reaccionan muy lentamente con el metanol en presencia de un ácido, por lo que en general no se han implementado procesos a nivel industrial con este tipo de catálisis.

Las materias primas para la producción de biodiesel se clasifican según su contenido de ácidos grasos libres tal como se describe a continuación:

- 1 Aceites refinados, tales como soja o colza, refinados de petróleo (FFA <1,5%)
- 2 Con bajo contenido de ácidos grasos libres: grasas animales y grasas vegetales (FFA <4%)
- 3 Con alto contenido de ácidos grasos libres: grasas de origen animal (FFA ≥ 20%)

### 1.5.1 ACEITES Y GRASAS

Como se mencionó anteriormente, la producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas. Sin embargo, cualquier materia que contenga triglicéridos puede utilizarse para la producción de biodiésel (girasol, colza, soja, aceites de fritura usado, sebo de vaca, grasa de pollo y de pescado, etc).

En términos generales, para la producción del biodiesel se pueden usar todos los aceites que provengan de las plantas y algas oleaginosas, por lo que la elección de éste se basa exclusivamente en la capacidad de cultivo y su costo, sin embargo ciertos tipos de aceites tienen un mayor rendimiento que otros. Los litros de Biodiesel que se obtienen por hectárea, dependerán del cultivo que da origen al aceite vegetal así:

MATERIA PRIMA		LITROS
SOJA	(Glicine max)	420
ARROZ	(Oriza sativa)	770
TUNG	(Aleurites fordii)	880
GIRASOL	(Helianthus annuus)	890
MANÍ	(Arachis hipogaea)	990

COLZA	(Brassica napus)	1100
RICINO	(Ricinus communis)	1320
JATROPA	(Jatropha curcas)	1590
AGUACATE	(Persea americana)	2460
COCO	(Cocos nucifera)	2510
COCOTERO	(Acrocomia aculeata)	4200
PALMA	(Elaeis guineensis)	5550

Fuente: SAGPYA, en base a "Biodiesel: El pasado del futuro" por Eugenio F. Corradini.

**Tabla 2.** Aceite vegetal a partir de diferentes cultivos.

Además de los aceites vegetales también es posible obtener biodiesel a partir de grasa animal. La grasa animal (ganado, sebo vacuno, manteca de cerdo) empleada es barata y constituye un residuo graso sin ningún otro uso, con lo que su transformación en biodiesel presenta beneficios medioambientales y reduce la dependencia de otras materias agrícolas convencionales. Las grasas animales tienen propiedades diferentes de flujo en frío, lo cual representa una desventaja debido a que se requiere de un tratamiento adicional para producir un biodiesel aceptable.

Un tipo de residuo proveniente de la materia prima, es la grasa amarilla la cual contiene grandes cantidades de ácidos libres que son liberados durante el proceso de cocción, su concentración puede oscilar entre un 2% y un 20% aproximadamente.

### 1.5.2 Alcohol

El más utilizado en la producción de biodiesel es el metanol, aunque otros alcoholes, como el etanol, isopropanol, y butilo, se pueden utilizar. Un elemento clave en factor de calidad en el alcohol primario es el contenido de agua ya que esta interfiere con las reacciones de transesterificación y puede resultar en bajos rendimientos y altos niveles de jabón, ácidos grasos libres y triglicéridos en el combustible final. Lamentablemente, todos los alcoholes son higroscópicos, por lo que absorben agua del ambiente.

Otras cuestiones tales como el costo del alcohol, la cantidad de alcohol necesaria para la reacción, la facilidad de recuperación y el reciclado del alcohol combustible, créditos fiscales, y el calentamiento global son cuestiones que

influyen en la elección del alcohol. Algunos alcoholes también pueden requerir alguna ligera modificación técnica en el proceso de producción tal como altas temperaturas de operación, tiempos de mezcla más largos o lentos, o menores velocidades de mezcla.

Dado que la reacción para formar ésteres esta en base molar y la compra de alcohol se realiza en base volumétrica, sus propiedades hacen una diferencia significativa en el precio de las materias primas. Se requieren tres moles de alcohol para reaccionar completamente con un mol de triglicéridos. Hoy en día, un galón de metanol cuesta U\$ 0,61. Un galón contiene 93,56 gramos-moles de metanol, a un costo de U\$ 0,00652 por gramo/mol. Por el contrario, un galón de etanol cuesta U\$ 1,45 dólares por galón, para combustible de grado etanol cuesta \$ 0,02237 por gramo-mol, 3 ó 4 veces más [13].

La base de un proceso catalítico normalmente utiliza una relación de operación de 6:1 moles de alcohol en lugar de la relación 3:1 exigida por la reacción. La razón para el uso de alcohol extra es que "impulsa" la reacción más cercana a un rendimiento de 99,7% que se requiere para satisfacer el glicerol estándar total de grado combustible biodiesel.

El alcohol no utilizado debe ser recuperado y reciclado al proceso para reducir los costos de operación y minimizar el impacto ambiental. El metanol es considerablemente más fácil de recuperar que el etanol. El etanol constituye un azeotropo con el agua por lo que es caro y difícil de purificar durante su recuperación. Si el agua no se retira interfiere con las reacciones.

A diferencia del etanol, es mucho más fácil reciclar el metanol porque no forma un azeótropo. Estos dos factores son la razón por la que aunque el metanol es más tóxico, es el preferido para la producción de biodiesel. El metanol tiene un punto de inflamación de 10 °C, mientras que el punto de inflamación de etanol es de 8 °C, por lo tanto se consideran altamente inflamables.

### **1.5.3 Catalizadores y neutralizadores**

Los catalizadores pueden ser materiales básicos, ácidos, o enzimas. Los más utilizados para la conversión de triglicéridos a biodiesel son el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y metóxido de sodio. La mayoría de los sistemas de catalizadores básicos usan aceites vegetales como materia prima. Si el aceite vegetal es crudo, contiene pequeñas cantidades de ácidos grasos libres (<2%), que forman jabones que terminarán en la glicerina cruda. Las materias primas refinadas, como el aceite de soja refinado también puede ser usado con catalizadores básicos. Los catalizadores básicos son altamente higroscópicos y

forman agua cuando se disuelven en el alcohol reactivo; sin embargo también absorben el agua del medio ambiente durante su almacenamiento. Si el catalizador ha absorbido demasiada agua el biodiesel no podrá satisfacer el total de glicerina estándar.

Por otra parte aunque los catalizadores ácidos pueden ser utilizados en el proceso de transesterificación son generalmente considerados como demasiado lentos para la transformación industrial. Los catalizadores ácidos más utilizados para la esterificación de los ácidos grasos libres son ácido sulfúrico y ácido fosfórico.

El catalizador ácido se mezcla con metanol y esta mezcla se añade a la de ácidos grasos libres ó a una materia prima que contenga altos niveles de ácidos grasos libres; los cuales más adelante formarán el biodiesel. Los neutralizadores son usados para remover los catalizadores ácidos o básicos del biodiesel y el glicerol. Si se están usando catalizadores ácidos el neutralizador es un catalizador básico y viceversa [13].

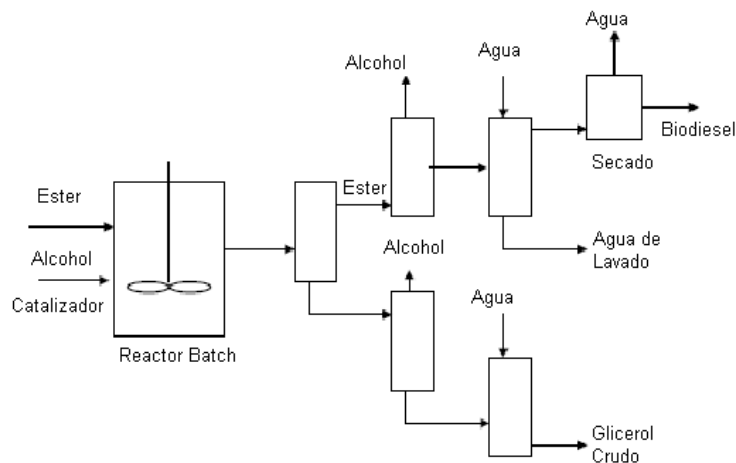
## **1.6 PRODUCCION DE BIODIESEL**

### **1.6.1 Proceso por lotes (batch)**

El método más simple para producir ésteres de alcohol es por cochadas o batch, utilizando un reactor con agitación. El reactor puede ser equipado con un condensador de reflujo y la temperatura de operación esta alrededor de 65°C, aunque se han reportado temperaturas desde los 25°C a los 85°C. Los catalizadores más utilizados son el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio. [5]

Inicialmente se requiere homogenizar bien la mezcla para que el aceite, el catalizador y el alcohol tengan un íntimo contacto. Hacia el final de la reacción, se disminuye el mezclado con el fin de favorecer la reacción permitiendo la separación del glicerol, del ester con conversiones entre 85 – 94%.

En algunos casos la reacción se da en varias etapas, removiendo el glicerol, con el fin de incrementar la conversión hasta 95%. Relaciones de altas temperatura y de alcohol también pueden aumentar el porcentaje de conversión. Generalmente los tiempos de reacción están entre 20 minutos y una hora. La Figura 2 muestra un diagrama de flujo del proceso para un sistema típico por lotes.



**Figura 2.** Sistema Batch para producción de Biodiésel

Para la grasa amarilla y grasas de origen animal, el sistema se modifica ligeramente con la adición de una etapa de esterificación ácida y un sistema para el almacenamiento del catalizador ácido. La materia prima a veces se seca (hasta menos del 0,4% de agua) y se filtra antes de cargarse al tanque de esterificación ácida. El ácido sulfúrico se mezcla con el metanol y se añade al tanque agitado empleando temperaturas similares a las empleadas durante la transesterificación.

Durante este proceso no se produce Glicerol. Si se realizan dos etapas de tratamiento con ácido, el sistema deja de agitarse hasta que la fase de metanol se separa y se elimina, luego se añaden nuevamente metanol y ácido sulfúrico frescos y se inicia la agitación.

Una vez que la conversión de los ácidos grasos hacia ésteres metílicos ha alcanzado el equilibrio, la mezcla metanol / agua / ácido se elimina. El resto de la mezcla se neutraliza o se envían directamente a transesterificación, donde se neutraliza con exceso de catalizador básico. Cualquier resto de ácido graso libre se convertirá en jabón durante la etapa de la transesterificación.

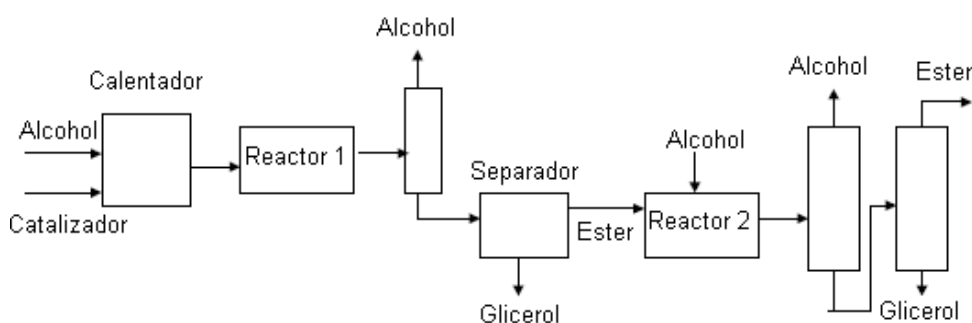
El proceso por cochadas proporciona excelentes oportunidades para el control de calidad en caso de variaciones de materia prima de calidad comunes, tales como grasa amarilla y de grasas de origen animal.

### 1.6.2 Proceso continuo

La obtención del biodiésel a partir de aceites vegetales se puede realizar mediante un proceso continuo, el cual es una variación del proceso discontinuo, que consiste en la utilización continua de dos o más reactores de tanque agitado

(CSTR) en serie. En algunas ocasiones el primer reactor CSTR puede variar su volumen con respecto al segundo, proporcionando un mayor tiempo de residencia con el fin de lograr un mayor grado de reacción y de esta manera agilizar la reacción en el segundo CSTR.

Un elemento esencial en el diseño de un CSTR es el de garantizar una excelente mezcla a la entrada del reactor para mantener constante la composición en todo el reactor. Esto tiene un efecto en el aumento de la dispersión del glicerol en la fase éster y el resultado es que el tiempo requerido para la fase de separación se extienda. En la figura 3 se presenta un diagrama de flujo típico de un sistema continuo en la obtención de biodiesel.



**Figura 3.** Sistema Continuo para producción de biodiesel

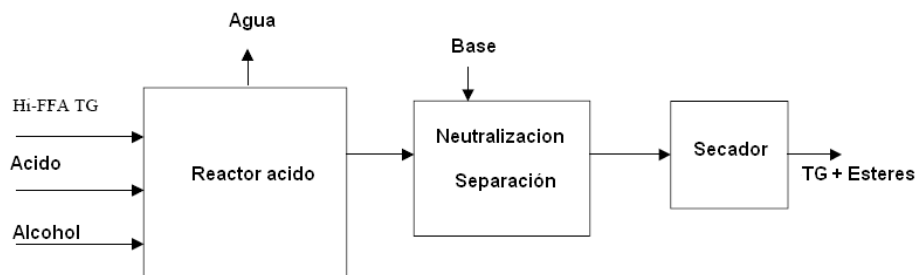
### 1.6.3 Sistema para cargas con alto contenido de ácidos grasos libres

Las cargas con altos contenidos de ácidos grasos libres en sistemas de catálisis básica, reaccionan con los catalizadores básicos formando jabones; por esta razón la carga máxima de ácidos grasos libres aceptada debe ser menor al 2% y preferiblemente menor al 1%. Algunas maneras para poder utilizar cargas con altos contenidos de ácidos grasos, es aplicar el concepto de refinación, en donde se retiran los ácidos grasos de la carga mediante un tratamiento de separación en una unidad de esterificación acida, en donde la soda cáustica se añade a la materia prima con el fin de que los jabones que se formen puedan ser despojados por centrifugación, aunque algunos triglicéridos se pierden con el jabón durante esta separación. Este proceso se llama separación cáustica.

La mezcla de jabón puede ser acidulada y así recuperar los ácidos grasos y los aceites perdidos en la etapa de separación con el fin de recuperarlos y reprocesarlos nuevamente. Los aceites refinados son secados y enviados a la unidad de transesterificación para su posterior procesamiento.

En lugar de eliminar los residuos de ácidos grasos libres, estos pueden ser transformados en ésteres metílicos mediante un proceso de esterificación ácida. Como se ha descrito anteriormente, el proceso de catálisis ácida puede ser utilizado para la esterificación directa de cargas con altos contenido de ácidos grasos libres, tales como las materias primas baratas, sebo o grasa amarilla. El estándar para el sebo y la grasa amarilla es  $\leq 15$  por ciento FFA. La esterificación acida directa sobre los ácidos grasos libres exige la eliminación de agua durante la reacción, de lo contrario la reacción se enfría prematuramente.

De igual forma, se requiere una relación alta entre alcohol y los ácidos grasos libres (FFA) usualmente entre 20:1 y 40:1, durante la producción de biodiesel, con el fin de asegurar que la grasa y el aceite sean convertidos en su totalidad a esteres. Si las grasas no son totalmente convertidas a ésteres y el nivel de ácidos grasos es demasiado alto, por encima de 0.5% a 1%, el jabón que se forma se convierte en una emulsión con el metanol y el petróleo, impidiendo que la reacción tenga lugar y que el biodiesel no se forme. Es por esto que antes de que los aceites se añadan, los ácidos grasos deben ser retirados con el fin de prevenir la formación de emulsiones. En la figura 4 se observa un esquema del proceso.



**Figura 4.** Sistema de procesamiento de cargas con alto FFA

Un procedimiento alternativo para el procesamiento de las cargas con alta FFA es hidrolizar la materia prima en FFA puros y glicerina. Normalmente esto se hace en un reactor usando ácido sulfúrico, ácido sulfónico y vapor obteniendo, aceites grasos libres puros y glicerina. Cualquier contaminante de la materia prima podrá quedar remanente en su mayoría en la glicerina y algunos podrán salir con el vapor de agua y los efluentes, mientras que algunos otros permanecerán en los FFA, pudiendo ser eliminados o permitidos, dependiendo del proceso y las especificaciones del producto. Los FFA puros son luego acidificados en un proceso de esterificación en otro reactor y luego transformarlos en ésteres metílicos, los cuales deben ser neutralizados y secados. El rendimiento de este proceso puede ser del 99%.

#### 1.6.4 Proceso BIOX

Las opciones utilizando co-solventes, están diseñadas para minimizar el tiempo de reacción provocada por la baja solubilidad del alcohol en el aceite (triglicéridos) con lo cual la reacción se lleva a cabo en una sola fase. La reacción es muy rápida y el proceso de obtención a escala industrial es continuo. En este proceso se utiliza un co-solvente llamado tetrahidrofurano, para solubilizar el metanol. El resultado es una rápida reacción, del orden de 5 a 10 minutos, sin residuos de catalizador, ya sea en la fase éster o de glicerol. El co-solvente de tetrahidrofurano (THF) es elegido en parte porque tiene un punto de ebullición muy próximo al del metanol. Una vez la reacción se completa, el exceso de metanol y el tetrahidrofurano se recuperan en un solo paso. Este sistema puede trabajar con una gran variedad de aceites vegetales, así como con metanol o etanol o inclusive mezcla de dichos alcoholes. Se logran conversiones del 99% que utilizan relaciones de alcohol / aceite en el rango de 15:1 a 35:1 y temperaturas entre 15 y 65 ° C. Existen otros co-solventes como: 1,4 dioxano, dietil éter, metil ter-butíl éter (MTBE) y disopropil éter.

La fase de separación éster - glicerol es limpia y los productos finales están libres de catalizador y agua. El volumen dentro del equipo debe ser mayor para la misma cantidad de producto final a causa del volumen adicional del co-solvente. El proceso Biox se representa en la Figura 5. Aquellos co-solventes que resulten peligrosos y / o tóxicos según la lista de la EPA para contaminantes del aire requieren una prueba especial de fugas dentro de los equipos. Las emisiones fugitivas son estrictamente controladas y el co-solvente debe ser completamente eliminado de la glicerina, así como del biodiesel.

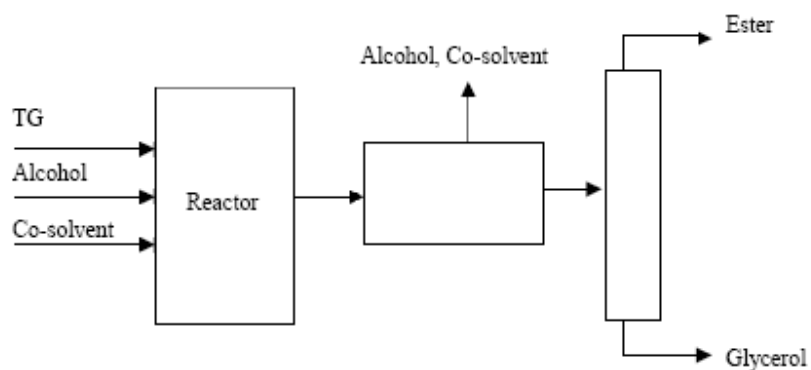


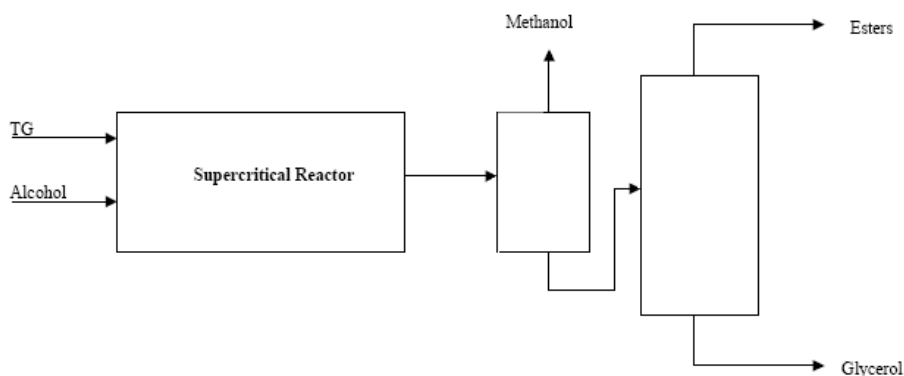
Figura 5. Sistema de procesamiento BIOX

#### 1.6.5 Proceso supercrítico – sistema sin catalizador

Cuando un líquido o gas es sometido a temperaturas y presiones por encima de su punto crítico, se evidencian un gran número de propiedades inusuales. No hay diferenciación entre la fase líquida y vapor pero se evidencia una sola fase líquida presente. Algunos disolventes que contienen un grupo hidroxilo (OH), tales como el agua o alcoholes primarios, presentan estas propiedades de los súper-ácidos.

Una aproximación para obviar el uso de catalizadores es trabajar a altas relaciones alcohol/petróleo (42:1). Bajo condiciones supercríticas; es decir, (350 a 400 °C y a presiones mayores a 80 atm o 1200 psi), la reacción se completa en aproximadamente 4 minutos. Una de las principales desventajas es que el capital y los costos de funcionamiento pueden ser mayores, y el consumo de energía superior. Un ejemplo interesante de este proceso se ha demostrado en Japón, donde los aceites son puestos en contacto con un gran exceso de metanol a muy altas temperaturas y presiones durante un corto período de tiempo. El resultado es muy rápido de 3 a 5 minutos de reacción, para formar ésteres y glicerol. La reacción debe enfriarse rápidamente a fin de que los productos no se descompongan.

La producción a escala piloto, utiliza un reactor de 5 ml de una botella que se deja caer en un baño de metal fundido y a continuación es templado en agua. Es evidente que si bien los resultados son muy interesantes, la producción a escala con miras a un proceso útil puede ser bastante costosa. La Figura 6 muestra una concepción de una configuración para un proceso supercrítico de esterificación.



**Figura 6. Proceso Supercrítico**

Generalmente, la calidad del glicerol producido y su valor como co-producto es una importante variable económica. La cantidad usual de glicerol o glicerina que se produce como co-producto en una planta de biodiesel es de alrededor del 10% y éste se caracteriza porque contiene agua, sales, metanol y metil ésteres; la glicerina producida tiene una calidad del 50% y puede ser comercializada como glicerina cruda por un valor menor a los 5 centavos por libra. Al eliminar el agua y

el metanol se obtiene que el contenido de glicerol puede aumentar a un 88% de concentración, el cual es más rentable y genera una ganancia basada en el costo del glicerol bruto.

El objetivo de todas las tecnologías para producir biodiesel es cumplir con la norma ASTM PS 121 que implica la completa (o casi completa) remoción del alcohol, catalizador, agua, jabones, glicerina, y triglicéridos que no reaccionaron junto con los ácidos grasos libres. El hecho de no eliminar o reducir al mínimo estos contaminantes hace que el metil éster producido no cumpla con una o más normas de calidad para el biodiesel [5 y 13].

El problema más común es la presencia de altos niveles de triglicéridos y glicerina que no hayan reaccionado lo que aumenta la viscosidad, y puede conducir a daños del motor. Sólo ésteres metílicos que cumplan con la norma ASTM PS 121 se consideran "biodiesel".

## **1.7 POLÍTICAS DE DESARROLLO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES**

Diversos países promueven el desarrollo de la producción de biocombustibles mediante subsidios u otras políticas, o han incorporado en su legislación metas de sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles.

La Unión Europea proyecta mezclar todo su gasoil con un 5.7% de biodiesel en el año 2010. Estados Unidos planea reemplazar el 20% de su consumo de petróleo en diez años, utilizando etanol. Brasil fue un pionero en la utilización de biocombustibles; hace treinta años implementó un plan para reducir la dependencia del petróleo. Ahora tiene excedentes de etanol, producido a partir de la caña de azúcar. Argentina emitió una ley de biocombustibles, que prevé la mezcla obligatoria del 5% en naftas y gasoil para el 2010. Colombia indicó el uso obligatorio de etanol al 10% en cortes con naftas.

Las razones detrás de estas metas de sustitución pueden ser varias, incluyendo cuestiones de seguridad energética y consideraciones técnicas, y no siempre motivos ecológicos. En el caso de la Unión Europea, la legislación ha llevado los límites de contenido de azufre a niveles muy bajos, 50 ppm, lo que ha provocado que los combustibles pierdan capacidad de lubricación. La incorporación del 5% de biodiesel en el gasoil eleva la capacidad de lubricación de los combustibles. En el caso del etanol, su incorporación reduce la contaminación por la menor emisión de anhídrido carbónico perjudicial para la salud. [14]

La matriz energética mundial depende en gran medida de los combustibles fósiles. Según datos de World Energy, más del 80% del consumo de energía primaria mundial se basa en energías no renovables.

A su vez, se espera que las necesidades de energía crezcan en forma sostenida en los próximos 24 años. Hacia el 2030 se estima en un 50% el aumento en la demanda de energía con respecto a la actual. El 65% de este aumento en la demanda energética esperada provendrá de los países en desarrollo, donde el crecimiento económico y de la población es mayor.

Así mismo el incremento en los precios del petróleo, hace que muchos países dependientes de la importación de este combustible estén preocupados por la seguridad en la oferta futura de este recurso. Es así que varios países han implementado o están por implementar políticas referidas al uso de combustibles alternativos y renovables, como son los objetivos de la agro-energía.

Otro de los principales motivos que llevan a promover el uso de energías renovables y limpias es la creciente preocupación y compromiso por preservar el medio ambiente, como lo refleja la Directiva sobre Biocombustibles de la Comisión de la Unión Europea y el programa de combustibles renovables de los EEUU. Así mismo, otros países han profundizado sus programas de energías renovables, como es el caso de Brasil y EE.UU, que producen el 70% del bioetanol del mundo, o han lanzado nuevos programas, como es el caso de Canadá, Colombia, Perú y Argentina, entre otros, con el objetivo de diversificar sus matrices energéticas.

Actualmente, alrededor de 35 países ya han lanzado programas para la promoción de la producción y/o uso de biocombustibles, con miras a volcarlo a sus mercados internos o con miras a la exportación [15].

## **CAPÍTULO II**

### **2. PARAMETROS DE CALIDAD ESTABLECIDOS PARA EL BIODIESEL**

#### **2.1 DESTILACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA [16 y 17]**

El biodiesel tiene un rango de destilación muy estrecho (320° C - 357° C), diferente a lo que sucede con los combustibles fósiles (diésel) que presentan una curva de destilación más amplia (150° C – 400° C). Las cadenas de ácidos grasos en los aceites crudos y grasas a partir de las cuales se produce el biodiesel, son principalmente cadenas rectas de hidrocarburos de 16 a 18 átomos de carbono que tienen temperaturas de ebullición muy cercanas. Como se mencionó anteriormente, el rango de ebullición del biodiesel a presión atmosférica generalmente está entre 320° C y 357° C, por lo cual se estableció el valor de 360° C como especificación para el Punto Final de Ebullición (PFE) de acuerdo con la norma ASTM D86. Con esta especificación se controla la posible contaminación del biodiesel con compuestos de alto punto de ebullición, como los triglicéridos.

#### **2.2 PUNTO DE INFLAMACIÓN (Flash Point)**

El Punto de Inflamación para el biodiesel se utiliza como mecanismo para controlar el contenido de alcohol remanente en el biodiesel terminado. Este parámetro normalmente se controla como medida de seguridad para el manejo y almacenamiento del combustible y se encuentra normalmente especificado en las regulaciones y prácticas para manejo seguro.

La especificación del Punto de Inflamación para el biodiesel, debe ser mínimo de 100°C con valores típicos de 160° C. Debido a la alta variabilidad en el método de ensayo ASTM D93, a medida que se aproxima a 100° C, la especificación del Punto de Inflamación se ha fijado en mínimo 120° C para asegurar un valor real mínimo de 100° C.

## **2.3 VISCOSIDAD**

El límite inferior establecido para este parámetro determina una viscosidad mínima en la cual no hay pérdida de potencia a través de la bomba de inyección y en la salida del inyector. En cuanto al valor máximo permitido está limitado por consideraciones relacionadas con el diseño y tamaño del motor y las características del sistema de inyección.

El límite superior de viscosidad del biodiesel ( $6,0 \text{ mm}^2/\text{s}$  a  $40^\circ \text{C}$ ), es más alto que la viscosidad máxima permitida para los diésel regular y extra colombiano ( $5,0$  y  $4,1 \text{ mm}^2/\text{s}$ , respectivamente). Las mezclas de biodiesel con diésel cercano a la especificación superior, pueden dar como resultado una mezcla con viscosidad superior a la especificación de la resolución 1289 de 2005 [10].

## **2.4 CENIZAS SULFATADAS**

Los materiales que forman cenizas pueden estar presentes en el biodiesel en tres formas: (1) sólidos abrasivos, (2) jabones metálicos solubles, y (3) catalizadores no removidos. Los sólidos abrasivos y los catalizadores no removidos pueden afectar los inyectores, filtros y bomba de inyección, generar desgaste en los pistones y anillos, y depósitos en el motor. Los jabones metálicos solubles tienen poco efecto en el desgaste pero pueden afectar los empaques, contribuir al taponamiento de filtros y generar depósitos en el motor.

## **2.5 AZUFRE**

El efecto de los compuestos de azufre en el desgaste del motor y en la formación de depósitos parece variar considerablemente en importancia y depende en gran parte de las condiciones de funcionamiento. El azufre del combustible puede también afectar el funcionamiento de los sistemas de control de emisiones y por razones ambientales se han impuesto varios límites al contenido de azufre. El B100 es un combustible esencialmente libre de azufre.

## **2.6 CORROSIÓN EN LÁMINA DE COBRE**

Esta prueba sirve como medida para prevenir posibles dificultades con las partes o materiales de los sistemas de inyección de combustible fabricadas en cobre, latón

o bronce. La presencia de ácidos o de compuestos con azufre puede deteriorar la lámina de cobre, indicando así la posibilidad de ataque corrosivo.

## 2.7 NÚMERO DE CETANO

Es una medida de la calidad de ignición del combustible y del proceso de combustión. Los requerimientos de número de cetano dependen del tamaño, diseño del motor, naturaleza de las variaciones de velocidad y carga, y de las condiciones atmosféricas.

El índice cetano calculado según los métodos ASTM D976 o ASTM D4737, no puede ser usado como método de aproximación del número de cetano con el *biodiesel* o sus mezclas. No hay información experimental que soporte la validez del cálculo del índice de cetano en *biodiesel* o sus mezclas con diésel.

## 2.8 PUNTO DE NUBE

El punto de nube es importante porque define la temperatura a la cual aparece una nube o una nubosidad de cristales en el combustible, bajo condiciones de ensayo prescritas. Generalmente, el Punto de Nube del *biodiesel* es más alto que el del diésel. El punto de nube del *biodiesel* y su impacto sobre las características de flujo en frío de la mezcla que resulte, debe cumplir las especificaciones para asegurar la operación sin problemas en climas fríos.

## 2.9 CARBÓN RESIDUAL

El carbón residual mide la tendencia a la formación de depósitos de carbón, generado por un destilado de petróleo; aunque no tenga una estricta correlación directa con los depósitos en el motor, esta propiedad se considera simplemente como una aproximación al respecto.

Aunque el *biodiesel* está dentro del rango de destilación del diésel, destila en un rango muy corto de temperaturas y esto dificulta separar el residuo del 10% sobre la destilación, como lo exige la norma ASTM D4530. Por lo tanto, se debe usar una muestra del 100% de *biodiesel* para realizar esta prueba y los cálculos se realizan como si fuera el 10 % residual. El parámetro E (peso final del frasco/ peso original) en el numeral 8.1.2 del método de ensayo D 4530-93 es una constante 20/200.

## **2.10 NÚMERO ÁCIDO**

El número ácido se utiliza para determinar el nivel de ácidos grasos libres o los ácidos del proceso que pueden estar presentes en el biodiesel. Se ha demostrado que un biodiesel con alto número ácido, aumenta la formación de depósitos en los sistemas de inyección y puede aumentar la probabilidad de corrosión.

El número ácido mide diferentes fenómenos tanto en el biodiesel como en el diésel. El número ácido mide los ácidos grasos libres del biodiesel o los subproductos de la degradación no encontrados en el diésel. Aumentando la temperatura del reciclo en nuevos diseños del sistema de combustible se puede acelerar la degradación del combustible que podría dar lugar a altos grados de acidez y al creciente taponamiento del filtro.

## **2.11 GLICERINA LIBRE**

El método de glicerina libre se utiliza para determinar el contenido de glicerina en el combustible. Altos niveles de glicerina libre pueden causar depósitos en los inyectores; también pueden obstruir el sistema de inyección, resultando en una acumulación de glicerina libre en el fondo de los sistemas de almacenamiento y de inyección de combustible.

## **2.12 GLICERINA TOTAL**

El método de la glicerina total se utiliza para determinar el contenido de glicerina en el combustible, incluyendo la glicerina libre y la porción de glicerina de aceite o de grasa sin reaccionar o que ha reaccionado parcialmente. Niveles bajos de glicerina total, aseguran una alta conversión del aceite o de la grasa hacia sus mono-alquil ésteres. Altos niveles de mono, di, y triglicéridos pueden causar depósitos en los inyectores y afectar adversamente la operación de los motores en climas fríos causando taponamiento de filtros.

## **2.13 CONTENIDO DE FÓSFORO**

El fósforo puede deteriorar los sistemas de control de emisiones y tratamiento de gases de escape, razón por la cual su contenido debe ser bajo. El uso de sistemas de control de emisiones y tratamiento de gases de escape en motores diésel se

están implementando en la medida en que los estándares de emisiones son más exigentes.

#### **2.14 ESTABILIDAD**

La estabilidad se define como la resistencia del combustible a cambios físicos y químicos debido a la interacción del combustible con su ambiente. Debido a la variedad de reacciones e interacciones, es posible mezclar dos combustibles muy estables y obtener uno inestable.

#### **2.15 ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO**

Normalmente el biodiesel producido tiene estabilidad en sus propiedades en condiciones normales de almacenamiento sin la formación de productos insolubles de degradación, aunque algunos datos sugieren que el biodiesel obtenido de aceites con altos índices de yodo pueden degradarse más rápido que el diésel. El biodiesel que va a ser guardado por periodos prolongados se debe seleccionar para evitar el aumento de la acidez, de la viscosidad y la formación de sedimentos, todo esto puede taponar filtros, afectando la operación de la bomba de combustible y/o obstruir los inyectores y quemadores.

#### **2.16 ESTABILIDAD TÉRMICA**

Es la resistencia del combustible a degradarse por efecto de la temperatura. El biodiesel sometido a las altas temperaturas del motor, se degradará más rápidamente, formando depósitos sólidos que pueden afectar el motor. A temperaturas relativamente bajas, el biodiesel generalmente aumenta su viscosidad e incluso se puede gelificar o cristalizar en una masa sólida que no puede ser filtrada o bombeada. Este problema se vincula con el punto de fusión de los ésteres de los ácidos grasos, es decir, con su composición.

#### **2.17 ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN**

Es la resistencia del combustible a cambiar bajo condiciones de oxidación severas. Adicional a exponer el combustible a cantidades de oxígeno en exceso, las pruebas de estabilidad a la oxidación usualmente incorporan elevadas temperaturas de prueba para acelerar las velocidades de degradación.

## 2.18 CONTENIDO DE MONOGLICÉRIDOS, DIGLICÉRIDOS Y TRIGLICÉRIDOS

Es una de las especificaciones más importantes. Las trazas de glicéridos en el biodiesel son muestra de una incompleta conversión del aceite vegetal durante la reacción de transesterificación. La reacción reversible entre el glicerol y metil esteres también puede contribuir a la presencia de monoglicéridos y diglicéridos.

Un biodiesel con excesiva cantidad de glicéridos puede causar depósitos en la cámara de combustión. Altos niveles de mono, di o triglicéridos también pueden causar depósitos en los inyectores y pueden afectar la operación en clima frío y causar taponamiento de filtros. Inclusive, en los motores de combustión interna, algo de combustible sin quemar puede pasar por el espacio comprendido entre los anillos del pistón y la pared del cilindro, entrando en contacto con el aceite lubricante; estos pueden reaccionar, resultar en sedimentación y en el peor de los casos, en daños en el motor.

La norma EN14214 [11] especifica 0.8% para monoglicéridos, 0.2% para diglicéridos y 0.2% para triglicéridos. Se debe asumir que aparte de la concentración de glicéridos en el biocombustible, la naturaleza del combustible, especialmente el grado de insaturación, tiene un efecto significativo en la formación de depósitos y de sedimentación en el motor.

## 2.19 CULTIVO DE OLEAGINOSAS EN COLOMBIA

### • Situación nacional [12]

La tabla 3 resume el crecimiento de la producción agrícola de las oleaginosas cultivadas en el país.

CULTIVOS OLEAGINOSAS	% Aceite presente	1970-1980	1980-1990	1990-2000	1990-2005	2000-2005
Ajonjolí	50	-6.08%	-0.25%	-4.53%	-7.56%	-10.82%
Soya	19	2.39%	5.39%	-15.81%	-8.20%	8.07%
Maní	40	13.92%	10.14%	-1.89%	-8.78%	-15.52%
Algodón	22	0.65%	3.83%	-13.35%	-7.21%	5.81%
Palma Africana	30	6.66%	12.19%	8.07%	6.54%	4.76%
Coco	25	-0.31%	-2.49%	-1.35%	1.40%	6.47%

**Tabla 3.** Tasa de crecimiento de los diferentes cultivos de oleaginosas en Colombia.

Fuente: Cálculos Observatorio Agrocadenas con base en cifras de Misión Rural y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural

En la tabla se observa la tasa de crecimiento de las oleaginosas producidas en Colombia, siendo las más producidas la palma africana, el algodón y el coco. Por otro lado y teniendo en cuenta la cantidad de aceite que contiene la semilla, los cultivos promisorios podrían ser maní y el ajonjolí, sin embargo, como se ve en la tabla con respecto a estas oleaginosas, el país no cuenta con unas políticas claras en cuanto a producción y manejo.

En la actualidad, la producción del aceite crudo de palma representa aproximadamente el 85% del total de la producción de cultivos de oleaginosas en el país. Entre 2005 y 2009 la producción nacional de aceite crudo de palma se estima que aumentó considerablemente debido a las políticas del gobierno en pro del desarrollo y fomento de los biocombustibles.

<b>CULTIVOS OLEAGINOSAS</b>	<b>1970<sup>1</sup></b>	<b>1980<sup>1</sup></b>	<b>1990<sup>2</sup></b>	<b>2000<sup>2</sup></b>	<b>2001<sup>2</sup></b>	<b>2002<sup>2</sup></b>	<b>2003<sup>2</sup></b>	<b>2004<sup>2</sup></b>	<b>2005<sup>2</sup></b>
Ajonjolí	17.9	12.9	8.2	4.1	3.8	3.1	2.7	3.2	2.2
Soya	131.9	154.4	232.1	37.8	55.7	61.7	57.3	68.0	59.9
Maní	0.7	2.5	4.8	4.5	3.2	2.0	2.1	1.8	2.1
Algodón	276.4	353.1	336.4	111.1	114.0	92.2	92.2	154.7	138.9
Palma Africana <sup>3</sup>	26.9	70.0	225.6	524.0	547.6	528.4	526.6	630.4	672.6
Coco	112.3	108.8	119.3	101.2	99.1	95.9	109.6	131.9	130.6

**Tabla 4. Producción agrícola por cultivos en Colombia (Toneladas anuales)**

Fuente: Cálculos Observatorio Agrocadenas con base en cifras de Misión Rural y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural

#### • Situación del país en el entorno mundial

Considerando que el mayor rendimiento para la obtención de aceite crudo se obtiene a partir de la palma se indica a continuación un estimado de la situación del país a nivel mundial.

**PRODUCCIÓN Y CONSUMO MUNDIAL DE ACEITE DE PALMA, POR PAÍSES**  
(2003/04 – 2007/08, Millones de ton y porcentajes)

PRODUCCION	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08 Est.	2003/04 - 2007/08		
						Variación absoluta	Distrib.	Tasa de variación
Indonesia	12.0	13.6	15.6	16.6	18.3	6.3	56.9	52.9
Malasia	13.4	15.2	15.5	15.3	17.4	4.0	35.8	29.7
Tailandia	0.8	0.8	0.8	1.2	1.1	0.2	1.9	25.0
Colombia	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.2	1.9	35.2
Nigeria	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.0	0.4	5.1
Otros	2.4	2.5	2.7	2.7	2.7	0.3	3.1	14.5
Total Mundial	30.0	33.5	36.0	37.3	41.1	11.1	100.0	37.1
<b>CONSUMO</b>								
China	3.7	4.4	5.0	5.1	5.8	2.1	18.6	56.3
India	3.6	3.4	3.1	3.8	4.3	0.7	5.8	18.1
EU-27	3.3	3.9	4.2	3.9	3.7	0.4	3.5	11.8
Malasia	2.2	2.7	3.0	3.3	3.9	1.7	15.0	75.7
Indonesia	3.8	4.0	4.4	4.6	4.8	1.0	9.0	26.9
Paquistán	1.3	1.6	1.7	2.2	2.4	1.1	9.7	84.4
Otros	11.4	12.6	13.8	14.2	15.7	4.3	38.3	37.9
Total Mundial	29.3	32.5	35.2	37.2	40.5	11.2	100.0	38.4

Fuente: USDA/FAS, Oilseeds, World Markets and Trade, May 2008 (<http://www.fas.usda.gov/oilseeds/circular/2008/May/oilseeds.pdf>)

**Tabla 5.** Entorno mundial del mercado de palma.

La producción mundial de aceite de palma se incrementó un 37.1% (11.1 Mill. ton.) entre 2003/04 y 2007/2008. El mayor incremento absoluto se dio en Indonesia (un 56.9% del total) y en Malasia (un 35.8% del total). También se dieron incrementos relativos importantes en la producción de Tailandia (25%) y Colombia (35.2%), pero a partir de niveles de producción muy bajos.

Indonesia y Tailandia fueron los países que incrementaron más significativamente sus exportaciones: un 95.1% del incremento (8.0 Mill. ton) se dio entre ambos países. En cuanto a las importaciones, el mayor incremento absoluto (2.1 Mill. ton) se dio en China, un 27.1% del incremento total; sin embargo, el mayor incremento absoluto (3.4 Mill. ton) se presentó en el resto del mundo (44.3% del total), excluyendo a China, India, UU-27 y Paquistán.

## CAPÍTULO III

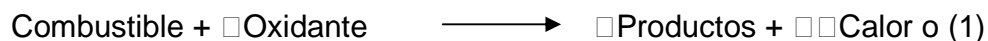
### 3. EFECTO EN LAS EMISIONES POR EL TIPO DE COMBUSTIBLE UTILIZADO

Los combustibles tradicionales usados en motores de combustión interna (gasolina y diésel) son mezclas de una amplia variedad de hidrocarburos obtenidos de la refinación del petróleo. Estos combustibles normalmente tienen asociados una serie de contaminantes de los cuales, el más controlado a nivel mundial es el azufre, por los efectos ambientales directos que tiene (lluvia ácida, precursor del material particulado, etc.) y por el efecto nocivo que tiene sobre los sistemas de tratamiento de gases de escape, tanto en los motores diésel como en los de gasolina. Las formulaciones de combustibles que se producen hoy en día traen asociados, además, algunos aditivos (detergentes-dispersantes, estabilizantes - antioxidantes, mejoradores de cetano, etc.) en cantidades mínimas (ppm) y componentes que tienen asociadas moléculas de oxígeno dentro de sus estructuras (alcoholes, ésteres, alquil ésteres).

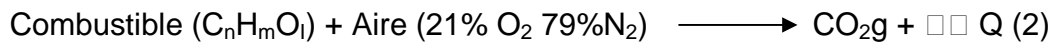
Los altos niveles de contaminación de los combustibles fósiles tradicionales a nivel internacional, han promovido el uso de otro tipo de combustibles, los biocombustibles, los cuales proporcionan entre otros los siguientes beneficios: tienen una combustión más limpia, una muy baja o nula concentración de contaminantes como el azufre y compuestos aromáticos, son derivados de fuentes renovables y son biodegradables. Es así como para el caso específico de los motores diésel el biocombustible utilizado a nivel mundial es el biodiesel, el cual se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales.

#### 3.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

La reacción química global de combustión, en cualquier motor de combustión interna es la siguiente:



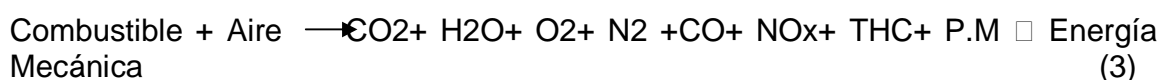
El calor liberado en la reacción es convertido en potencia útil por la expansión de los productos gaseosos de la combustión, los cuales empujan el pistón en su carrera descendente generando un torque en el eje del cigüeñal, proporcional a la masa de combustible quemado en el proceso. Idealmente, la reacción (1), la cual compromete cientos de reacciones intermedias en cadena, se convierte en:



Esta situación ideal describe la combustión completa donde todo el carbono presente en el combustible reacciona para formar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y todo el hidrógeno reacciona para formar agua (H<sub>2</sub>O g). El nitrógeno (N<sub>2</sub>) que viene acompañando el aire, idealmente no se afecta durante el proceso. En la realidad, el proceso de combustión en un motor nunca es completo. Las cadenas de reacción de los procesos de combustión generalmente son detenidas en algún paso intermedio. En la región alrededor de la llama que se propaga, las reacciones pueden ser interrumpidas debido a una insuficiente provisión de oxígeno (mezcla rica) ó debido a una excesiva pérdida de calor (quenching). El primer producto que aparece debido a la combustión incompleta es el monóxido de carbono (CO), ya que su reacción a CO<sub>2</sub> es más lenta que las velocidades de las otras reacciones de la cadena. Un empeoramiento de las condiciones puede resultar en la aparición de hidrocarburos sin quemar, a partir de las cadenas de reacción interrumpidas.

En las áreas más calientes de la cámara de combustión donde hay una excesiva presencia de combustible (zonas ricas), se producen partículas sólidas de carbón las cuales aparecen en los gases de escape en forma de hollín. Además de los productos de la combustión incompleta (CO, hidrocarburos no quemados y material particulado), se producen cantidades considerables de óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), generalmente referidos como NO<sub>x</sub>. Estos son formados por la reacción entre el N<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub> del aire a altas temperaturas, y ellos permanecen en los productos de la reacción que se encuentran en los gases de escape [13 y 14].

La reacción global que mejor describe la combustión en un motor de combustión interna, es la siguiente:



Los compuestos de azufre presente en el combustible provocan la emisión de óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub>), los cuales en presencia de vapor de agua condensan como ácidos (lluvia ácida) ó como sulfatos en el material particulado. De los compuestos gaseosos formados en la combustión, para el caso de los motores de encendido de chispa, cerca del 2% en peso de estos son tóxicos, mientras que para el caso del motor de encendido por compresión esta relación es alrededor del 0,1%, con flujos máxicos apreciablemente más altos. En estas proporciones no se cuenta el CO<sub>2</sub>, notorio por su contribución al efecto de calentamiento global.

El material particulado y las emisiones gaseosas de NO<sub>x</sub> y THC (Hidrocarburos totales) provenientes de los tubos de escape de los automóviles, promueven la formación de "smog", que es una mezcla de partículas sólidas y líquidas

suspendidas en una fase gaseosa, que ocurren bajo condiciones de alta humedad y luz solar intensa en capas de aire estáticas, que se presentan debido al fenómeno de inversión térmica y que no permiten la circulación normal del aire atmosférico.

Dentro de este “smog” se presentan una serie de reacciones fotoquímicas que finalmente llevan a un equilibrio del óxido de nitrógeno (NO) y el ozono troposférico (O<sub>3</sub>) en un proceso natural a partir del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

Durante el día la luz ultravioleta del sol actúa sobre el NO<sub>2</sub> produciendo NO y O<sub>3</sub>. Durante la noche el proceso se revertiría, si no se tuvieran emisiones de hidrocarburos en el proceso. Sin embargo, en el proceso de descomposición del NO<sub>2</sub> durante el día se forman átomos de oxígeno (O), como compuestos intermedios antes de la formación del ozono (O<sub>3</sub>), parte de los cuales promueven la formación de radicales de hidrocarburos, los cuales tienden a reaccionar con el NO para formar NO<sub>2</sub> y de esta forma parte del ozono formado en el día permanece en el ambiente.

Los problemas de contaminación del aire por las emisiones provenientes de los motores de combustión interna, se hicieron evidentes en los años 1940's en la ciudad de Los Ángeles. Desde 1952 se demostró que los problemas de “smog” encontrados allí eran el resultado de las reacciones entre los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los hidrocarburos (THC) en presencia de la luz solar. Además se detectó, que los mayores contribuyentes de las altas concentraciones de monóxido de carbono (CO) en el ambiente eran los vehículos con motores de encendido por chispa, mientras que los motores diésel eran fuentes significativas de partículas de hollín así como de THC y NO<sub>x</sub>. A partir de 1990, la Enmienda del Acta del Aire Limpio (CAAA) de los Estados Unidos fijó dos estándares de emisiones para los vehículos livianos y los camiones de baja carga (LDT4 de 2614 hasta 3865 Kg.); el US Tier I, con vigencia hasta el año 2004, y el US Tier II que reduce los límites del Tier I a niveles 50% más bajos. Además fijó estándares de durabilidad para 80.000 y 160.000 kilómetros recorridos. [16]

El CAAA de 1990 también redefinió los estándares de emisiones fijados en 1970 para los motores utilizados en vehículos de trabajo pesado (>3865 Kg.) y buses de servicio urbano (Owen 1995). Por ser estándares desarrollados en Bancos de Potencia, se manejan unidades de masa de contaminante por unidad de energía generada (g/Kw-h), a diferencia de las unidades utilizadas para los estándares para vehículos, que se expresan en masa por unidad de espacio recorrido (g/Km.). La implementación de los niveles de reducción en NO<sub>x</sub> y PM, que deberían ser implementados entre 1990 y 1995, requiere el uso de convertidores catalíticos de tres vías, para los vehículos de gasolina, y avances mayores en las tecnologías diésel. Para el año 1998 se requirieron mayores reducciones. [16]

En 1990 la EPA pospuso la implementación del límite de emisión de PM de 0,1 g/bhp-h (0.134 g/Kw.-h) para buses urbanos de 1991 a 1993 y en marzo de 1993, publicó una norma reduciendo este límite a 0.07 g/bhp-h (0.094g/Kw.-h) entre 1995 y 1996 y 0.05 g/bhp-h (0.067 g/Kw.-h) en 1996. Unido a estos estándares, se mostró la necesidad de que todos los vehículos diésel utilizaran un combustible que contenga 0.05% en peso de azufre, para ayudar a los fabricantes de motores a reducir los niveles de PM con la utilización de convertidores catalíticos y trampas de oxidación [15].

Para las entidades encargadas de las regulaciones ambientales en el ámbito mundial, las emisiones de material particulado y NOx de los motores diésel han tenido un gran impacto, por los efectos nocivos que estas tienen sobre los seres humanos. El CO<sub>2</sub>, aunque es el producto que nos indica qué tan eficiente y completa es la combustión, está demostrado que tiene una gran capacidad de atrapar la energía radiante del sol aumentando el efecto invernadero y contribuyendo al efecto del calentamiento global.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL, BIOCOMBUSTIBLE Y LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLES DIÉSEL CON BIOCOMBUSTIBLES.**

#### **4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES**

La Ley 939 de 2004 incluyó una lista de siete posibles biocombustibles que podrían ser considerados para su uso en motores diésel. Es importante tener en cuenta que los únicos biocombustibles aceptados y normalizados internacionalmente para ser utilizados como componentes para mezclas con los combustibles diésel son los alquil esteres de ácidos grasos.

#### **4.2 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS DE COMBUSTIBLE DIÉSEL CON BIODIESEL DE PALMA EN EL DESEMPEÑO DE LOS MOTORES**

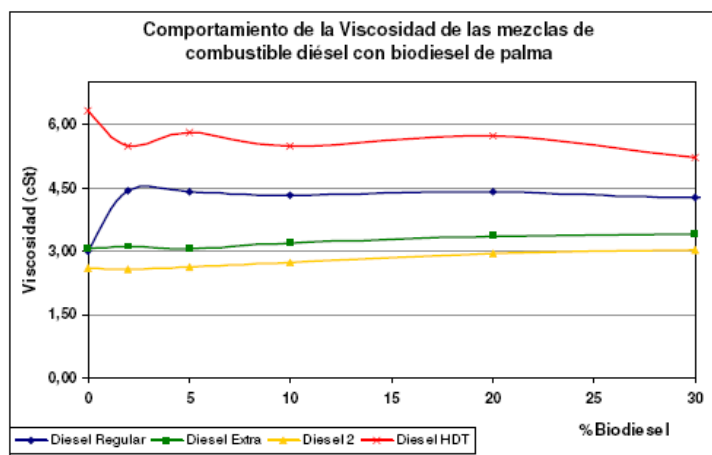
Por ser el biodiesel el biocombustible de mayor interés, a continuación se hace un análisis detallado de algunos resultados obtenidos al adicionar el biodiesel de palma a los combustibles diésel. El análisis en detalle se realizó sobre las principales propiedades que resultaron modificadas a una serie de combustibles. Este trabajo fue desarrollado entre el ICP y CENIPALMA con el fin de caracterizar estas muestras y determinar si cumplen con las especificaciones de calidad establecidas en la Resolución 1289 a nivel nacional.

Los combustibles que se seleccionaron para las pruebas realizadas fueron los productos tradicionales, diésel regular (4000 ppm de S), diésel extra (1200 ppm de S), igualmente se analizó un diésel N° 2 y un diesel hidrotratado (HDT) con bajo contenido de azufre (aprox. 250 ppm de S)

#### **4.3 VISCOSIDAD**

La variación de la viscosidad del diésel con el aumento de la proporción de biodiesel, depende de los valores relativos de esta propiedad en cada combustible. Si el diésel tiene una viscosidad inferior a la del biodiesel, la

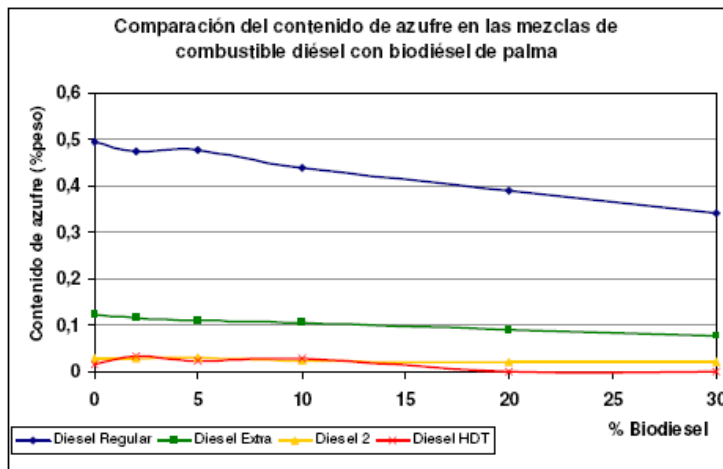
tendencia de la mezcla es a aumentar, mientras que si el diésel tiene una viscosidad más alta, la viscosidad de la mezcla tiende a disminuir.



**Figura 7.** Comportamiento de la viscosidad de las mezclas de combustible diésel con biodiesel de palma.

#### 4.4 CONTENIDO DE AZUFRE

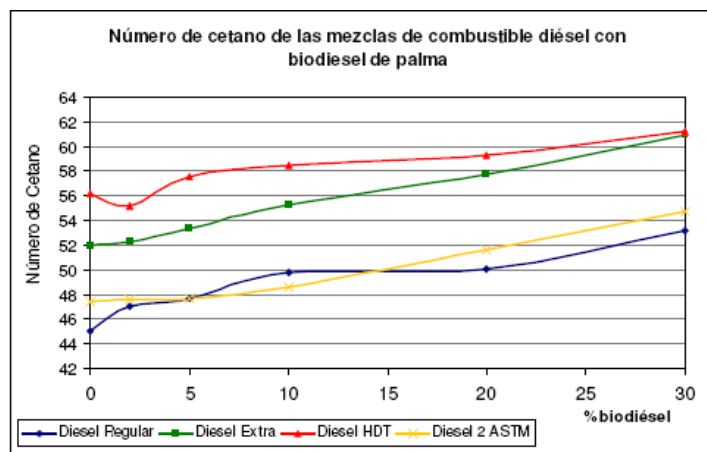
El biodiesel es considerado un componente de cero azufre, con respecto al contenido de azufre de los combustibles colombianos. Por esta razón, en las mezclas diésel - biodiesel se tiene una disminución de los contenidos de azufre a medida que se aumenta el biodiesel en la mezcla, por el efecto de dilución que se presenta, es decir la disminución es proporcional al contenido de biodiesel en la mezcla. Además, entre mayor sea el contenido de azufre del combustible diésel, más notoria es la disminución que se tiene.



**Figura 8.** Tendencia en el contenido de azufre de las mezclas de combustible diésel con biodiésel de palma.

#### 4.5 NÚMERO DE CETANO

La especificación que se tiene en Colombia para el diésel regular y el diésel extra (43 / 45), e incluso para las especificaciones que se manejan a nivel internacional para el biodiésel de soya y colza. Como el número de cetano es superior para el biodiésel de palma, esto hace que la tendencia del cetano para las mezclas diésel biodiésel siempre sea a aumentar, ya que no hay un combustible diésel comercial que tenga los niveles de cetano del biodiésel de palma.



**Figura 9.** Tendencia del número de cetano para las mezclas combustible diésel con biodiésel de palma.

## 4.6 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico es una de las propiedades del combustible diésel que se ve disminuida por la adición del biodiésel, debido a que el poder calorífico del biodiésel es inferior al del diésel en cerca de un poco más de un 10%. Sin embargo, a proporciones bajas (<10%), la disminución en el poder calorífico de la mezcla, generalmente se ve compensada por la mejor combustión gracias al mejor cetano y a la presencia de oxígeno en la molécula del biodiésel. A proporciones superiores, la caída en el poder calorífico puede empezar a reducir la potencia generada por el motor. En la Figura 10 se puede apreciar la tendencia del poder calorífico de las mezclas diésel-biodiésel de palma.

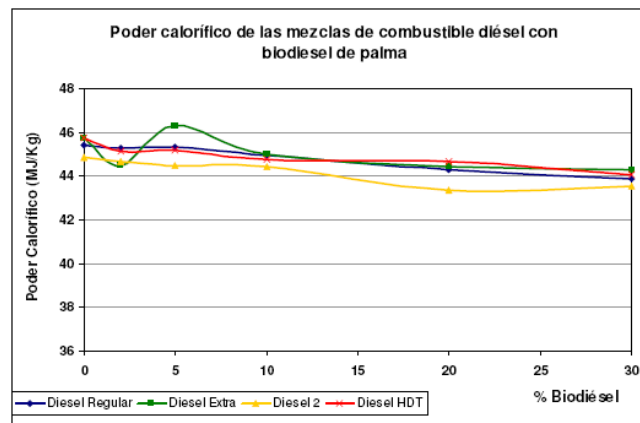
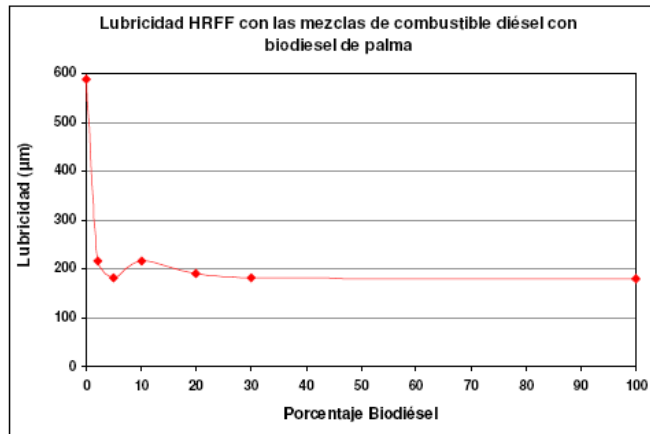


Figura 10. Tendencia del poder calorífico para las mezclas diésel-biodiésel de palma.

## 4.7 LUBRICIDAD

La lubricidad es la propiedad que tiene el combustible diésel para lubricar y evitar el desgaste prematuro de los componentes de los sistemas de inyección de los motores. Esta propiedad está muy relacionada con algunos compuestos de azufre presentes en el combustible. Cuando un combustible es hidrotratado, estos compuestos de azufre son removidos o transformados y se pierde la lubricidad del combustible, lo que puede ocasionar un desgaste prematuro de los componentes de los sistemas de inyección de los motores diésel. A nivel internacional, el biodiésel es utilizado como aditivo de lubricidad y para el caso de Colombia cuando se implemente el diésel de bajo azufre (diésel HDT) se mantendrá esta tendencia.

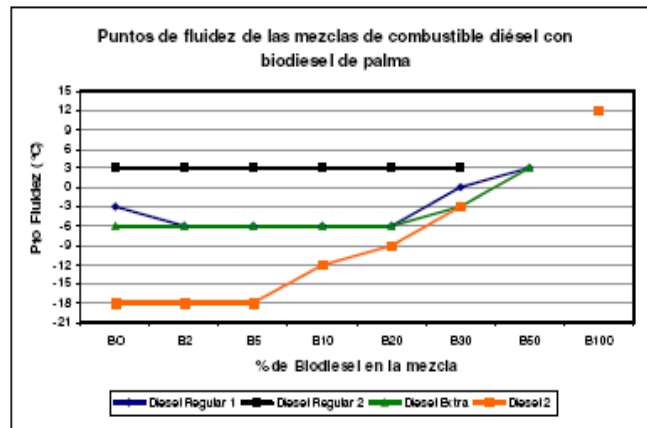


**Figura 11.** Lubricidad de las mezclas diésel HDT-biodiesel de palma (especificación 450 µm máximo)

Los resultados encontrados muestran que un 2% de adición de biodiesel de palma al diésel HDT suple la pérdida de lubricidad ocasionada por el bajo contenido de azufre del combustible diésel. Con el 2% de adición es suficiente para cumplir con las especificaciones establecidas para este parámetro. [16]

#### 4.8 PROPIEDADES DE FLUJO EN FRÍO

Existe alguna preocupación a nivel de los entes reguladores, los distribuidores de combustibles y el sector automotor con respecto a las propiedades de flujo en frío de las mezclas diésel- biodiesel de palma. Se han realizado estudios con diferentes combustibles diésel y se ha encontrado que en proporciones de hasta un 30% en volumen, para los diésel típicos colombianos, se mantienen las propiedades del combustible diésel, para el punto de nube y el punto de fluidez.



**Figura 12.** Comportamiento del punto de fluidez de las mezclas de combustible diésel con biodiésel de palma

#### 4.9 COLOR ASTM

Como ya se mencionó anteriormente el biodiésel de aceite crudo de palma contiene carotenos que le imprimen un color rojizo al producto y que hacen que el color no cumpla especificaciones. Este color es transferido también a los combustibles diésel, cuando se preparan las mezclas, por lo que estos se salen de especificación. Esto no se espera que genere problemas a futuro ya que, en los procesos comerciales de producción de biodiésel a partir de aceite de palma estos compuestos son retirados en el pretratamiento del aceite, antes de ir a la sección de transesterificación.

## CAPITULO V

### 5. COMPORTAMIENTO DE LAS EMISIONES CON COMBUSTIBLES Y BIODIESEL PUROS

Al considerar que el uso de los combustibles fósiles por más de 100 años ha acarreado grandes problemas ambientales, como los altos niveles de contaminación y el incremento de la lluvia ácida entre otros, y teniendo en cuenta que las reservas de petróleo a nivel mundial son cada día más escasas, es necesaria la búsqueda de otro tipo de combustibles, derivados de fuentes naturales, renovables y que al usarlos causen un bajo impacto ambiental, como es el caso del biodiesel. Una de las materias primas más utilizadas en el uso de aceites vegetales transformados químicamente (metil esterres) que pueden reemplazar los combustibles diésel. En el mundo el más utilizado es el aceite de colza principalmente en Europa, pero también se conocen experiencias en otras regiones con aceite de girasol, soya y palma.

Colombia no es ajena a esta tendencia mundial, y en los últimos años se ha impulsado la idea del uso de biocombustibles derivados de fuentes vegetales y/o animales. Las situaciones particulares que se presentan en Colombia son: i) la capacidad de producción de diésel es insuficiente para la demanda de este combustible a nivel local lo que ha ocasionado que el país importe combustible diésel para satisfacer su demanda, ii) los combustibles diésel producidos en el país, tienen un alto contenido de azufre en comparación con la norma internacional (4000 ppm y 1200 ppm en lugar de 50 ppm), iii) existen altos niveles de contaminación especialmente en las grandes ciudades del país como Bogotá, Cali y Medellín.

En el año 2005, a través de un convenio de cooperación técnica entre Ecopetrol – ICP y el Centro de Investigación en Palma de Aceite – Cenipalma, se realizó un estudio con el fin de determinar alternativas viables para el uso de biocombustibles producidos a partir de aceite de palma mezclados con los combustibles tradicionales que produce Ecopetrol S.A.

Los biocombustibles seleccionados fueron los de mayor disponibilidad de materia prima a nivel local y los combustibles diésel seleccionados fueron los productos tradicionales como el diésel regular (4000 ppm de S), diésel extra (1200 ppm S), diésel N°2 (35ppmS) y un diesel hidrotratado (HDT). Se definieron mezclas de combustible diésel con aceite de palma y biodiesel de palma en diferentes proporciones para ser evaluadas en cinco tipos de vehículos diésel.

Los vehículos que fueron evaluados, con sus características técnicas se codificaron de la siguiente forma:

- V1 Camión Chevrolet NPR 66L modelo 2004.
- V2 Buseta Mitsubishi Canter FE659 modelo 2004.
- V3 Chevrolet Corsa GL modelo 2002.
- V4 Buseta Chevrolet NPR 66P modelo 2001.
- V5 Chasis Mercedes Benz LO-712 modelo 2004.

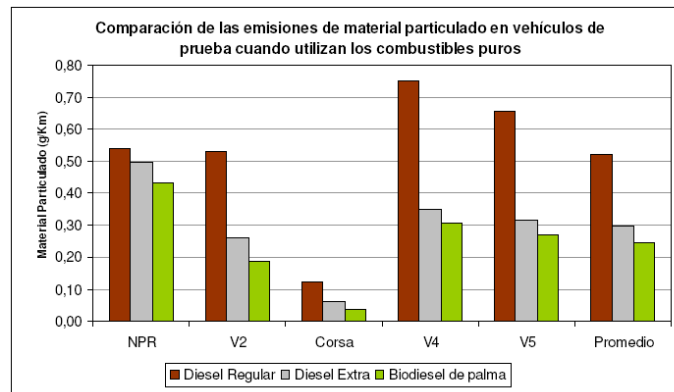
A continuación se presenta un resumen de los resultados más importantes encontrados relacionados con las emisiones de material particulado, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2</sub>.

### **5.1 EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO - MP**

Este es uno de los contaminantes más controlados hoy en día a nivel mundial, por sus efectos sobre la salud y por el hecho de que se va acumulando en las vías respiratorias en un proceso irreversible que genera graves consecuencias para los humanos. En Colombia la concentración de material particulado en el aire ambiente es el principal problema de contaminación que enfrentan los grandes centros urbanos.

Experimentalmente se ha determinado que las emisiones de material particulado están relacionadas, principalmente, con el contenido de azufre, aromáticos y poli aromáticos, la densidad y el PFE (Punto Final de Ebullición) del combustible. Las investigaciones también muestran que las emisiones de material particulado varían según el tipo de combustible y la tecnología y el tamaño del motor utilizado, así como el mantenimiento del vehículo.

El biodiesel es considerado un componente de cero azufre, comparado con el diésel regular y extra colombiano, además que no contiene aromáticos ni poli aromáticos y que tiene un alto número de cetano, se presenta una significativa diferencia en las emisiones de material particulado del biodiesel de palma en comparación con las emisiones de los combustibles diésel. Otro aspecto que ayuda a la reducción del material particulado, por el uso del biodiesel, es su contenido de oxígeno en la molécula (~11%), lo que mejora el proceso de combustión. [16]



**Figura 13.** Comparación de las emisiones de material particulado cuando se utilizan los combustibles puros

Del estudio realizado cuando se utilizaron los combustibles puros, diésel regular, diésel extra y biodiésel de palma, se encontró que en los cinco vehículos en prueba las emisiones de material particulado disminuyen de forma significativa cuando se utiliza biodiésel de palma en comparación de las emisiones del diésel regular y diésel extra. En promedio las reducciones de material particulado fueron del 53% y del 17% con respecto al diésel regular y diésel extra respectivamente.

Esta reducción en parte puede explicarse, porque el biodiésel de palma es considerado un componente de cero azufre, comparado con el diésel regular y extra colombianos, además no contiene compuestos aromáticos ni poli aromáticos y cuenta con un alto número de cetano, lo que contribuye a que haya un mejor proceso de combustión al interior del motor.

## 5.2 EMISIONES DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO – NO<sub>x</sub>

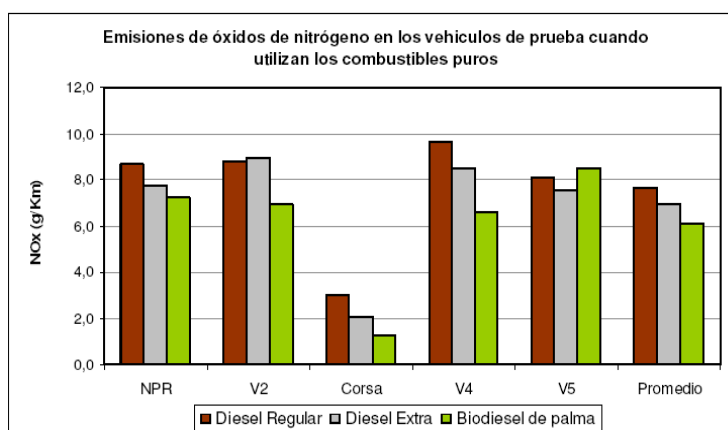
Los NO<sub>x</sub> son otro de los contaminantes gaseosos que se controlan en las emisiones de los motores y vehículos diésel, por los niveles que se producen y porque son considerados precursores de formación de ozono (O<sub>3</sub>) y de lluvia ácida. Uno de los grandes retos que se tiene con las tecnologías de los nuevos motores diésel es que, en la medida que se mejoran los procesos de combustión, para reducir los niveles de material particulado, se tienden a incrementar las emisiones de NO<sub>x</sub>.

Los resultados encontrados en cuatro de los vehículos de prueba evaluados evidencian una disminución de las de NO<sub>x</sub> cuando se utiliza biodiésel de palma como combustible diésel. Este comportamiento difiere de los reportes de literatura internacional, con biodiésel de colza y soya, los cuales reportan pequeños incrementos en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Es así como además de las variables relacionadas con el desempeño del motor, la naturaleza del biodiésel utilizado y

específicamente el contenido de ácidos grasos insaturados pueden afectar el nivel de emisiones de estos productos.

Por otro lado, este resultado está acorde con lo reportado en la industria del petróleo, donde los combustibles con mayor contenido de moléculas saturadas tienden a emitir menor cantidad de NOx.

En promedio las emisiones de NOx cuando se utilizó biodiesel de palma son inferiores en un 20% con respecto al diésel regular y en un 12% con respecto al diésel extra. En el caso del vehículo 5, el índice de emisiones de NOx fue superior en un 4,9% con respecto al diésel regular y del 11,6% con respecto al diésel extra. Este es un indicativo de la influencia que tiene la tecnología del vehículo sobre las emisiones de NOx y en el comportamiento del combustible en el motor.



**Figura 14.** Comparación de las emisiones de NOx cuando utilizan combustibles puros.

Cabe recordar, que el aceite de palma tiene un 44% de ácidos grasos insaturados en relación con el 80-85% de ácidos grasos insaturados del aceite de colza y soya. Esta característica de la materia prima no es modificada por el proceso de transesterificación por lo tanto el biodiesel tiene el mismo perfil de ácidos grasos del aceite que se deriva.

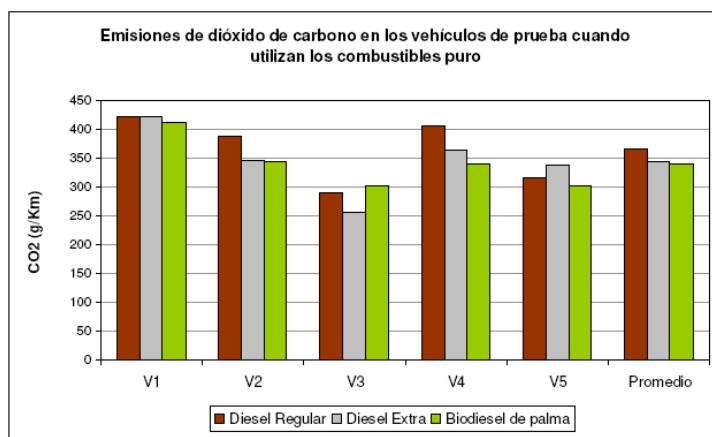
Las mezclas de combustible diésel con biodiesel de palma, en cuanto a las emisiones de NOx, no presenta una tendencia clara entre el nivel de emisiones y la cantidad de biodiesel presente en el combustible. El nivel de estas emisiones también varía de acuerdo al combustible diésel utilizado, si bien la diferencia no es significativa, se presentan mayores niveles de emisiones cuando se utilizan las mezclas con diésel regular en comparación con las mezclas con diésel extra.

De forma general, y de acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que no hay una tendencia a aumentar las emisiones de NOx cuando se utilizan las mezclas de combustibles diésel con biodiesel de palma.

### 5.3 EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO – CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> es un gas que absorbe la energía radiante del sol y como tal es considerado un gas de efecto invernadero, pero sus emisiones aun no han sido reguladas en el sector transporte. Sin embargo, existe un consenso mundial en la necesidad de controlar y reducir su producción, con el objeto de controlar el calentamiento global que se está produciendo en la atmósfera terrestre. El Protocolo de Kyoto ha fijado metas muy claras de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> para los países industrializados y ha definido beneficios económicos (bonos Mecanismos de Desarrollo Limpio, MDL) para los países subdesarrollados y en vía de desarrollo que lleven a cabo programas para su control.

El biodiesel de palma presentó una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> en cuatro de los vehículos evaluados en promedio del 6,6% y del 1,3% con respecto al diésel regular y extra respectivamente. Es importante tener en cuenta, que el biodiesel proviene en su mayoría de fuentes renovables y el CO<sub>2</sub> producido por su combustión entra en el ciclo natural del cultivo del que proviene y no contribuye al incremento de la concentración de este gas en la atmósfera.



**Figura 15.** Comparación de las emisiones de dióxido de carbono cuando se utilizan los combustibles puros.

Es importante tener en cuenta, además, que el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> (gr /Km.) está directamente relacionado con el rendimiento de combustible (Km./Gal) y con el análisis elemental del combustible (relación carbono/hidrógeno). Por esta

razón, los análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> siempre se deben complementar con un análisis de consumo de combustible y análisis elemental CHN del mismo. Aunque no se dispone de análisis elemental del biodiesel de palma, la literatura reporta contenidos de carbono inferiores para el biodiesel de soya y colza, con respecto a los combustibles diésel tradicionales, de alrededor del 10%. Esto significa que si se mantuviera un consumo masivo de combustibles constante, las emisiones de CO<sub>2</sub> del biodiesel deberían ser inferiores a las del diésel en esa misma proporción. Sin embargo, los consumos de combustibles varían, por la diferencia en densidad y por variaciones en el desempeño de los sistemas de inyección con cada combustible.

Es importante mencionar que el biodiesel de palma cuando se encuentra mezclado con el combustible diésel mejora algunas propiedades de este como es el caso del número de cetano, la viscosidad y la lubricidad.

Las mezclas de combustible diésel con biodiesel de palma, presentan un incremento en el número de cetano de forma proporcional al porcentaje de biodiesel en la mezcla.

## **CAPÍTULO VI**

### **6. ESTÁNDARES Y REGULACIONES SOBRE CALIDAD DEL DIÉSEL Y BIODIESEL**

La calidad de los combustibles y biocombustibles, a nivel nacional e internacional, se regula a través de normas y resoluciones donde se especifican las características de calidad que se deben cumplir para que puedan ser utilizados como combustibles diésel, o componentes de estos, a nivel comercial. A continuación se describen las normas existentes para el combustible diésel, el biodiesel y las mezclas. Es importante tener en cuenta que, no existe una norma o regulación a nivel nacional ni internacional que especifique los parámetros de calidad para que los aceites vegetales se puedan utilizar directamente como combustibles ó en mezclas con los combustibles tradicionales [16 y 17].

#### **6.1 NORMA ASTM D975. STANDARD SPECIFICATION FOR DIESEL FUEL OILS**

Las propiedades de los combustibles fósiles dependen de los esquemas o procesos empleados para la refinación del petróleo y la naturaleza del crudo del cual proceden. Los combustibles diésel, por ejemplo, pueden ser producidos en el rango de ebullición entre 150°C y 400°C, con una gran variedad de posibles combinaciones en sus propiedades, como son volatilidad, calidad de ignición, viscosidad y otras características. Esta norma es una guía sobre los límites permisibles de las propiedades significativas utilizadas para especificar la variedad de combustibles diésel comercialmente disponibles en los Estados Unidos. Esta norma describe ampliamente, los valores límites de las propiedades significativas para siete (7) combustibles diésel, y su aplicación general para uso en motores de encendido por compresión.

#### **6.2 NORMA EN 590. AUTOMOTIVE FUELS. DIESEL. REQUIREMENTS AND METHODS. EUROPEAN AUTOMOTIVE DIESEL STANDARD**

Este estándar europeo especifica los requerimientos y métodos de prueba del combustible para uso en vehículos y motores diésel.

### **6.3 NORMA ASTM D6751. STANDARD SPECIFICATION FOR BIODIESEL FUEL BLEND STOCK (B100) FOR MIDDLE DISTILLATE FUELS**

Esta norma especifica las propiedades de calidad del biodiesel (B100) para uso como componente de mezcla con combustibles diésel definidos por la norma ASTM D975.

### **6.4 NORMA EN 14214. COMBUSTIBLES DE AUTOMOCIÓN. METIL ESTERES DE ÁCIDOS GRASOS (FAME) PARA USO EN MOTORES DIÉSEL. REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO**

Esta norma especifica los requisitos y los métodos de ensayo de los metil esteres de ácidos grasos comercializados y suministrados para su empleo como combustible en motores diésel, en una concentración de 100% o como componente de acuerdo con los requisitos de la EN590. La concentración de 100% es aplicable al combustible que se utilice en los vehículos con motores diseñados o adaptados posteriormente para funcionar con dicha concentración de FAME. Esta norma presenta una tabla de especificaciones con mayor cantidad de parámetros que los especificados en la norma ASTM D6751.

### **6.5 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5444. BIODIESEL PARA USO EN MOTORES DIÉSEL. ESPECIFICACIONES**

Este proyecto de Norma Técnica Colombiana cubre las especificaciones de los alquil esteres (biodiesel) para uso como componente de mezcla con el combustible diésel definido en la NTC 1438. Este documento se encuentra en proceso de aprobación como Norma Técnica Colombiana (NTC) en el Comité Técnico del ICONTEC. Ya surtió los trámites de su elaboración y discusión en el Comité 186 de ICONTEC, consulta pública, corrección y ratificación en el mismo comité.

### **6.6 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1438. PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS. COMBUSTIBLES PARA MOTORES DIÉSEL**

Esta norma establece las especificaciones que deben cumplir y los métodos de ensayos que se deben usar para determinar los parámetros definidos para los combustibles utilizados en motores diésel disponibles en Colombia. Actualmente se encuentra en la sexta revisión por parte del Comité 186 de ICONTEC, para incluir los alquil esteres (biodiesel) como un componente adicional en las especificaciones para el diésel comercial.

## **6.7 RESOLUCIÓN 1289 DE SEPTIEMBRE DE 2005. CALIDAD DEL BIOCOMBUSTIBLE PARA USO EN MOTORES DIÉSEL, EL COMBUSTIBLE DIÉSEL (ACPM) Y SU MEZCLA**

Esta resolución modifica parcialmente la resolución 1465 del 2000, en el sentido de regular los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla con el combustible diésel de origen fósil en procesos de combustión. La tabla contenida en esta Resolución deberá ser cambiada por la tabla del Proyecto de NTC DE100-04, tan pronto sea emitida por el ICONTEC como Norma Técnica Colombiana.

## **6.8 BIOCOMBUSTIBLES**

La Ley 939 en su Artículo 6ª definió una serie de posibles componentes que podrían ser utilizados como biocombustibles para mezclarlos con el combustible diésel tradicional, entre los que se cuentan los aceites vegetales puros y el biodiesel alrededor de los cuales se ha creado la controversia a nivel nacional. Por acuerdo con los miembros del Comité 186 de ICONTEC se decidió caracterizar todas los posibles biocombustibles de origen nacional que, de acuerdo con la Ley 939, pudieran ser utilizados para mezcla con el combustible diésel y que incluyeron: aceite de pollo refinado, aceites de palma crudo, blanqueado y RBD, oleína de palma RBD, suministrados por Cenipalma, metil ester (biodiesel) de aceites crudo de palma y RBD, producido por la empresa Interquim de Medellín, y etil ester de aceite de palma RBD.

## **6.9 ACEITES VEGETALES**

Los aceites vegetales crudos y refinados podrían ser utilizados en algunas aplicaciones como combustibles alternativos pero se presentan los siguientes inconvenientes: elevados puntos de ebullición, alta viscosidad, descomposición durante su destilación y reactividad de las cadenas de carbono insaturadas del aceite, lo cual puede llevar a depósitos de coque en inyectores y cámaras de combustión, pegado del anillo de aceite, espesamiento y melificación del aceite lubricante como resultado de la contaminación con aceite vegetal.

## CONCLUSIONES

1. De acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas se puede concluir que el biodiesel de palma africana en este caso, puede llegar a ser un sustituto total del diesel convencional y que a nivel nacional ya existe una Ley (993 de 2004) que estimula el uso de biocombustibles como sustitutos parciales.
2. En cuanto a los índices de emisiones, los resultados permiten afirmar que cuando se utilizan las mezclas de combustible diésel con biodiesel de palma, hay una tendencia a disminuir las emisiones de gases efecto invernadero y de material particulado.
3. El biodiesel de palma por ser un biocombustible con cero azufre, cero aromáticos y por tener un alto número de cetano y excelentes propiedades de lubricidad, mejora en muchos aspectos la calidad de los diésel tradicionales, aún en los diésel de mejor calidad.
4. El uso del biodiesel en mezclas, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, permitiendo un balance global del contaminante, al hacer parte del ciclo biológico del CO<sub>2</sub> en la atmósfera.
5. Por otra parte la viabilidad económica de un programa de biodiesel implica la valoración de la glicerina y demás subproductos. Lo anterior podría constituir una oportunidad para el desarrollo de la industria oleoquímica nacional.
6. Aunque los costos de producción pueden resultar demasiado altos comparados con los del combustible diésel tradicional, se trata de una situación normal para cualquier fuente de energía alternativa en sus etapas previas de introducción al mercado.
7. El uso de biocombustibles principalmente en Europa es creciente, existiendo países como Alemania y Francia en los que se utiliza en bajos porcentajes en todo el gas oil que se consume, lo cual representa una fortaleza para mayores beneficios de los otorgados por el mecanismo de desarrollo limpio (créditos MDL) establecidos en el protocolo de Kioto por su reducción en las emisiones netas de dióxido de carbono a la atmósfera y que pueden ser guía para el resto de países en vía de desarrollo.
8. Es importante tener en cuenta que por tratarse de cuestiones energéticas y alimentarias es necesario prestar gran atención no solo a los posibles

beneficios, sino también a las posibles consecuencias que puedan presentarse, por la masificación de este biocombustible.

## BIBLIOGRAFIA

1. [http://www.ec.europa.eu/agriculture/biomass/biofuel/com2006\\_34\\_es.pdf](http://www.ec.europa.eu/agriculture/biomass/biofuel/com2006_34_es.pdf)
2. <http://www.portalplanetasedna.com.ar/combustibles.htm>
3. Laroza, R., Proceso para la producción de Biodiesel, Zoe Tecno-campo, 2001.
4. F. Ma, L.D. Clements, M.A. Hanna. Transesterification of Vegetable oils. ASAE (1998) 41, 1261
5. Knothe, G., Gerpen, J., y Krahl, J., The Biodiesel Handbook. AOCS Press. 2005
6. <http://www.biodiesel.com.ar/articulos>
7. F. Ma, L. D. Clements, M. A, Hanna. Biodiesel Production a review. Bioresource Technology N°70 , 1999 pag 69, 289
8. A.V. Tomasevic, S.S. Siler-Marinkovic. Fuel Processing Technology (2002) 1588
9. Y. Zhang, M.A. Dubé, D.D. McLen, M. Kates. Bioresource Technology (2003) 89, 1
10. Resolución 1289 de 2005
11. Norma EN 14214 Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods.
12. Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y la producción limpia Corcobid,
13. Gerpen, J., Shanks, B., y Pruszko, R., Biodiesel, production Thecnology. NREL, Julio de 2004.
14. Martinez, G., Hemogenes. Manual Practico del Automóvil Motor Diesel. Editorial Cultural S.A. Madrid España : 1999.
15. [http://www.e-petroquimica.com.ar/trabajos/procesos\\_de\\_produccion.pdf](http://www.e-petroquimica.com.ar/trabajos/procesos_de_produccion.pdf)

16. Duarte, D., Torres, J., Cuellar, M, Caracterización de mezclas de combustibles diesel con aceite de palma y metil ester de palma y evaluación en motores y vehículos. Noviembre de 2006.
17. Ajila, V., Chiliquinga, B., “Análisis de Legislación sobre Biocombustibles en America Latina” Artículos técnicos. Olade. Abril de 2007.
18. Owen, K., y Coley, T., Automotive Fuels Reference Book. Second Edition. Appendix 3, World Wide Survey of Emissions Legislation. Society of Automotive Engineers, Inc. 1995.
19. Tong, H.Y., Hung, W.T., Cheung, C.S. “Development of a Driving Cycle for Hong Kong”. Atmospheric Environment 33 (1999). pp 2323-2335.
20. Lyon, T.J., Kenworthy, J.R., Austin, P.I. y Newman, P.W.G. “The Development of a Driving Cycle for Fuel Consumption and Emissions Evaluation”. Transpn Res. Vol. 20A, No. 6, pp447-462. Marzo 1986.
21. Agudelo, J.R., Bedoya, I., Agudelo, A., “Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de de biodiesel de palma” Ingeniería y desarrollo. Número 18. diciembre de 2005.
22. Sheehan. J., Dunahay, T., Benemann, J., Roessler, P., “A look back at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program – Biodiesel from Algae” Julio 1998
23. Agudelo, J., Benjumea, P., Meneses, E., Pérez, J., “Biodiesel, Una revisión del desempeño mecánico y ambiental” Ingeniería y desarrollo. Número 13. Agosto de 2003.
24. Zapata, C., Martinez, I., Castiblanco, E., Uribe, C., “Producción de Biodiesel a partir de aceite crudo de palma: evaluación económica. Dyna, Número 151, pag 83-96. Marzo de 2007.
25. Kinast, J., “ Production of Biodiesel from multiple feedstocks and properties of Biodiesel and Diesel Blends”, NREL, Marzo 2003.
26. Morris, R., Pollack. K., Mansell, E., “Impact of Biodiesel fuel son Air Quality and Human Health” NREL, Mayo de 2003.
27. NTC 100-04, Biodiesel para uso en motores Diesel, Especificaciones.
28. Achury, C., Borrero, L., Echavarria, J., Escobar, E., “ Análisis de la obtención de biodiesel a partir de aceite de palma crudo, metanol y Na OH como catalizadores

- para el diseño de un reactor CSTR. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de los Andes. 2007.
29. Infante, A., "Estudio sobre la prefactibilidad técnica y económica de la producción en Colombia de los derivados del aceite crudo de palma como carburantes para motores de ciclo diesel. Ingeniería y desarrollo. Número 18. diciembre de 2005.
  30. Leevijit, T., Wisutmethangoon, W., Prateepchaikul, G., Tongurai, C., Allen, M., "A second order kinetics of palm oil transesterification. The joint international conference on "Sustainable energy and environment (SEE)" 1-3 December 2004.
  31. Martínez, M., "Evaluación de la Transesterificación en Fase Homogénea de Aceite de Palma con Metanol Empleando Catalizadores Ácidos y Básicos. Tesis de Pregrado. Universidad de los Andes. 2005
  32. Vallejo, S., "Proyecto para la producción de Biodiesel en Colombia". Corpodib 2003.
  33. Agudelo, J.R., Benjumea, P., y Corredor, L. "Biodiesel de Aceite de Palma: una Alternativa para el desarrollo del País y para la Autosuficiencia Energética Nacional". Revista Facultad de Ingeniería, No. 28. Universidad de Antioquia. Colombia. Julio 2003. pp 9-18.
  34. CENIPALMA. "Manual de Laboratorio Plantas de beneficio Primario para Fruto de Palma de Aceite. 1999.
  35. Gómez, V., *et al.* "Biodiesel: Una Alternativa Real al Gasóleo Mineral". *En Ingeniería Química*, Marzo de 2001. pp 1167-1172.

#### INTERNET

36. <http://www.10000socios.com>
37. <http://www.afdc.nrel.gov/altfuel/biodiesel.html>
38. [http://www.ballestra.com/ps\\_biodiesel.htm](http://www.ballestra.com/ps_biodiesel.htm)
39. <http://www.biodiesel.de>
40. [http://www.bodiesel.org/bio\\_reports/jonbreport.htm](http://www.bodiesel.org/bio_reports/jonbreport.htm)
41. <http://bioxcorp.com>
42. [http://www.cti2000.it/biodiesel/intro\\_uso\\_bio.htm](http://www.cti2000.it/biodiesel/intro_uso_bio.htm)
43. <http://www.esemag.com/0501/diesel.html>
44. <http://www.fedepalma.org>
45. <http://www.geocities.com/serviotu/paginas/minimo.html>
46. <http://www.hannover2000.net/expo2000hannover/es/tecnologia/proyectos/biodiesel>
47. <http://www.ipef.br/listas/bioenergia-I/Sep1999/msg00032.html>
48. <http://journeytoforever.org/biodiesel.html>
49. <http://journeytoforever.org/energiaweb/aleks.htm>
50. <http://www.lanacion.com.ar/01/03/05/o50.htm>

51. [http://www.lavozdelinterior.com/2001/0210/nota15422\\_1.htm](http://www.lavozdelinterior.com/2001/0210/nota15422_1.htm)
52. <http://www.reactiondesign.com/>
53. <http://rredc.nrel.gov>
54. <http://siiap.sagyp.mecon.ar/agricu/publicaciones/aceitepalma/hoja11.htm>
55. <http://sitio.de/energia>
56. <http://www.zonaeconomica.com/biocombustibles>