Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
Facultad de Ingeniería Mecánica
Departamento de Energía.

Trabajo de Diploma

Título:
"Ensayos para la elaboración y empleo del biodiesel en Cuba".

Autor: Jaime Guedes Rosa

Tutores:
MsC. Idalberto Herrrera Moya
MsC. Iosvani López Díaz

Curso: 2003-2004
"Año del 45 Aniversario del Triunfo de la Revolución"

"Ser culto es el único modo de ser libre"

José Martí

Dedicatoria

A mi Papá….

A mi hermana…

A todas las personas que creyeron mí….

Agradecimientos

A mi papá…

A mi hermana…

A mi familia…

A mis tutores Idalberto Herrera e Iosvany López…

A todos mis amigos…

A todos mis profesores que me han brindado su conocimiento…

A todas las personas que me han ayudado y que me han dado su apoyo…

A todos …muchas gracias…

Resumen

En el capítulo 1 se hace una exposición sobre el tema Biodiesel tanto a nivel internacional como nacional haciendo énfasis en cuanto a fuentes de materias primas para su obtención, ventajas y desventajas del empleo de su empleo en motores de combustión interna, experiencias de su aplicación a nivel internacional y análisis económico para la producción del biodiesel en Cuba a partir de aceite de Girasol y alcohol extraído de la caña de azúcar con alto grado de pureza.

En el segundo capítulo se muestra especial interés en el método de obtención del biodiesel a escala de laboratorio a partir de alcohol etílico a 97 grados y aceite de girasol, y se muestran las principales pruebas realizadas al biodiesel como combustible.

El último capítulo está dedicado a la parte del banco de pruebas, donde se muestra la metodología para llevar a cabo la realización de los ensayos en motores, se muestra el cálculo del ángulo de avance de la inyección para el cuál se efectuaron las pruebas con ambos combustibles, se comentan los resultados obtenidos de las pruebas de característica exterior de velocidad en cuanto a los parámetros principales del motor y en cuanto a la emisión de gases contaminantes a la atmósfera.

Índice:

	Pág.
Introducción	
Capítulo 1. Revisión bibliográfica sobre la obtención y empleo del biodiesel	4
1.1 Clasificación de los combustibles	4
1.2Necesidad de combustibles alternativos y ventajas de su empleo	4
1.3 Cultivos energéticos.	8
1.4 Perspectivas del cultivo oleaginoso Girasol para la producción de aceite con la finalidad de fabricar Biodiesel.	9
1.5 Ventajas del Girasol para su desarrollo en Cuba	11
1.6 Análisis de los costos y del balance "Diesel-Aceite" del Girasol.	13
1.7 Efecto de los biocombustibles en los procesos de combustión y formación de contaminantes Diesel	14
1.8 Empleo de Biodiesel como combustible en motores de combustión interna.	16
1.9 Antecedentes Internacionales del uso del Biodiesel en motores diesel.	17
1.10 Efecto de los ésteres sobre las emisiones contaminantes.	18
1.11 Principales ventajas del empleo del biodiesel en motores Diesel	21
1.12 Desarrollo del Biodiesel en Cuba	22
1.13 Análisis Económico para la producción de 1 litro de Biodiesel a partir de aceite de girasol y etanol en las condiciones de Cuba	23
1.14 Obtención del biodiesel a escala de laboratorio.	24
Conclusiones parciales del capítulo	25
Capítulo 2. Obtención del Biodiesel como combustible para motores Diesel	26
2.1 Descripción del proceso de obtención del aceite vegetal	26
2.1.1Caracterización de la semilla de girasol	26
2.1.2 Descripción del proceso de prensado de la semilla de girasol	27
2.1.3 Proceso de preparación del aceite.	28
2.2 Elaboración del Biodiesel para ser empleado en el motor del banco de pruebas	29
2.2.1 Precauciones en la elaboración del Biodiesel con alcohol etílico.	29
2.2.2 Procedimiento para la elaboración del Biodiesel empleado en el laboratorio.	30
2.2.3 Pruebas realizadas al Biodiesel como combustible.	33
Conclusiones Parciales del capítulo	37

Capítulo 3. Ensayo de característica exterior de velocidad empleando Diesel y Biodiesel 38
3.1 Descripción del banco de pruebas: 38
3.2 Determinación del ángulo de avance de la inyección en el motor del banco de pruebas 40
3.3 Estimación de la fuerza máxima que actuará sobre la balanza del dinamómetro. 41
3.4 Elementos a tener en cuenta para desarrollar una correcta medición: 42
3.5 Ensayo de característica exterior de velocidad y análisis de gases de la combustión. 43
3.5.1 Equipamiento empleado. 45
3.5.2 Medidas de protección e higiene a emplear 45
3.5.3 Metodología llevada a cabo en el ensayo de característica exterior de velocidad 45
3.6 Descripción y funcionamiento de los equipos empleados en las mediciones de gases de escape. 47
3.7 Parámetros del motor obtenidos en la prueba de característica exterior de velocidad 48
3.8 Discusión de los resultados obtenidos en la prueba de característica exterior de velocidad. 49
3.9 Emisiones de los gases de escape en la prueba de característica exterior de velocidad. 53
Conclusiones parciales del capítulo. 57
Conclusiones generales 58
Recomendaciones 59
Bibliografía 60
Anexos 64

Introducción:

El desarrollo del mundo moderno después de la revolución industrial se ha basado en la explotación de combustibles fósiles, estos, de relativamente fácil obtención, bajo costo de producción y fácil transporte, desplazaron a otras fuentes de energía como la madera, el carbón vegetal y la fuerza animal.

De esta manera el carbón mineral desplazó a la fuerza hidráulica, y este fue luego fue reemplazado por el petróleo, producto que posteriormente influyo por su versatilidad, en la poca utilización de los carburantes biológicos.

Hoy, la posible extinción a mediano plazo de estas reservas fósiles, unido a la mayor incidencia de una conciencia ambientalista y la realidad concreta del deterioro del medio ambiente han modificado la situación precedente, y reactivaron la búsqueda de combustibles más amigables con nuestro medio.

Dentro de los combustibles alternativos que hoy cobran importancia por su valor ecológico se encuentran los biocombustibles, que son, alcoholes, éteres, ésteres y otros compuestos químicos, producidos a partir de biomasa, como las plantas herbáceas y leñosas, residuos de la agricultura y actividad forestal, y una gran cantidad de desechos industriales, como los desperdicios de la industria alimenticia.

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

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

La idea de utilizar productos vegetales en el corazón mismo del motor no es ninguna novedad, sólo con citar la experiencia del creador del motor de encendido por compresión, o motor diesel, del propio Rudolf Diesel, quien utilizó aceite de maní para impulsar una de sus creaciones en la

exposición de París de 1900, nos indica, que las raíces de este asunto se remontan a más de un centenar de años atrás.

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

La sustitución de los combustibles denominados fósiles o tradicionales, derivados del petróleo, por otros, de origen vegetal, cobra una gran importancia en nuestros días por varias razones fundamentales, como el hecho de provenir de una fuente renovable, ser un instrumento de lucha contra el deterioro medioambiental, además de un factor de desarrollo de la agricultura e industrias derivadas.

En el caso particular de Cuba, las limitadas reservas de combustibles convencionales imponen la búsqueda de alternativas energéticas viables a corto y mediano plazo para obtener la energía necesaria a partir de fuentes renovables.

En este sentido debe prestarse especial interés al biodiesel, combustible renovable de origen vegetal derivado de los aceites vegetales, obtenidos de semillas, plantas, o algas oleaginosas, y que puede reemplazar al gasoil fósil en los motores de combustión interna sin ninguna modificación pues sus propiedades son similares a las del combustible diesel derivado del petróleo, además puede ser empleado en mezclas con gasoil convencional de cualquier proporción, este combustible de posible aplicación a cualquier sector, puede ser muy factible sobre todo para el sector agrícola, por la posibilidad de autoabastecerse del insumo fundamental para su obtención, el aceite, y de combinar varias fases de su producción en este caso la fase de obtención de la semilla, extracción del aceite y elaboración del biocombustible lo cual reducen en gran medida los costos

Sin embargo, en nuestro país se dan los primeros pasos relacionados con investigaciones sobre el tema, por lo que resulta en consecuencia importante examinar la factibilidad de desarrollar tecnologías y métodos para la producción y utilización del biodiesel, para lo que resulta imprescindible determinar un cultivo oleaginoso que se adapte a las condiciones edafoclimáticas de Cuba y cubra las necesidades de aceite vegetal en este sentido.

Este trabajo se encuentra relacionado específicamente con la obtención y prueba del biodiesel en motores de combustión interna, planteándose la siguiente investigación.

Hipótesis:

Es factible la obtención de biodiesel en Cuba a partir de materias primas nacionales tales como el aceite de girasol y etanol a un costo similar o inferior a los combustibles fósiles tradicionales y con aptitud para su empleo en motores diesel, para de esta forma reducir el impacto sobre la contaminación ambiental de los motores de combustión interna.

Objetivos generales.

Demostrar la factibilidad de la obtención de biodiesel en Cuba a partir de materias primas nacionales tales como el aceite de girasol y etanol a un costo similar o inferior a los combustibles fósiles tradicionales y con aptitud para su empleo en motores Diesel, para de esta forma reducir el impacto sobre la contaminación ambiental de los motores de combustión interna.

Objetivos específicos:

1. Analizar el estado del arte a nivel mundial y nacional sobre las particularidades de la fabricación y empleo de biodiesel en motores de combustión interna.

2. Demostrar que es factible bajo las condiciones de Cuba la producción de biodiesel a partir de aceite de girasol y alcohol etílico.

3. Demostrar que el alcohol etílico también puede ser utilizado satisfactoriamente en la producción del biodiesel trayendo ventajas desde el punto de vista económico fundamentalmente.

4. Realizar un estudio comparativo al emplear como combustibles el diesel y el biodiesel en el ensayo de característica exterior de velocidad.

Capítulo 1. Revisión bibliográfica sobre la obtención y empleo del biodiesel.

El límite de duración de las reservas mundiales de combustibles fósiles sumado a los daños que el empleo de estos ocasiona al medio ambiente han motivado en el hombre la necesidad de buscar nuevas fuentes de energías para lograr mantener los estilos de vida y el desarrollo de la sociedad moderna, preferentemente las fuentes renovables de energía, las cuales trataremos en este capítulo y además es el tema central de este trabajo.

1.1 Clasificación de los combustibles:

La clasificación más general de los combustibles vendrá dada por su estado de agregación: sólidos, líquidos y gaseosos. Los combustibles comúnmente empleados en los motores de combustión interna son líquidos y gaseosos.

Los combustibles podrán distinguirse en función de su naturaleza, un primer grupo incluiría los combustibles de origen fósil, producto de una transformación natural de la materia orgánica durante millones de años, con una tasa de regeneración mucho más lenta que la del consumo, un segundo grupo incluiría los combustibles renovables producto de una transformación natural de la materia orgánica con tasas características de regeneración que pueden ser del mismo orden de magnitud que las tasas de consumo.

Como combustibles alternativos se reconocerán todos aquellos combustibles procedentes de fuentes renovables, como el Biodiesel; incluyendo en esta clasificación aquellos que aun siendo derivados de combustibles fósiles no son combustibles convencionales, por ejemplo: los combustibles emulsionados o los combustibles residuales.

1.2 Necesidad de combustibles alternativos y ventajas de su empleo:

El actual desarrollo de la ciencia y la técnica lo debemos fundamentalmente a la revolución tecnológica que tuvo un gran paso con la máquina de vapor y posteriormente con el motor de combustión interna, el cuál encontró aplicación en casi todas las actividades.

Conjuntamente con esto se desarrolló la industria de los combustibles, la cuál proveía a los motores de combustión interna de combustibles con cada vez mejores propiedades.

La fuente principal de estos combustibles es de origen fósil y el petróleo es uno de los más usados, por lo que debido a la gran demanda de estos combustibles se están agotando cada vez más las reservas naturales a nivel mundial. Estos combustibles encuentran aplicación tanto en el transporte terrestre, el marítimo como el aéreo y su empleo puede mantenerse durante buena parte del siglo XXI.

La necesidad de utilizar combustibles alternativos en motores de combustión interna se encuentra en función del peso relativo que en cada momento, lugar o circunstancia tengan los factores tecnológicos, energo-socio-económicos, ecológicos o inclusive políticos. No obstante, en la actualidad son fundamentalmente los energo-económicos y ecológicos los que determinan en buena medida la necesidad de utilizar combustibles alternativos en motores de combustión interna. [40] [2] [39]

Entre las ventajas energéticas y socioeconómicas que tiene el empleo de combustibles alternativos en motores de combustión interna pueden destacarse las siguientes:

•**Ahorro de recursos agotables:** Esta será una ventaja mientras los precios de los combustibles fósiles y las restricciones medioambientales permitan su uso. Según previsiones "estáticas" (ritmo de consumo actual), la duración del petróleo disponible será de 40 años según algunos especialistas, ya que en 1997 se estimaba que las reservas mundiales de petróleo ascendían a entre 1.02 y 1.16 billones de barriles, y las de gas fueron estimadas entre 1510 y 1580 billones de metros cúbicos.

Sin embargo, el aumento de los precios de los derivados del petróleo hará que las opciones de uso de combustibles alternativos sean económicamente rentables, dando lugar a un menor consumo de petróleo, haciendo que el período de duración de este recurso se alargue en el tiempo.

•**Diversificación energética.** En la medida que un país o región determinada, diversifica el empleo de portadores energéticos y sus fuentes, tendrá la posibilidad de ser menos dependiente económica y políticamente. A su vez, la diversificación posibilita un modelo de desarrollo económico sostenible [25].

•**Regeneración continua y contemporánea:** Una buena parte de los combustibles alternativos procede de cultivos agrícolas. Esta realidad implica que las fuentes de producción de estos com-

bustibles sean mayoritariamente renovables, con períodos de tiempo característicos de regeneración y consumo del mismo orden de magnitud, haciendo que dichas fuentes además de renovables sean contemporáneas [44].

•**Desarrollo agrícola:** Una fuente renovable de producción de combustibles alternativos con origen en la agricultura permite a la sociedad disponer de una adicional fuente de empleo y de un aprovechamiento de terrenos que en algunos casos no pueden ser usados para otros cultivos por razones de restricciones políticas o de condiciones del terreno [46]. En el caso de Cuba daría empleo a muchos trabajadores incluso a los que han salido del MINAZ por razones de reestructuración y reducción del número de plantillas.

• **Aprovechamiento de residuos:** La manipulación, tratamiento y evacuación de residuos supone un coste energético y económico a las empresas que los producen y si el residuo que se produce puede ser reutilizado como combustible alternativo se estarán resolviendo tres problemas a la vez, el primero, la disminución de portadores energéticos convencionales a usar en el proceso de producción principal de la empresa, el segundo, la reducción de los costes por el tratamiento o evacuación de residuos, y finalmente, la minimización de los costes relacionados con la posible contaminación ambiental.

Si bien los combustibles alternativos poseen importantes ventajas energo-socio-económicas, no menos importantes son las ventajas medioambientales. Entre dichas ventajas pueden destacarse:

•**Menor contaminación ambiental:** En buena medida las propiedades físico químicas de los combustibles alternativos influyen de manera positiva en la reducción de productos contaminantes. Dos ejemplos claros en este sentido se pueden encontrar en el biodiesel y las emulsiones de gas oil. En los primeros, el contenido de oxígeno unido al bajo contenido en especies aromáticas posibilita una menor emisión de hollín e hidrocarburos sin quemar. Por su parte, el uso de emulsiones disminuye las temperaturas de combustión trayendo como consecuencia una menor emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) [12]. Además con el aprovechamiento de los residuos disminuye la contaminación ambiental, no tanto por la reducción de las emisiones, sino como por la eliminación de los mismos.

•**Equilibrio del balance global de CO2:** Dado que la mayoría de los combustibles alternativos proceden de cultivos agrícolas, se puede llegar a establecer un ciclo cerrado entre el CO2 emitido

producto de la combustión y la fijación de éste en los cultivos siguientes y así sucesivamente, tal como puede verse en la figura 1.1

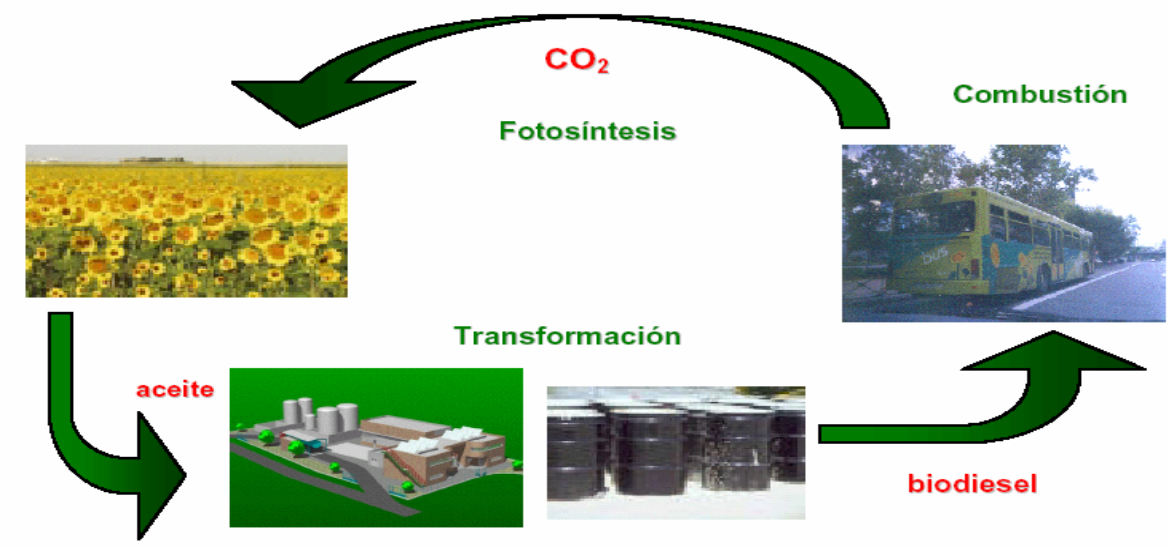


Figura 1.1 Esquema simple del Ciclo de CO2 para el biodiesel [2]

Aunque se prevé una introducción gradual del uso de combustibles alternativos en todos los tipos de transporte fundamentalmente por razones económicas, ésta dependerá de una compleja interacción de varios factores tales como:

- Tendencias en la demanda de los medios de transporte.
- Movimientos en los precios de los combustibles convencionales.
- La facilidad tecnológica de sustitución del combustible convencional.
- Tendencias en el desarrollo y los costos de las tecnologías para obtener los combustibles alternativos.
- Tendencias en el desarrollo y los costos del uso de los combustibles alternativos en las actuales tecnologías empleadas en el transporte.
- Factores externos de tipo político o de
- Efecto positivo sobre el medio ambiente y reducción de la contaminación ambiental requerimientos medioambientales.

Evidentemente, el empleo de combustibles alternativos no sólo posee ventajas, también tiene sus desventajas que hacen que la introducción de los mismos sea la consecuencia de la interrelación de diversos factores anteriormente mencionados.

La principal desventaja de los combustibles alternativos frente a los convencionales es de tipo económico. Los más baratos precios del combustible convencional, debido a que se producen con tecnologías muy asentadas, frente a los precios de los alternativos, hoy por hoy, hace más difícil la introducción de estos últimos, pero en la actualidad con la creciente subida de precio del barril de petróleo pudiera ser más factible la producción de combustibles alternativos [43].

Por otro lado la mayor o menor receptividad de los fabricantes para hacer modificaciones en las tecnologías de producción o en los materiales componentes de partes del motor, hacen de esta situación una desventaja adicional en el empleo de los combustibles alternativos.

1.3 Cultivos energéticos.

Los cultivos destinados a la producción de biomasa con fines energéticos se pueden agrupar en tres tipos atendiendo al destino final de la biomasa [6].

•**Oleaginosos:** Este tipo de cultivo suele emplearse en la producción de aceite para ser quemado directamente o para ser transformado en biodiesel (ésteres metílicos o etílicos de los ácidos grasos de los aceites vegetales) y ser empleado también en la combustión. A este tipo de cultivo es al que le hemos brindado la mayor atención por tratarse de que estos son la fuente principal de materias primas en la elaboración del Biodiesel.

Para dar una idea general, en la tabla 1.1 se presentan, comparativamente, la producción promedio de aceites a partir de las oleaginosas más comunes y sus componentes fundamentales [47],[34], [9].

Tabla 1.1. Producción promedio de algunas de los cultivos oleaginosos más comunes.

Cultivo	Producción (kg de aceite/ha)	Ácidos grasos fundamentales (%)	
Palma africana	5.000	Palmítico	44,4
		Oleico	39,3
		Linoleico	10,0
Coco	2.260	Laúrico	47,1
		Mirístico	18,5
		Palmítico	9,1
Colza	1.000	Erúcico	41,1
		Oleico	18,5
		Linoleico	14,5
Girasol	800	Linoleico	67,5
		Oleico	18,7
		Palmítico	7,0
Cardo	650	Linoleico	59,87
		Oleico	24,95
		Palmítico	10,62
Soja	375	Linoleico	53,7
		Oleico	23,2
		Palmítico	10,6

•**Alcoholígenos:** Suelen utilizarse para la producción de alcoholes con el objetivo de sustituir parcial o totalmente las gasolinas de automoción, así como para la producción de componentes antidetonantes sustitutivos del plomo como el Etil- Terbutil-Eter (ETBE). Y además pueden ser empleados en la obtención de alcoholes de alto grado de alcohol como materia prima para la fabricación de biodiesel y usarlo en motores diesel [52].

•**Lignocelulósicos:** Utilizados para la producción de biocombustibles sólidos utilizables con fines térmicos, fundamentalmente en la generación de electricidad. Asimismo, suelen utilizarse como materia prima en procesos de gasificación para la obtención de gas para quemar en motores térmicos.

1.4 Perspectivas del cultivo oleaginoso Girasol para la producción de aceite con la finalidad de fabricar Biodiesel.

Producción Mundial de girasol y sus derivados.

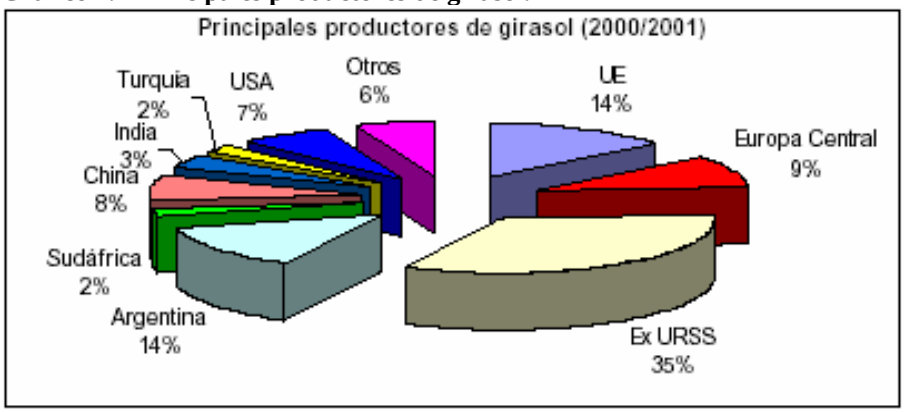
El girasol participa del amplio conjunto de materias primas oleaginosas utilizadas en el mundo para la generación de aceites y grasas, como así también de harinas proteicas destinadas a la alimentación forrajera.

Entre las mas destacadas oleaginosas que existen en el planeta tenemos: soja, colza, semilla de algodón, girasol, maní, almendra de palma, copra, sésamo, lino y semilla de ricino. De los anteriores, el girasol es el cuarto en importancia, con una producción cercana al 9% (se ubica detrás de la soja, colza y algodón) Además de los mencionados, en el mercado se ofrecen grasas de ori-

gen animal como productos de uso alternativo, los que sumados a los anteriores, amplían el número de aceites y grasas de diez a diecisiete [8].

El aceite de girasol es uno de los de mayor calidad de aquellos cuyo uso es mayoritariamente la alimentación humana. Cuenta con una participación del 11% (alrededor de 9,6 millones de toneladas) en un mercado mundial de aceites y grasas que supera los 90 millones de toneladas totales. En el Gráfico 1.2 se muestran los porcientos de producción de los principales productores de Girasol a nivel mundial.

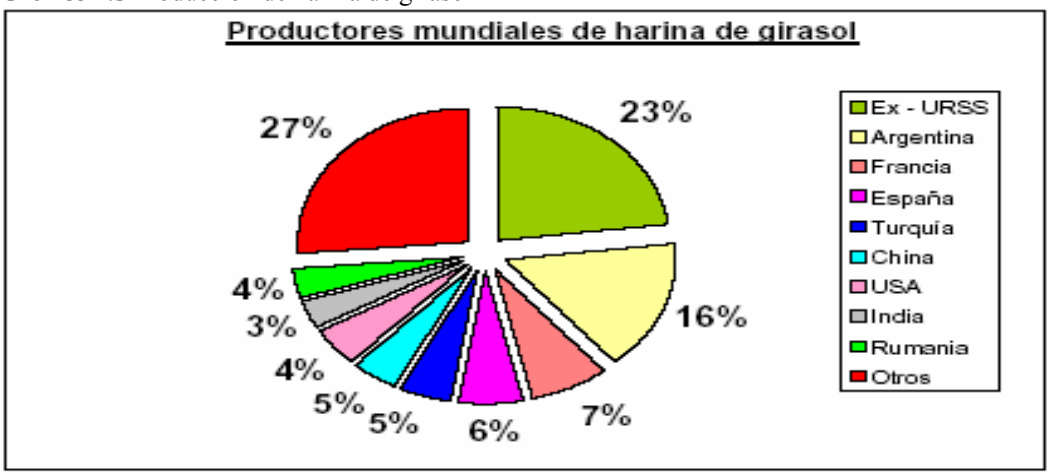
Gráfico 1.2 Principales productores de girasol.



El aceite de girasol goza de premios en su precio, sobre todo cuando la oferta escasea. Sus principales competidores son la soja y la colza. Europa, Rusia, Ucrania y otras repúblicas occidentales de la ex-URSS tienen elevados índices de consumo de aceite de girasol. En Egipto, Argelia, Marruecos y otros países del continente africano (como Sudáfrica) también es relevante su utilización, mientras que en Asia sólo se destaca en Turquía, India y en menor medida China [27].

En Latinoamérica, los mercados de mayor importancia son Argentina, México, Chile y Venezuela con respecto al mercado mundial de harinas proteicas, el mismo se encuentra integrado por alrededor de 12 subproductos derivados del procesamiento de cereales y oleaginosos. En este caso, las tendencias del consumo están dadas por el aporte que cada uno de ellos puede realizar a las raciones destinadas a la alimentación animal. En el gráfico 1.3 podemos ver el porciento de la producción mundial de harina de girasol.

Gráfico 1.3 Producción de harina de girasol



Fuente: Oil World

Los subproductos del girasol participan con casi 5% del total del mercado mundial de harinas, el cual representa algo más de 210 millones de toneladas producidas anualmente.

1.5 Ventajas del Girasol para su desarrollo en Cuba.

Entre las ventajas de la planta de girasol pueden citarse las siguientes:

1. Bajos costos de su cosecha.
2. Facilidad para adaptarse a diferentes condiciones de suelo y clima.
3. Alta capacidad de competir con la maleza por poseer efectos alelopáticos.
4. Gran resistencia a plagas y enfermedades.
5. Alta calidad del aceite obtenido de sus semillas.
6. Facilidad para la extracción de su aceite.
7. Relación favorable entre el aceite y los residuos.
8. Gran utilidad de sus residuos.
9. Capacidad de producción de grandes cantidades de aceite por unidad de área y de tiempo.

Justificación de las ventajas del Girasol en Cuba:

1- Según la carta tecnológica elaborada por Penichet (1997) el costo total para cosechar sobre una ha es de $280 MN.

2- El girasol es una planta anual, de clima continental, muy rústico y poco exigente en abono, de crecimiento rápido y de extraordinaria resistencia la sequía, producto de su profundo sistema radicular. Tiene gran adaptabilidad a diferentes condiciones de suelo y clima así como es re-

sistente al frío y la salinidad, puede desarrollarse con pluviosidad de solo 250mm (en Cuba la media anual es de 1200mm), por lo que no requiere aplicación de regadío ni fertilizantes.(Gadea 1986)

3- Debido a los efectos alelopáticos de este cultivo, no requiere del empleo de herbecidas para el control de las malas hierbas, por lo que después de cosechado deja el terreno limpio lo que facilita el laboreo mínimo para el siguiente cultivo y aporta con su rastrojo una gran cantidad de materia orgánica.

4- Este cultivo es atacado muy poco por plagas y enfermedades, evitando la necesidad de aplicar productos químicos para su control, abaratando el costo de su cultivo.

5- El aceite es de excelente calidad y puede consumirse directamente sin necesidad de refinamiento, su consumo puede disminuir la cantidad de colesterol en sangre y regular el metabolismo. La composición química es la siguiente:

Ácido palmítico	3.5-5.5%
Ácido esteárico	1.5-3.0%
Ácido linoleico	52-63%
Ácido oleico	25-42%
Otros Ácidos	0.5-1.0%

6- Para llevar a cabo la extracción de su aceite solo se debe garantizar una buena limpieza o beneficio de la semilla y una baja humedad que puede lograrse con un secado natural, este cultivo es poco exigente en cuanto a tratamientos a la semilla previos a la extracción. El aceite puede obtenerse a partir de cualquiera de los métodos desarrollados, ya sea extracción mecánica (prensado), extracción por solventes químicos o la combinación de ambos métodos. Lográndose rendimientos de 30 y 52% respectivamente.

7- Según investigaciones realizadas por el Ministerio de la Agricultura (MINAGRI), así como por el grupo de granos perteneciente al Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIAP), de la Universidad Central de las Villas (UCLV), se ha concluido que un hectárea de girasol en secano sin fertilización produce:

1.4 toneladas de granos.

420 litros de aceite.

1.5 toneladas de forraje.

0.6 toneladas de pienso.

8- De la planta de girasol no solo se obtiene el beneficio del aceite extraído de sus semillas, sino que se obtiene además una torta rica en proteínas y de excelentes cualidades para la alimentación de cerdos, aves y conejos con un 22% de grasas y un 22% de proteínas, por otra parte la parte verde de la planta representa forraje para el ganado.

9- El girasol tiene gran rendimiento por unidad de área y tiempo (hasta más de 2 toneladas por hectárea.)

1.6 Análisis de los costos y del balance "Diesel-Aceite" del Girasol.

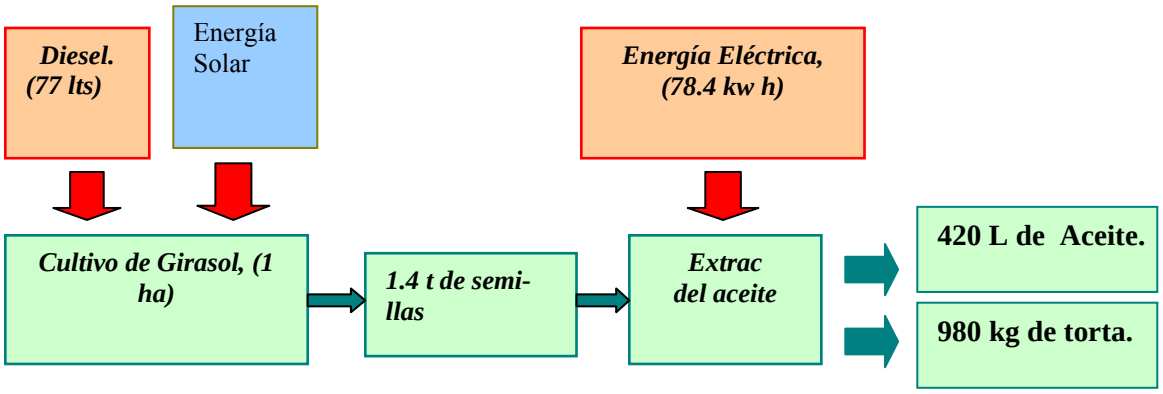
Para la determinación de los costos se tiene en cuenta todo el proceso agroindustrial para la obtención del aceite, es decir desde el cultivo hasta la extracción, según estudios realizados por el Centro de Investigaciones Agropecuarias CIAP de la Universidad Central de las Villas estos costos para el procesamiento de una tonelada de semilla en las condiciones de Cuba entre pueden estar $141.52MN y $79.52MN, correspondientes a un rendimiento del cultivo mínimo(1.4ton/ha) y máximo(1.6ton/ha) respectivamente.

Partiendo de los costos antes mencionados producir 1 litro de aceite en nuestras condiciones tomando un rendimiento en la extracción de un 30 % puede costar entre $0.24MN y $0.43MN según el rendimiento del cultivo.

En 1 hectárea de girasol con un rendimiento agrícola de 1.4(mínimo) ton y un rendimiento en la extracción de un 30% pueden obtenerse 420 litros con un costo total de $180MN, y como coproducto de este proceso se obtendría la torta de girasol rica en proteínas en una cantidad de 980 Kg., esta torta en el mercado tiene un valor de $115 USD/ton por lo que se estaría generando en valores agregados $112.7USD/ha.

Por otra parte en la producción de los 420 litros de aceite se han consumido 97.3litros de combustible desde la fase agrícola y teniendo en cuenta el diesel equivalente a la energía eléctrica gastada en el proceso de extracción. Puede decirse que se producen 4,1 litros de aceite por cada litro de combustible consumido, que de transformarse a Bidiesel serían también 4,1 litro de combustible generado por litro de combustible consumido. Lo anteriormente dicho se ilustra en el gráfico1.4. [30] [36]

Gráfico 1.4: Balance Diesel-Aceite para 1ha de girasol bajo las condiciones de Cuba.



- **Combustible diesel total consumido: 97.3 litros.**
- **Litros de aceite producido por litro de combustible consumido: 4.31**

1.7 Efecto de los biocombustibles en los procesos de combustión y formación de contaminantes Diesel.

Efecto de los aceites y sus ésteres sobre el proceso de combustión:

La utilización de aceites vegetales sin transformar en motores Diesel puede ocasionar graves problemas debidos a una combustión deficiente, por lo que han sido descartados como combustibles en el sector de automoción.

Las principales causas de estos problemas son:

- Elevada viscosidad, del orden de 10 veces superior a la del gas-oil. Esto genera problemas de circulación en el sistema de inyección que hacen necesario el precalentamiento, y además dificulta el proceso de atomización del chorro de combustible inyectado en la cámara de combustión. Este problema puede resolverse utilizando dispositivos precalentadores, ya que al aumentar la temperatura del aceite disminuye la viscosidad del mismo y a unos 90 grados centígrados el valor de viscosidad es aceptable para el funcionamiento óptimo del motor [29].

- Elevado punto de obstrucción de filtros en frío (POFF), que impide su utilización a menos de 10 ºC, y esto no resultaría un problema en Cuba realmente [49].

- Bajo número de cetano, problema especialmente grave en motores pequeños, tales como los de automoción, que por ser más fríos, presentan mayores dificultades para el autoencendido, pudiendo provocar excesivos tiempos de retraso y gradientes de presión por combustión pre-mezclada [15] [18].

- Alto punto final en la curva de destilación, lo que origina deficiencias en la mezcla (debido a una evaporación incompleta) y en la combustión (debido a apagados de llama, formación de partículas y depósitos carbonosos, etc.)

- Descomposición térmica del aceite, previa a la combustión, lo cual también contribuye a la formación de depósitos carbonosos en inyectores, cámara, pistón y válvulas.

Todos estos problemas se agravan en los motores Diesel de inyección directa, en los que la influencia de las condiciones de mezcla y de la formación del chorro es mucho mayor. La incorporación de elementos calentadores en la línea de alimentación del motor no resuelve la mayoría de estos problemas [8], [30].

Los ésteres de aceites vegetales tienen viscosidades comparables y números de cetano similares o superiores a los del gasoil (tal como puede apreciarse en la Tabla 1.2), lo que permite, a pesar de su menor poder calorífico, su utilización en motores Diesel como sustitutos parcial o totalmente del gasoil [56].

Tabla 1.2. Principales propiedades de los aceites vegetales y ésteres de girasol, de colza y de soja en comparación con el gasoil.

	Gasoil	Aceites			Esteres		
		Girasol	Colza	Soja	Girasol	Colza	Soja
Densidad (kg/m³)	830	924	916	924	890	880	885
Poder calorífico inf. (MJ/kg)	43	36.9	37.4	37.0	37.1	37.6	37.2
Poder calorífico inf. (MJ/l)	35.7	34.1	34.3	34.2	33.0	33.1	32.9
Número de Cetano	48/51	33	44/51	34.8	45/46	52/56	50.7
Viscosidad (cSt)	3/5	65.8	77.8	31.3	6.4	7.5	4.0
POFF (ºC)	-20/-10	10/20	10/20	10/20	-1/-3	-12/-15	-
Contenido másico azufre (ppm)	350*	0	0	0	0	0	30

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

A continuación se detallan las principales diferencias de comportamiento con el gas-oil, desde el punto de vista del proceso de combustión: [32],[34],[47],[52]

- Una ligera pérdida de potencia, como consecuencia del poder calorífico ligeramente inferior. Este efecto, se ve parcialmente compensado por la mayor densidad de los ésteres, por lo que el incremento de consumo volumétrico es sólo ligeramente superior.

- Una cierta dilución del aceite de lubricación por mezcla con el éster vegetal, con la consiguiente pérdida de viscosidad, que puede llegar hasta el 5%.

- Una supuesta mayor tendencia a formación de compuestos pesados, debido a la presencia de algunos enlaces insaturados (cuantificados por medio del índice de Yodo), con la consiguiente formación de depósitos y obstrucciones. Algunas experiencias, sin embargo, cuestionan dicha tendencia y por el contrario demuestran cierta capacidad detergente.

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

1.8 Empleo de Biodiesel como combustible en motores de combustión interna.

El inventor del motor diesel, Rudolf Diesel, puso aceite de maní en su creación en el año 1900. Luego, a lo largo del siglo XX se realizaron varias experiencias de utilización de aceites vegetales en los motores de este tipo pero sin obtener mayor repercusión.

El biodiesel es un combustible producido a partir de materias de base renovables, como los aceites vegetales, que se puede usar en los motores diesel. Químicamente constituyen ésteres de alquilo, de metilo y de etilo, con cadenas largas de ácidos grasos. Estas cadenas, al estar oxigenadas, le otorgan al motor una combustión mucho más limpia.

Se encuentra registrado como combustible y como aditivo para combustibles en la Agencia de Protección del Medio Ambiente (Enviroment Protection Agency (EPA)) en los Estados Unidos.

Este éter puede ser producido a partir de distintas fuentes de aceite, tales como, soja, colza, girasol, maní y grasas animales. Este combustible puede utilizarse puro (B100, conocido como “gasoil verde”), o en mezclas de diferentes concentraciones con el diesel de petróleo. La mezcla más utilizada en nuestros días es al 20%, es decir 20 partes de éter vegetal y 80 partes de petrodiesel, y cuando es utilizado como aditivo, sus concentraciones normalmente no superan el 5%.

Recientemente, el biodiesel se ha tomado como una fuente natural e importante de combustible debido a la subida de los precios del petróleo a partir de los años 70s, al eventual agotamiento de los combustibles fósiles y al calentamiento global.

El combustible alternativo es producido a partir de los aceites vegetales convirtiendo a los triglicéridos en ésteres de metilo o etilo, a través de un proceso denominado transesterificación. En el citado proceso se produce la reacción de las tres cadenas de ácidos grasos (cadenas ésteres) de cada molécula de triglicérido, con un alcohol, produciéndose la separación de estas cadenas de la molécula de glicerina. Esta separación necesita temperatura y un potente catalizador básico, como un hidróxido, para que la reacción sea completa.

Finalmente, las cadenas ésteres se convertirán en biodiesel, reteniendo moléculas de oxígeno en su constitución, lo que le otorgará interesantes propiedades en la combustión. Además estas cadenas no contienen azufre, el cual es considerado un potente contaminante medioambiental. Por otro lado, la glicerina, luego de su purificación puede ser utilizada, entre múltiples usos, en la industria farmacéutica y cosmética, donde cuenta con una gran demanda. [42] [3]

1.9 Antecedentes Internacionales del uso del Biodiesel en motores diesel.

A pesar de ser un producto nuevo, el cual todavía no ha creado un importante mercado en los principales países del mundo, ya se está utilizando hace varios años con resultados muy satisfactorios.

Para citar algunos ejemplos significativos, es de destacar que en Estados Unidos el combustible lleva 'recorridos' mas de 15 millones de Km., se lo utiliza en colectivos urbanos, en transporte de aeropuertos, en parques nacionales y en la marina.

En Europa el combustible lleva más de veinte años de uso. En Alemania existe una fuerte demanda de Biodiesel y se vende a un precio menor que el gasoil por la suba del precio de éste, la baja en el precio de la colza y al tratamiento preferencial como producto libre de impuestos, existen unas 800 estaciones de servicio que lo comercializan. Los líderes en volumen son Alemania y Francia, pero también hay producción en Italia, España, Gran Bretaña y el resto de Europa.

En Malasia, los productores fueron consultados por el gobierno acerca de un proyecto para comprometer el 5% de su producción, 550.000 tn, para destinarlas a la generación de energía, el go-

bierno los compraría a un precio básico (precio sostén) con el solo objetivo de mantener el 5% de la generación de energía con biodiesel por razones ambientales para el año 2005.

En Japón hay una empresa que recicla el aceite usado por los Macdonald's produciendo biodiesel.

Asia mantuvo una situación más expectante al principio, pero desde 1997 comenzó a incrementar su producción de manera que, en 1998, ya alcanzó un nivel cercano a las 40.000 ton/año.[15] [16[[43] [17]

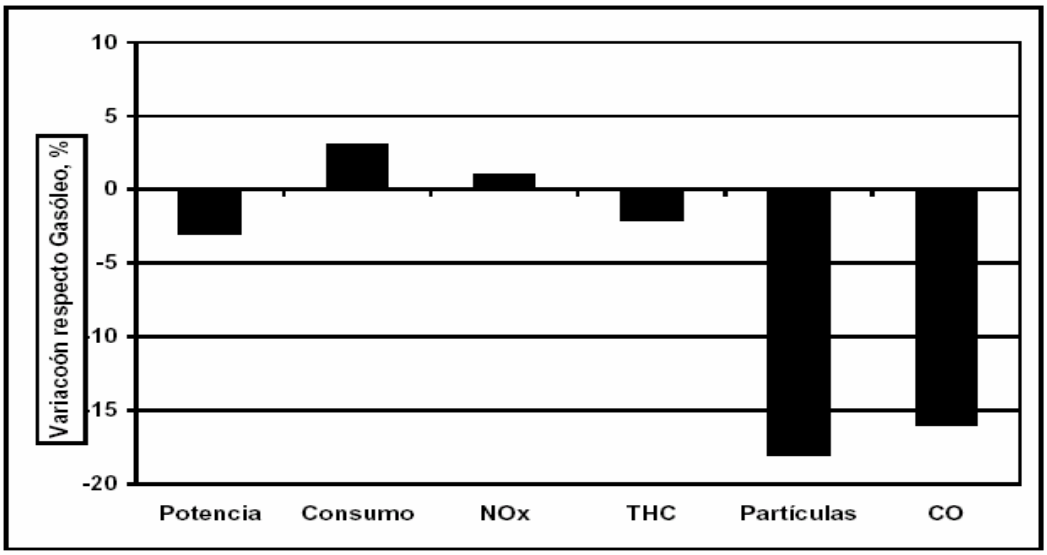
1.10 Efecto de los ésteres sobre las emisiones contaminantes.

Las ventajas del uso de los ésteres de origen vegetal en motores Diesel desde el punto de vista de emisiones, pueden dividirse en ventajas globales y ventajas locales. Son las primeras las que mayores argumentos proporcionan para el fomento del consumo de estos combustibles, pero las segundas no son en absoluto despreciables.

La ventaja de tipo global es la contribución del uso de los biocombustibles tiene sobre la limitación del contenido en CO2 del aire atmosférico. La inevitable emisión de esta sustancia tiene como compensación la absorción por fotosíntesis desde las plantaciones de las que se extrae el aceite, por lo que suele decirse que se cierra el ciclo de vida del CO2, eliminándose por tanto su emisión neta. La característica de gas invernadero del CO2 hace que el aumento de su concentración en la atmósfera (a un ritmo de aproximadamente 1 ppm volumétrica cada dos años) favorezca una serie de fenómenos como son el calentamiento atmosférico, el incremento del nivel del mar, variaciones en la distribución de precipitaciones, etc.

Al margen de dicho beneficio global, el uso de los ésteres tiene otras ventajas basadas en las pequeñas pero a menudo apreciables reducciones en la emisión de algunas de las especies contaminantes típicas de un motor Diesel [13], tal y como aparece en el Gráfico 1.5.

Gráfico 1.5 Variación de las emisiones contaminantes típicas de un motor Diesel usando Gasoil y Biodiesel.[14]



Puede citarse, por ejemplo, la reducción de emisiones de óxidos de azufre y de sulfatos, componente de las partículas, debido al escaso contenido en azufre de los biocombustibles. Tras la reciente limitación en normativas del contenido en azufre de los gasóleos de automoción (en Europa EN-590), este beneficio medioambiental se convierte realmente en un beneficio económico al eliminar la necesidad de someter al gas-oil a procesos de desulfuración.

Por otra parte, el contenido en oxígeno de los biocombustibles (como se muestra en la tabla 3)facilita durante el proceso de combustión, la accesibilidad del oxígeno a los hidrocarburos durante la combustión, lo cual provoca un aumento de la velocidad de la reacción y disminuye la probabilidad de formación de monóxido de carbono, de hidrocarburos sin quemar y, fundamentalmente de núcleos de hollín. Estos últimos, además tienen como principales precursores a los compuestos aromáticos, por lo que también la ausencia de aromáticos y poliaromáticos en los ésteres contribuye a su reducción. A su vez, la menor formación de hollín conduce a menores emisiones de humos y a menores emisiones de partículas. [36] [41] [28] [50]

Las emisiones de hidrocarburos no solo son generalmente menores que con gas-oil puro, sino que además están en mayor proporción compuestos por hidrocarburos de cadena abierta, y en menor proporción por aromáticos, de carácter cancerígeno. Por el contrario pueden encontrarse más compuestos oxigenados lineales, del tipo de los aldehídos y las cetonas, cuyo potencial generador de smog fotoquímico es superior.

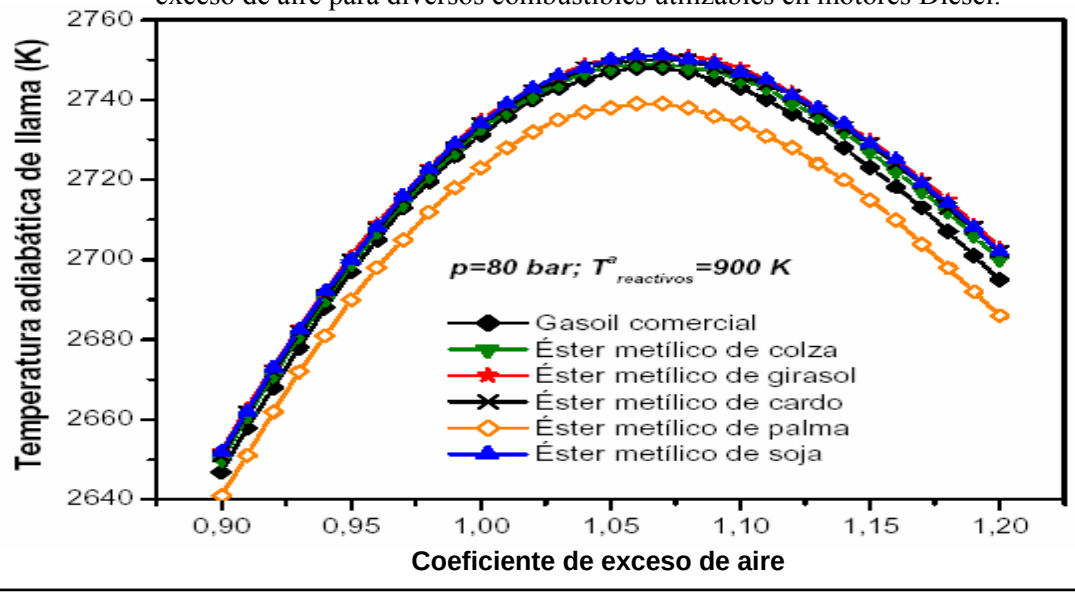
Más difícil resulta generalizar el comportamiento de los biocombustibles frente a la emisión de óxidos de nitrógeno, encontrándose en la bibliografía experiencias en las que el biocombustible provoca ligeros incrementos en las emisiones de NOx y otras en las que se observan reducciones [44], [16]. Esto se debe a que la presencia de oxígeno en la molécula del éster tiene efectos contrapuestos. Por un lado el oxígeno contenido en la molécula asegura la presencia de átomos de oxígeno para combinar con el nitrógeno incluso en las zonas de la llama más inaccesibles al oxígeno.

En contra de este argumento, la exigencia de oxígeno externo para la combustión, supuesta localmente estequiométrica, de cada molécula de combustible, es menor que con el Diesel (tab. 1.3).

Tabla 1.3. Fórmula de sustitución de esteres metílicos vegetales y propiedades químicas.

Ester metílico	Formula resumida del hidrocarburo de sustitución	Peso molecular (g/mol)	Contenido másico en Oxígeno (%)	Relación H/C	Nº medio enlaces dobles	Relación másica estequiométrica aire/éster
Girasol	$C_{18.94}H_{34.82}O_2$	294.58	10.86	1.838	1.53	12.51
Colza	$C_{18.96}H_{35.23}O_2$	295.23	10.84	1.858	1.35	12.54
Soja	$C_{18.83}H_{34.59}O_2$	293.02	10.92	1.837	1.57	12.50
Palma	$C_{18.07}H_{34.93}O_2$	284.24	11.26	1.933	0.60	12.55
Cardo	$C_{18.79}H_{34.68}O_2$	292.64	10.93	1.846	1.45	12.50

Gráfico 1.6. Variación de la temperatura adiabática de llama con el coeficiente de exceso de aire para diversos combustibles utilizables en motores Diesel.



Otro factor decisivo para la formación de óxidos de nitrógeno como es la temperatura de combustión (cuantificada en el gráfico 1.6 a través de la temperatura adiabática de llama), no arroja

grandes diferencias, exceptuando quizá el éster procedente del aceite de palma debido a su mayor grado de saturación.

1.11 Principales ventajas del empleo del biodiesel en motores Diesel.

Es el único combustible alternativo que funciona en cualquier motor diesel convencional, sin ser necesaria ninguna modificación. Puede almacenarse en cualquier lugar donde el petrodiesel se guarda, excepto en tanques de concreto; en elevados niveles de mezcla, produce el deterioro de materiales de goma y poliuretano.

- Por su poder de solvente, el biodiesel produce la limpieza de los tanques usados por el diesel de petróleo. El combustible debe ser almacenado en un ambiente limpio, seco y oscuro, debiendo obviar temperaturas extremas. Por otra parte no requiere mayores cambios en las estaciones de venta.
- Puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el diesel de petróleo**.** La mezcla más común es de 20% de biodiesel con 80% de diesel de petróleo, denominada “B20”.
- El ciclo biológico en la producción y uso de biodiesel reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico, y casi 100% las de dióxido de azufre. La combustión disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados, y entre 75-90% en los hidrocarburos aromáticos. Además, proporciona significativas reducciones en la emanación de partículas y de monóxido de carbono. Según el tipo de motor, puede producir un decremento en emisión de óxidos nitrosos.
- En el balance final no hay aumento de emisiones de dióxido de carbono, ya que las reducidas emisiones en comparación con el petrodiesel, se compensan con la absorción de CO2 por parte de los cultivos oleaginosos.
- Reduce en un alto porcentaje los riesgos de contraer cáncer.
- Contiene 11% de oxígeno en peso y no tiene azufre. El biodiesel puede extender la vida útil de los motores porque posee mejores cualidades lubricantes que el combustible tradicional, mientras que el consumo, encendido, rendimiento, y torque del motor se mantienen prácticamente en sus valores normales.
- Es seguro de manipular y transportar. Es biodegradable, varias veces menos tóxico que la sal de mesa, y tiene un punto de inflamación de aproximadamente 150° C, mientras que el petrodiesel alcanza los 50° C.

- Ya ha sido probado satisfactoriamente en más de 15 millones de kilómetros en EE.UU. y por más de 20 años en Europa.
- Los olores de la combustión en los motores diesel por parte del diesel de petróleo son reemplazados por el aroma de frituras.

Impacto Ambiental:

- Reduce en los escapes la fracción de carbono en partículas.
- Reduce la cantidad de monóxido de carbono.
- Reduce la cantidad de hidrocarburos no quemados.
- Reduce la emisión de hidrocarburos aromáticos policíclicos.
- Reduce la cantidad de óxidos de azufre.
- Los motores diesel ofrecen un beneficio neto de 45 a 71 % menos de emisiones de CO2 en comparación con la gasolina.
- Los cultivos de semillas de aceite vegetal absorben el CO2 mientras crecen, por lo que en el balance no hay aumento en las emisiones.

Impacto económico:

- Aparición de un nuevo mercado.
- Valor agregado al material de base (semillas de aceite).
- Inversiones en plantas y equipos.
- Mayor cantidad de empleos.
- Mayor base tributaria por las operaciones de planta e impuestos de utilidades.

1.12 Desarrollo del Biodiesel en Cuba.

En el caso particular de Cuba, las limitadas reservas de combustibles convencionales imponen la búsqueda de alternativas energéticas viables a corto y mediano plazo para obtener la energía necesaria a partir de fuentes renovables.

El potencial que representa en este sentido el Biodiesel para las condiciones de Cuba aún está comenzándose a estudiar, por lo que resulta en consecuencia importante examinar la factibilidad de desarrollar tecnologías y métodos para la producción y utilización del Biodiesel, así como determinar un cultivo oleaginoso que se adapte a las condiciones edafoclimáticas de Cuba que y cubra las necesidades de aceite vegetal en este sentido. La obtención de Biodiesel a partir de dife-

rentes oleaginosas, es de gran importancia puesto que permite obtener un combustible alternativo de posible aplicación a cualquier sector.

1.13 Análisis Económico para la producción de 1 litro de Biodiesel a partir de aceite de girasol y etanol en las condiciones de Cuba.

Para la realización del análisis económico se tomaron los precios del litro de aceite ya determinados ($0.24 y $0.43) MN (Moneda Nacional), calculados a partir de los costos del proceso agroindustrial para un rendimiento de 1.4 y 1.6 ton/ha respectivamente., el precio del etanol tomado fue de ($30.70 Hl.)MN según los precios de comercialización de la Empresa Heriberto Duquezne, 2004; el precio del hidróxido de potasio ($10USD +$2.3MN)/Kg. recogido en los listados de precios de Reactivos Químicos de Merck, Cienfuegos, 2003.

Los costos del equipamiento, operación y el consumo de energía se calcularon para un procesador de 200 litros de capacidad, operado por dos técnicos durante 8 H por día. El análisis de los costos para un litro de biodiesel se observa a continuación en la tabla 1.4 mostrada a continuación:

Tabla 1.4: Análisis de costo para 1 l de Biodiesel en Cuba.

Insumos	Cantidad	U/M	Costos($)MN	Costos($)USD
Aceite	1	L	0.24*	_
			0.43**	_
Etanol	0.3	L	0.092	_
Hidróxido de potasio	0.009	Kg.	0.021	0.095
Costo del equipamiento				
Planta productora de BD				0.13
Costo de operación planta				
Salario			0.029	
Energía			0.000176	
Costo total			**0.384***	**0.23**
			0.574**	**0.23**

*para el caso de un rendimiento agrícola del girasol de 1.6 t/ha
**para el caso de un rendimiento agrícola del girasol de 1.4t/ha

Como se puede apreciar en los resultados del análisis económico, el costo estimado de un litro de biodiesel producido en nuestro país a partir de aceite vegetal de girasol y etanol proveniente de la industria azucarera oscila entre $0.38MN y $0.23 USD 0 $0.57MN y $0.23 USD dependiendo de los rendimientos agrícolas del cultivo de girasol por lo que su producción resulta factible, no sólo por los resultados económicos que se alcanzan, sino por la posibilidad de hacerlo con un 90% aproximadamente de materias primas nacionales. Además, si se tiene en cuenta el valor agregado

presente en los coproductos asociados al proceso de elaboración del biodiesel, incluyendo todo el proceso agroindustrial (torta residual de extracción y glicerol), producir un litro de biodiesel requiere una inversión de $(0.38-0.57) MN y puede generar hasta $1.05 USD.[33] [35]

1.14 Obtención del biodiesel a escala de laboratorio.

El biodiesel es un combustible elaborado a partir de aceites vegetales (de soja, algodón, girasol, maíz) o grasas animales (sebo, tocino), apto para su empleo como sustituyente parcial o total del gasoil en motores diesel, sin que resulten necesarias conversiones, ajustes o regulaciones especiales del motor. Técnicamente consiste en ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos naturales.

El Biodiesel puede ser obtenido con alcohol etílico o alcohol metílico, de ellos el más adecuado es el alcohol metílico, pero debido a su gran coste en nuestro país utilizamos el alcohol etílico, el cuál deberá tener un alto grado de alcohol, ya que de lo contrario no se producirá la reacción que dará lugar al Biodiesel.

En este caso empleamos un alcohol con 97,8 grados, y además lo sometimos a un posterior secado con hidróxido de calcio, con lo cuál mejoramos aún más el grado de alcohol.

En el capítulo 2 se describe todo lo referente al proceso llevado a cabo en la elaboración del Biodiesel y se muestran imágenes de las diferentes etapas de su obtención.

Conclusiones.

1. El empleo del Biodiesel como combustible es conocido ampliamente en todo el mundo, sin embargo en Cuba no se reportan investigaciones sobre este tema.

2. Por los altos beneficios que se mencionan por diferentes autores a partir de las experiencias en el empleo del biodiesel debe concedérsele una mayor importancia a su desarrollo en Cuba como una alternativa de combustible renovable de fácil obtención.

Capítulo 2. Obtención del Biodiesel como combustible para motores Diesel.

En este capítulo se describe el proceso de obtención del aceite a partir de la semilla del girasol, se caracterizó la semilla, se describe además todo el proceso de filtrado, decantación y preparación del aceite para la elaboración del Biodiesel, además de todo el proceso de su obtención y se muestran también las pruebas realizadas al combustible obtenido.

2.1 Descripción del proceso de obtención del aceite vegetal.

La extracción del aceite de la semilla del girasol se efectuó en el instituto politécnico "Lázaro Cárdenas". Para lo cuál se empleó una máquina de prensado continuo de tornillo sinfín, a continuación se describen las particularidades de la extracción del aceite.

2.1.1. Caracterización de la semilla de girasol:

La variedad de girasol con la que se realizan los experimentos es Caburet 15, que se encuentra incluida en el registro nacional de variedades comerciales. La cantidad a procesar en la máquina de extracción de aceite es de 108 kg.

Para realizar el cálculo de la densidad de la semilla se llenaron por caída libre varias probetas graduadas hasta el nivel de 250 ml cada una y se determino el peso de las semillas. Este proceso se repitió varias veces para minimizar el error.

El valor promedio de densidad de las semillas fue de 0.308 gramos/cm^3.

En la figura 2.1 se muestra la semilla de girasol antes de ser llevada a la máquina de extracción.

Figura 2.1. Semilla de Girasol empleada en la extracción de aceite

2.1.2 Descripción del proceso de prensado de la semilla de girasol.

Para la extracción del aceite se emplearon 108 kgs (240 lbs) de semilla de girasol. La máquina de extracción del aceite es del tipo de tornillo sinfín, con la cuál se puede obtener un rendimiento máximo en la extracción de hasta un 32% [3]. En este caso los rendimientos fueron bajos, si se considera que para las 240 libras de semilla con un rendimiento de 25% se deben colectar alrededor de 60 libras de aceite, y solamente se colectaron 40 libras que equivalen a 20 litros de aceite en total.

El bajo rendimiento en la extracción del aceite de la semilla se debe principalmente a los siguientes factores:

1- Mal estado técnico de la máquina.
2- Bajo porciento de aceite contenido en la semilla.

El estado técnico de la máquina es un factor muy importante en el rendimiento en la extracción del aceite [67]. La máquina que empleada mostraba un alto desgaste en el tornillo sinfín, y en las arandelas de la carcasa; debido a esto la extracción de aceite se afectó en un valor considerable, necesitando hacer varias pasadas de la torta para lograr una extracción de aceite aceptable y aún así no se lograron los resultados esperados.

El bajo porciento de aceite contenido en la semilla es otro factor que afectó severamente el rendimiento de aceite en la extracción, en este caso la semilla provenía de un frigorífico y anteriormente a esto sufrió un proceso de secado muy prolongado lo que trajo consigo el bajo rendimiento en aceite.

Para obtener un buen rendimiento es necesario que la semilla sea cosechada y pase por un proceso de secado muy corto, ya que de ser muy extenso puede acidificar la semilla, o disminuir considerablemente su contenido de aceite. El tiempo de almacenamiento de la semilla también deberá ser lo más corto posible [40].

La torta de Girasol obtenida del proceso de prensado de la semilla se muestra en la figura 2.2, la cuál tiene alrededor de una 23 % de aceite aún y cerca de un 22 % de proteínas, esta torta puede ser empleada satisfactoriamente como alimento animal una vez que sea triturada por sus excelentes cualidades nutritivas.

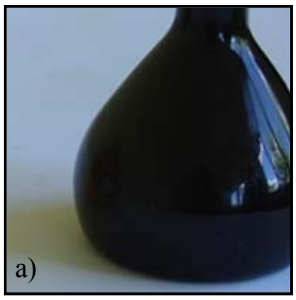
Figura 2.2. Torta de Girasol obtenida después del prensado.

2.1.3 Proceso de preparación del aceite

El aceite extraído de la prensa contiene un alto grado de impurezas y sólidos en suspensión, los cuales es necesarios eliminar en un alto grado para garantizar la utilización del aceite en motores de combustión interna; ya que pueden crear desgaste, obstrucciones y disminución de los parámetros energéticos del combustible, así como también puede traer consigo la oxidación de partes y piezas en los motores de combustión interna principalmente en el sistema de alimentación [23].

El aceite extraído se filtró primeramente en la máquina de extracción en un tamiz de 5.66 a 7.9 mm, posteriormente pasó a otro tamiz de 4.0 a 5.66 mm, y finalmente se pasó por un tamiz de 1mm , en ellos se quedaron las impurezas de mayor tamaño, posteriormente se dejó decantar por un día y se extrajo el aceite que estaba en la parte superior. Este presentaba coloración amarilla y mejores propiedades, posteriormente se dejó decantar nuevamente por 3 días y se extrajo el aceite de la parte superior quedando en el fondo del recipiente los sedimentos con materias extrañas.

En la figura 2.3 se pueden apreciar dos muestras de aceite, la de la derecha es la que representa el aceite obtenido después del proceso de extracción del aceite de la semilla del girasol, y el de la izquierda representa una muestra después del proceso de decantación



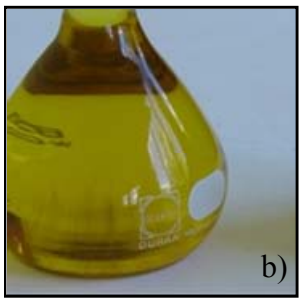


Figura 2.3 Muestras de aceite, a) acabado de extraer aceite, b) después de la decantación.

A continuación en la figura 2.4 anexo se puede ver una muestra de aceite en decantación, como se aprecia tiene una gran cantidad de sedimentos de coloración oscura que se van quedando en el fondo del recipiente y puede tener también algo de humedad en dependencia de las condiciones en que se encontraba la semilla, mientras que en la parte superior tiene un coloración amarilla transparente, ya aceite listo para usar.

Figura 2.4. Aceite en decantación.

El aceite restante que quedó en la parte inferior de los recipientes de decantación todavía con sólidos en suspensión se le dejó decantar por más tiempo y se le hace un proceso análogo al descrito anteriormente, pero como que cada vez los sólidos en suspensión son de partículas más pequeñas el tiempo de decantación deberá ser mayor.

Todo el aceite limpio extraído en la decantación se vierte ahora en un recipiente adecuado y se calienta hasta 110 grados Centígrados para de esta forma eliminar la posible humedad que pudiera tener siendo este el último paso para la preparación del aceite para fabricar el biodiesel.

2.2 Elaboración del Biodiesel para ser empleado en el motor del banco de pruebas.

A continuación se expone todo el procedimiento desarrollado en la fabricación del Biodiesel, así como las precauciones más importantes a tener en cuenta durante su elaboración, y se indican además las pruebas que se le realizaron a este combustible comparándolas con la referencia bibliográfica existente[47].

2.2.1 Precauciones en la elaboración del Biodiesel con alcohol etílico:

- Los hidróxidos de sodio y potasio pueden ser peligrosos si no se manejan con el cuidado necesario.

- El equipo mínimo para quien elabora Biodiesel es un buen par de guantes de pvc, un par de anteojos de seguridad por si hubiera salpicaduras, y un delantal de pvc.
- El lugar de trabajo debe ser bien ventilado, y alejado de toda fuente de llama o chispa que pudiera encender los vapores de alcohol, que son altamente inflamables.
- Se necesita buena iluminación, y una mesa para trabajar que sea fácil de limpiar, donde se colocarán los elementos a usar e instrumentos necesarios.

2.2.2 Procedimiento para la elaboración del Biodiesel empleado en el laboratorio.

1. Determinación de la cantidad de catalizador necesaria para neutralizar los ácidos libres en el aceite.

Se preparo una disolución de hidróxido de potasio al 1 por 1000 (0,1 %), para ello se disolvieron 0,25 gramos de hidróxido de potasio en 250 militros de agua.

Se disolvió un mililitro de aceite en 9 militros de alcohol isopropílico y se agitó hasta que se mezclaran los dos componentes, a esta muestra se le añadieron 10 gotas de fenolftaleína y se mezcló permaneciendo incolora, lo que indicó el carácter ácido, tal como puede verse en la figura 2.5.

Figura 2.5. Solución de alcohol isoprorpílico y aceite después de agregarle la fenolftaleína.

Se añade entonces un mililitro de la disolución de hidróxido de potasio a la solución del aceite y se torno ahora rosado pálido, tal como se muestra en la figura 2.6, indicando de esta forma un carácter básico que es lo que se quiere lograr, el rosado ténue solo duró unos pocos segundos en esta disolución con PH=7.8 de aquí se concluye que es preciso añadir a la cantidad de 9 mg de KOH por litro un miligramo más por cada litro de aceite.

Figura 2.6 Solución de alcohol isopropílico y aceite después de agregarle la solución de KOH.

Pero como que la cantidad de aceite que se empleo para cada corrida fue de 800 mL la cantidad estimada de catalizador fue de 8,8 gramos de catalizador para cada caso.

2. Una vez determinada la cantidad de catalizador a emplear se calentaron 800 ml de aceite a **60** grados Celsius, tal como se muestra en la figura 2.7.

Figura 2.7. Aceite en calentamiento.

Figura 2.8. Apariencia del KOH empleado.

3. Se pesó el hidróxido de potasio correspondiente a esa cantidad de aceite (8,8 gramos). La apariencia del KOH empleado puede verse en la figura 2.8.

4. En un beaker montado en un agitador magnético se vertieron 240 mililitros de etanol a 97,8 grados y se le añadió el hidróxido de potasio (en la figura 2.8 se muestran la apariencia del hidróxido de potasio), se puso en marcha el agitador magnético a una velocidad de 1200 r.p.m hasta que todas las granallas de hidróxido de potasio se disolvieran en el alcohol, Transcurrido un tiempo de 2:30 minutos se disuelve completamente el hidróxido de potasio

5. Se le añaden los 800 mililitros de aceite a **60** grados Celsius a el beaker que contiene el alcohol y el catalizador en el agitador magnético y se continúa agitando la mezcla.

6. Se mantiene esta velocidad durante 15 minutos, tal como se muestra en la figura 2.9.

Figura 2.9. Proceso de mezclado para la obtención del Biodiesel

A los pocos segundos de estar agitando la mezcla antes descrita se nota un cambio de coloración del amarillo transparente de la figura 2.7 a un carmelita transparente como el de la figura 2.9.

7. Al cabo de este período de tiempo se detiene el proceso de mezclado.

8. A continuación se vierte el contenido del beaker en separadores.

9. Después de 12 horas de decantación se coloca un recipiente apropiado debajo del separador y se abre la llave del mismo hasta lograr toda la extracción del biodiesel.

Figura 2.10. Proceso de decantación del Biodiesel.

10. Fin del proceso de obtención del biodiesel.

Es necesario destacar que se hicieron pruebas con muestras con exceso de alcohol de un 10 % y no se encontraron diferencias en el Biodiesel obtenido, y sin embargo se acortó el tiempo de disolución del catalizador en el alcohol llegando a disolverse en 2 min y 10 segundos

También se efectuaron pruebas utilizando alcohol absoluto y se pudo apreciar que la reacción de transesterificación ocurrió más rápido, pero sin embargo no nos fue posible la separación de las fases al menos por el método tradicional del decantador.

Cuando decantó la mezcla de glicerol y Biodiesel resultó que el Biodiesel quedó en la parte inferior del decantador figura 2.10, mientras que el glicerol se quedó en la parte de arriba. Esto entra en contradicción con la bibliografía, sin embargo el biodiesel obtenido fue sometido a las pruebas de combustible y los resultados obtenidos fueron aceptables en cierta medida y además fue ya probado como combustible en un motor de combustión interna alcanzándose los resultados esperados según la bibliografía consultada al respecto, y las experiencias internacionales que existen sobre esta temática.

2.2.3 Pruebas realizadas al Biodiesel como combustible.

A biodiesel elaborado se le hicieron algunas pruebas sencillas para chequera sus propiedades, estas pruebas se les hicieron además al Diesel, al aceite y a la glicerina obtenida para compararlos y tener algunas referencias. A cada uno de los elementos antes mencionados se le midió la viscosidad dinámica y se calculo la densidad y la viscosidad cinemática.

A continuación en la tabla 2.1 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 2.1 Propiedades determinadas de las sustancias en el laboratorio.

Sustancia	Viscosidad dinámica (μ, Pa-seg)	Viscosidad cinemática (v, cm^2/seg)	Densidad (ρ, kg/ltr)	Viscosidad dinámica (μ, centipoise)	viscosidad cinemática (v, cm^2/seg)	Densidad (ρ, kg/ltr)
	A 34ºC			A 40ºC		
Diesel	0.005	0.060	0.839	0.0046	0.055	0.835
Biodiesel	0.014	0.163	0.881	0.013	0.146	0.877
Aceite	0.036	0.399	0.910	0.032	0.374	0.898
Glicerol	0.006	0.068	0.866	0.0055	0.061	0.857

Además se determino el PH**,** cuyos valores se muestran a continuación en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valor de PH medido para Diesel, Biodiesel y Glicerol.

Sustancia	PH a 25 ºC
Diesel	6.24
Biodiesel	7.85
Glicerol	7.8

Por otra parte la norma ASTM ha especificado distintas pruebas que se le deben hacer a los combustibles para asegurar su correcto funcionamiento. Estas son las siguientes:

Flash Point: Es de vital importancia por los requerimientos legales en lo que respecta a la seguridad en el manejo y almancenamiento del mismo.

Viscosidad: Para algunos motores, puede llegar a ser ventajoso especificar un mínimo de viscosidad debido a la pérdida de potencia por parte de la bomba inyectora y pérdidas de combustible en el inyector. Un límite admisible máximo, por otro lado, es necesario por cuestiones de diseño y tamaño de los motores, y las características propias del sistema de inyección. Este límite es mayor que el del gas oil, por lo que las mezclas de este último con Biodiesel, reducen la viscosidad del mismo.

Cenizas Sulfatadas: La formación de cenizas puede estar presente en tres formas distintas: 1_ Sólidos abrasivos, 2_ Jabones metálicos solubles y 3_ Catalizador remanente. Los sólidos abrasivos y el catalizador remanente pueden provocar un desgaste prematuro del inyector, la bomba inyectora, pistones y aros y formación de depósitos en el motor.

Sulfuros: El efecto que puede ocasionar la presencia de sulfuros puede variar considerablemente dependiendo en gran medida de las condiciones de operación. Afecta principalmente el comportamiento de los sistemas de control de emisiones.

Corrosión al Cobre: Es importante ya que se puede determinar la presencia de ácidos o contenido de sulfuros que puede provocar corrosión en el motor.

Número de Cetanos: El número de cetanos es una medida de las calidades de ignición del combustible y la presencia de humos negros y rudeza de marcha. Los requerimientos del número de cetanos dependen del diseño, tamaño, variación de carga y velocidad y las condiciones atmosféricas.

Punto de enturbiamiento (Cloud Point): Define la temperatura a la cual comienzan a formarse pequeños cristales dentro del combustible. Es importante ya que define el comportamiento del combustible en condiciones climáticas a baja temperatura.

Residuo Carbonoso: Da una medida de la tendencia del combustible a formar depósitos de carbono.

Número ácido: Determina el nivel de ácidos grasos libres presentes en el combustible. La presencia de los mismos puede incrementar los depósitos y la corrosión.

Glicerina libre: Determina la cantidad de glicerina libre dentro del combustible. Un alto contenido de la misma puede bloquear los inyectores y obstruir los conductos de combustible.

Glicerina Total: Determina el total de glicerina en el combustible, tanto libre como no libre. Un bajo nivel de la misma asegura que ha habido una alta conversión de aceites o grasas en ésteres monoalquílicos. Un alto contenido de mono-, di- y triglicéridos puede bloquear los inyectores y afectar el funcionamiento en climas fríos.

Atendiendo a estas normas se realizaron además pruebas para caracterizar el biocombustible a partir de la determinación de sus principales propiedades en el Laboratorio de Combustibles y Lubricantes de la División Centro de los Ferrocarriles de Cuba y los resultados obtenidos se muestran a continuación de forma comparativa con la norma ASTM, establecida para Biodiesel en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Resultados de los ensayos realizados al Biodiesel.

Propiedades	**Resultados**
Viscosidad 40ºC	12,1 cSt
Punto de inflamación CA	190 ºC
Punto de inflamación CC	134 ºC
Agua y sedimentos	Ausencia
Corrosión Lam Cobre	1b
Impureza Mecánica	Ausencia
Densidad	0,9057g/cm^3
Índice de viscosidad	229
Agua por destilación	Ausencia

El biodiesel producido a partir de aceite vegetal de girasol resultó tener buena calidad según los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el Laboratorio de combustibles y Lubricantes.

La viscosidad cinemática del éster fue medida con un viscosímetro Saybolt, y resultó ser de 12,1cSt a 40ºC encontrándose por encima de los valores permisibles entre los 1.9 y 6.0 cSt exigidos por la normativa ASTM.

La viscosidad del aceite de girasol es de 35 cSt, por lo que se logró en gran medida reducir la viscosidad del aceite con el proceso de transesterificación auque no todo lo deseado, cuestión que requiere ser analizada con investigaciones más profundas a escala experimental.

La densidad, por su parte, fue de 0.905 g/cm^3, este parámetro no aparece registrado por la normativa ASTM aunque si existen países como Argentina que lo tienen en cuenta y exigen un valor de 0.875-0.900 g/cm^3. En el caso de esta propiedad, el biodiesel obtenido se encuentra en el límite

superior, cuestión que entendemos que no influya grandemente en el funcionamiento del motor de combustión interna.

El ensayo de corrosión al cobre, que por norma ASTM D130 no debiera superar el No. 3b, no llegó a tal nivel, dado que no se observó evidencia alguna de deterioro del metal, el valor determinado fue 1b.

El punto de inflamación (flash point) del éster obtenido fue superior a los 100ºC establecidos por la norma ASTM. Tomando valores de 190 ºC, para el caso del ensayo con copa abierta y de 134 para el caso del ensayo con copa cerrada.

La norma ASTM D6751 que regula la calidad del biodiesel, estipula un máximo de agua contenida de 0,05% en peso. En el caso de la muestra de biodiesel obtenido a partir de aceite vegetal de girasol según los ensayos realizados estos muestran ausencia de agua para el producto ensayado. Este resultado fue obtenido tanto por el ensayo por centrifugado como por destilación de la posible agua contenida en la muestra.

Es necesario señalar que no fue posible determinar algunas de las propiedades del biodiesel contenidas en la norma ASTM, debido a problemas materiales como la no existencia de reactivos y equipamiento necesario para estos fines. No obstante a esta limitación, considerando la importancia de algunas de las propiedades determinadas y los resultados obtenidos, se puede plantear que resulta viable utilizar el cultivo de girasol como proveedor de la materia prima fundamental para la producción de biodiesel en nuestras condiciones.

Conclusiones:

1. Es posible obtener biodiesel, en gran medida con materias primas nacionales, a partir de la utilización de aceite vegetal de girasol y etanol a 97,8 grados.

2. Es factible el empleo de Girasol como materia prima en la fabricación del Biodiesel en el caso de Cuba.

3. El Biodiesel obtenido a través del alcohol etílico y aceite de Girasol presenta una viscosidad que aunque está todavía un poco por encima de la registrada en la norma ASTM todavía es aceptable para el empleo en motores Diesel.

Capítulo 3. Ensayo de característica exterior de velocidad empleando Diesel y Biodiesel.

En este capítulo se muestran los resultados que se alcanzaron a partir de los ensayos de característica exterior de velocidad empleando como combustible diesel y biodiesel, además se describen los métodos y equipos de medición empleados en el experimento así como el banco de pruebas, por otra parte se da el comportamiento de las emisiones de gases producto de la combustión para cada tipo de combustible a diferentes cargas del motor.

3.1 Descripción del banco de pruebas:

El banco de pruebas donde se realizaron los ensayos consiste en un motor de fabricación cubana conocido como MOTOCUBA, de cuatro tiempos, con inyección por precámara, y enfriamiento por agua y con arranque manual o por motor eléctrico, dicho motor se encuentra acoplado mediante un acoplamiento por tornillos tipo brida a un dinamómetro de copa que es el encargado de transmitirle carga, puede verse en la figura 3.1.

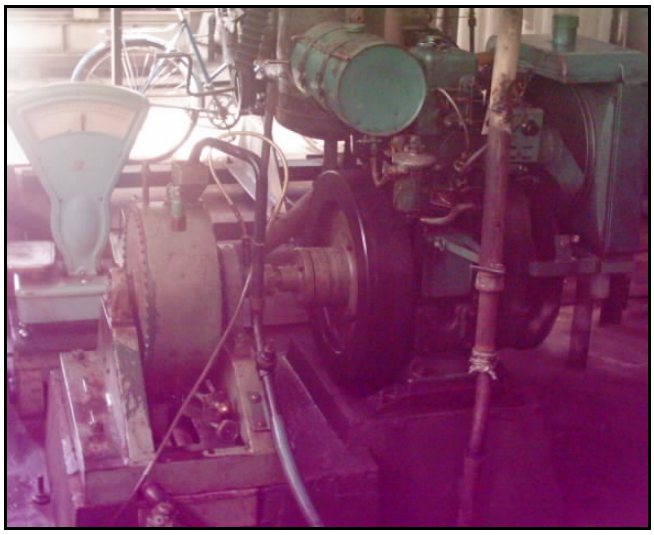


Figura 3.1. Banco de pruebas.

Las características técnicas del motor y el dinamómetro pueden verse en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características técnicas del motor y el dinamómetro.

Marca del motor.	Moto Cuba
Cilindrada	860 cc
Diámetro del cilindro	100 mm
Carrera del cilindro	110 mm
Potencia máx.	8 kW
Dinamómetro.	Dinamómetro de copa
Brazo	0.65 m
Fluido de trabajo	Aceite para motor o transmisiones.
Fluido de enfriamiento.	Agua

El dinamómetro cuenta con un sistema de enfriamiento por agua que debe evacuar el calor que se genera al frenar motor, el fluido encargado de frenar el motor es el aceite que se usa en este caso como fluido de trabajo, según la cantidad de este que se introduzca a través de una bomba manual habilitada a tal efecto será la intensidad de la carga que se le impondrá al motor.

El dinamómetro esta formado por una parte móvil y otra fija, la parte móvil esta accionada por el árbol que esta conectado al motor, y la parte fija se encuentra acoplada el estator del dinamómetro que en este caso seria el cuerpo del dinamómetro, y esta parte además se encuentra soportada por dos pedestales con rodamientos que permiten que gire en dinamómetro en un solo eje, el cuerpo del dinamómetro esta unido a una barra de acero de sección cuadrada con una longitud de 0,65 m que permite accionar la balanza y de esta forma ejecutar las mediciones de torque y potencia, en la figura 3.2 a) y b) se muestran los detalles del banco de pruebas en una vista frontal a) y una vista superior b).

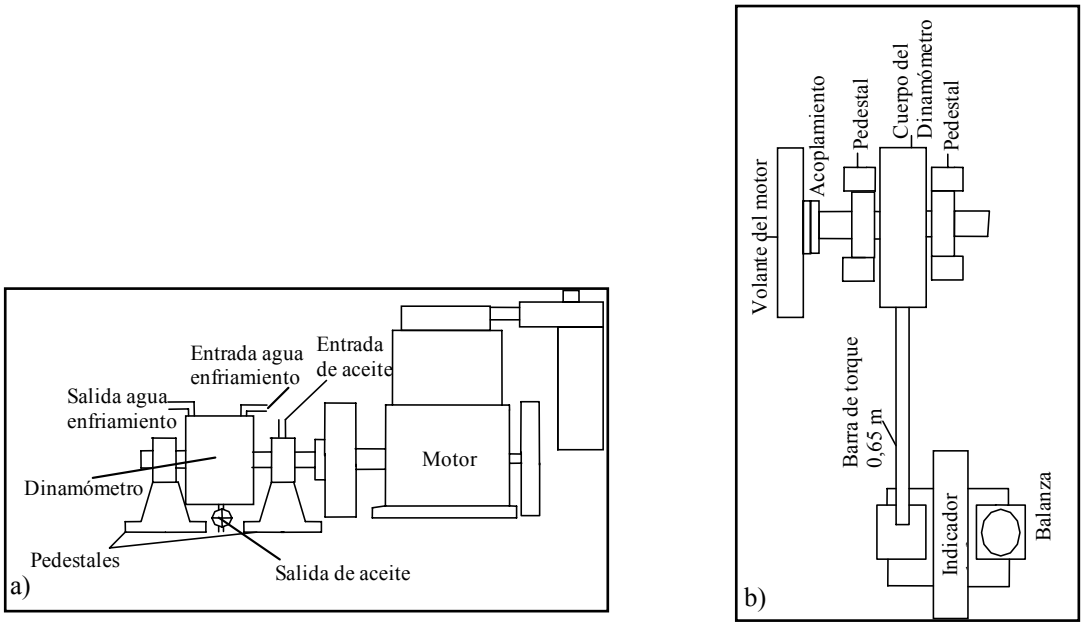


Figura 3.2. Detalles del banco de pruebas, a) Vista Frontal, b) Vista superior.

Antes de realizar las pruebas definitivas para cada tipo de combustibles fue puesto a punto el motor en cuanto al ángulo de avance de la inyección, debido a que en ensayos preliminares el motor presentaba un calentamiento excesivo en condiciones de carga, especialmente al emplear el Biodiesel como combustible, llegando la temperatura del agua de enfriamiento hasta 95 ºC, por lo que se estimó adelantar el ángulo de inyección. Es conocido que cuando el ángulo de inyección se encuentra muy retrazado se eleva la temperatura de trabajo del motor además de provocar perdidas de potencia y elevada temperatura de los gases de escape.[32] [21]

3.2 Determinación del ángulo de avance de la inyección en el motor del banco de pruebas.

Para lograr un buen funcionamiento y un buen arranque del motor es necesario que el ángulo de avance de la inyección del combustible sea el apropiado para el tipo de combustible que se emplea y la velocidad de rotación a la que motor opera, etc.

Al emplear Biodiesel como combustible el tiempo de retardo de la combustión se incrementa respecto al diesel bajo las mismas condiciones, esto se debe a que este combustible tiene un punto de inflamación mayor y para contrarrestar esto se debe adelantar la inyección un ángulo mayor que con Diesel.

Para la determinación del ángulo de avance se parte de las marcas del volante que indican el punto muerto superior (al hacerlo coincidir con el punto de referencia ubicado en el block del motor), por otro lado se desconecto el tubo de combustible que va hacia el inyector y se conecto a la salida de la bomba un capilar transparente para detectar el comienzo de la inyección al hacer girar el volante.

Cuando se hace girar el volante lentamente y comienza a subir la columna de combustible por el capilar se esta en presencia del comienzo de la inyección, y se hace una marca en el volante en este punto tomando como referencia también el mismo punto del block del motor mencionado anteriormente.

Una vez marcado el volante se miden las distancias entre ambas marcas, y se mide también el diámetro del volante para la posterior determinación del ángulo de avance de la inyección.

Calculo del ángulo de inyección.
Datos:
Diámetro del volante: 49,0 cm.
Distancias entre marcas del volante: 8,5 cm.

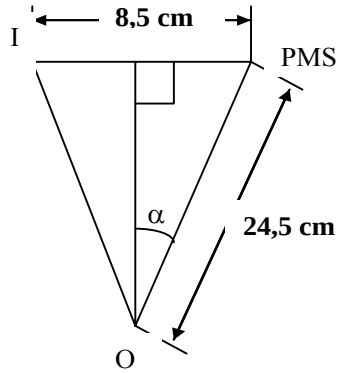


Figura. 3.3. Triangulo formado entre el PMS, Pto de inyección (I) y centro del volante.(O).

Se tiene un triángulo isósceles (PMS-I-O), figura 3.3, entonces se divide la distancia entre las marcas del punto muerto superior (PMS) y el comienzo de la inyección (I) a la mitad y se traza una línea desde este punto hasta el centro del rotación (O), y se obtienen como resultado dos triángulos rectángulos a los que se le calcula el ángulo α, que multiplicado por dos será el ángulo de avance de la inyección.

$$\tan a = \frac{8{,}5/2}{24.5} = 0.1734$$

$a = 9.84$ grados.

$2 * a = 19$ grados

El ángulo de avance de la inyección con el cuál se efectuaron las pruebas con los combustibles Diesel y Biodiesel fue de 19 grados.

El ángulo de avance de la inyección antes de ser corregido era de 10 grados, y bajo este ángulo el motor empleando biodiesel alcanzaba una temperatura de 97 ºC, además de entregar menor potencia que la que debía entregar con un ángulo de avance de la inyección adecuado (más adelantado).

Después de haber adelantado este ángulo 9 grados mejoraron los parámetros del motor y la temperatura del agua de enfriamiento alcanzó los valores normales de funcionamiento entre 50 y 70 ºC.

3.3 Estimación de la fuerza máxima del dinamómetro sobre la balanza.

A continuación se calculará el torque en el árbol motriz, así como la estimación de la fuerza máxima en Kgf que actuará sobre la balanza para tener un estimado teórico del valor de las fuerzas que actuarán:

Cálculo del torque en árbol del motor.

Conociendo que:

N =8 Kw (valor máximo) por catálogo de fabricación.

n =1450 rpm (velocidad de rotación tomada ya que la nominal es de 1500 rpm).

$$M(N*m) = \frac{9550 * N(Kw)}{n(rpm)} \qquad 3.1$$

$$M(N*m) = \frac{9550*8(Kw)}{1450(rpm)}$$

M = 52.68 (N*m)

Cálculo de la fuerza máxima ejercida sobre la balanza:

Conociendo que la distancia desde el centro de rotación del dinamómetro hasta el extremo de la barra que actúa sobre la balanza es de 0.65 m, y el torque lo calculado anteriormente.

Como:

$$M(N*m) = F(N)*b(m) \qquad 3.2$$

Despejando de 3.2.

$$F(N) = \frac{M(N*m)}{b(m)} \qquad 3.3$$

$$F(N) = \frac{42.78(N*m)}{0.65(m)} = 81\ N$$

F = 8,1 (Kgf)

Ya calculada la fuerza máxima que actuará sobre la balanza se puede tener una aproximación para ejecutar las mediciones reales.

3.4 Elementos a tener en cuenta para desarrollar una correcta medición:

Se debe verificar que el dinamómetro se encuentre en equilibrio, es decir evitar que debido al peso de la barra sobre la balanza ocurran errores en la lectura, para lo cuál se proponen las siguientes medidas:

1. Equilibrar el dinamómetro colocando un contrapeso en el lado opuesto a la barra.
2. Tomar en cuenta el valor medido en la balanza estando parado el motor y actuando la barra sobre la misma, y al efectuar las mediciones afectar el resultado por el valor calculado anteriormente.

3. Cerciorarse de que las mangueras y otras conexiones no sean lo suficientemente rígidas como para producir errores considerables en el proceso de medición.

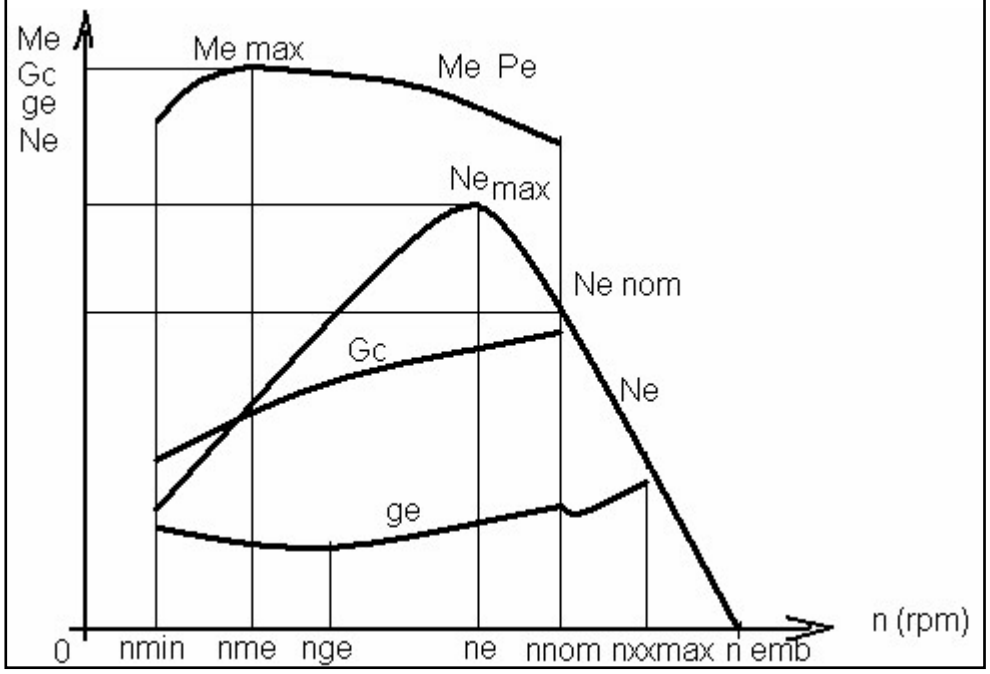
3.5 Ensayo de característica exterior de velocidad y análisis de gases de la combustión.

Las características externas y parciales de velocidad son las curvas de variación de potencia (Ne), momento (Me), la presión media efectiva (Pe), los consumos específicos (ge) y horario (Gc) de combustible contra la velocidad de giro del cigüeñal (r.p.m) para diferentes posiciones fijas de la cremallera del motor Diesel.

Las características parciales se obtienen para determinar las regiones de economía y potencia del motor durante su trabajo a cargas parciales, a medida que se aumente la inyección los exponentes del motor se irían elevando, hasta que en el límite se obtendrán los valores correspondientes a la característica exterior.

Como ejemplo de la característica exterior de un motor se muestra el gráfico 3.1 que ilustra el comportamiento de los parámetros anteriormente mencionados.

Gráfico 3.1 Característica exterior de velocidad.



Los siguientes regímenes son característicos tanto para la característica exterior de los motores de carburación como los Diesel.

n min: Velocidad mínima de trabajo a carga máxima.

n me: Velocidad de máximo momento torsor.

n ge: Velocidad de mínimo consumo de combustible.

n nom: Velocidad nominal

n e: Velocidad para potencia máxima.

n xxmax: Velocidad máxima regulada en vacío.

n emb: Velocidad a la cual la potencia indicada se gasta en fricción (embalamiento).

Los motores Diesel utilizan regulación de velocidad en toda la gama, los cuales sirven para el control del régimen de velocidad del motor.

Con los datos que obtengamos durante las pruebas podremos calcular los diferentes parámetros mediante las siguientes fórmulas:

$$N_e = \frac{F \times rpm}{1000} \quad \text{CV} \qquad 3.4$$

$$M_e = F \times b \quad \text{kgm} \qquad 3.5$$

$$g_e = \frac{\Delta g \times 3600}{t \times N_e} \quad \text{g/CV h} \qquad 3.6$$

$$P_e = \frac{N_e \times 225 \times \tau}{Vn \times i \times n} \quad \text{kg/cm2} \qquad 3.7$$

$$Gc = \frac{\Delta g \times 3600}{t \times 1000} \quad \text{kg/h} \qquad 3.8$$

Donde:

b: brazo (0.65m)

τ: número de tiempos del motor

Vn: Volumen de desplazamiento del cilindro

i: número de cilindros

n: Velocidad del motor (r.p.m)

Vh: Volumen de desplazamiento del motor (cilindrada)

3.5.1 Equipamiento empleado.

Termómetro para medir temperatura del agua de enfriamiento.

1. Barómetro.
2. Psicrómetro.
3. Motor de combustión interna tipo diesel.
4. Dinamómetro.
5. Tacómetro digital
6. Cronómetro digital.
7. Equipo para medir el combustible.
8. Termómetro digital para el agua de enfriamiento.
9. Sistema Analizador de Emisiones ECOM-SG PLUS
10. Balanza para medir la fuerza con que actúa dinamómetro.
11. Balanza para medir las diferencias del peso en el combustible.
12. Medidor del Índice de Bacharach.

3.5.2 Medidas de protección e higiene a emplear:

1. Cuidar de no derramar combustible en el puesto de trabajo.
2. Al efectuar las mediciones no tocar las partes que puedan calentarse del motor.
3. Tener cuidado de no tener contacto con las partes giratorias del motor y el dinamómetro al estar en marcha.
4. No fumar en el área de trabajo.
5. Conocer la situación y el manejo de los extintores de incendio.
6. Con el motor funcionando utilizar los medios de protección contra el ruido.
7. Conocer las indicaciones previstas para parar el motor en caso de que tienda a embalarse.

3.5.3 Metodología llevada a cabo en el ensayo de característica exterior de velocidad:

Preparación del puesto de trabajo.

1. Verificar el estado de tensión de la correa del ventilador y la bomba de agua.
2. Verificar el nivel de agua de enfriamiento en el radiador y de aceite lubricante en el cárter del motor, el nivel de aceite en el depósito de almacenamiento del dinamómetro.
3. Instalar equipo de mediciones de gases, tacómetro, balanzas y demás instrumentos de medición.

4. Poner a punto los instrumentos de medición a emplear.
5. Poner en marcha el motor en ralentí hasta alcanzar la temperatura óptima de trabajo.
6. Extraer el aire del dinamómetro.
7. Establecer el flujo de agua de enfriamiento en el dinamómetro.
8. Mover la cremallera de la bomba de alimentación de combustible hasta la última posición.
9. Comenzar a bombear aceite al dinamómetro hasta dejar el motor a las mínimas rpm y con la menor variación posible.
10. Una vez estabilizado el motor a las r.p.m deseadas se toca la campana y se toman a la vez las lecturas de :

a) Fuerza en la balanza del dinamómetro.

b) Temperatura del agua de enfriamiento del motor.

c) Revoluciones del motor.

d) Lectura primaria en la balanza de combustible (G1), al cabo de 2 min de funcionamiento a este régimen se toma otra lectura (G2), para determinar la diferencia en peso que es el combustible consumido en este tiempo.

e) Medición con los equipos de análisis de gases de escape (solo para los puntos seleccionados).

f) Medición con el Bacharach (solo para los puntos seleccionados).

11. A continuación se libera un poco de aceite del dinamómetro mediante la válvula de control y se establece otro régimen de funcionamiento a unas 200 revoluciones por encima de las anteriores y se repite el procedimiento que comenzó en 10.
12. Al concluir la prueba abrir la válvula de salida de aceite del dinamómetro para evacuar el aceite caliente del mismo.
13. Situar la cremallera de la bomba de combustible en la posición inicial.
14. Dejar el motor funcionando sin carga por espacio de 10 min para bajar su temperatura de funcionamiento.
15. Apagar el motor.
16. Organizar el puesto de trabajo.

3.6 Descripción y funcionamiento de los equipos empleados en las mediciones de gases de escape.

Para realizar las mediciones y determinar las características de los gases de la combustión del Diesel y Biodiesel se introdujeron en la corriente de gases a través de unos orificios elaborados en el conducto de escape del motor las sondas del equipo ECOM-SG el cual ofreció los datos necesarios para el análisis de la composición de los gases de escape mediante un reporte impreso. A continuación se describen brevemente los equipos:

Figura 3.4. Analizador de gases ECOM-SG PLUS

El Sistema Analizador de Emisiones ECOM-SG PLUS (figura 3.4) es utilizado para el análisis de los gases de la combustión. Este equipo es de procedencia Alemana y ofrece la composición y temperatura de los gases de la combustión, así como el rendimiento de la combustión, las pérdidas y la temperatura ambiente, también se puede medir con el la presión, temperatura de radiación y hacer determinaciones del índice de Bacharach, además puede trabajar en régimen automático ofreciendo reportes de mediciones según lo establezca el usuario, estos datos son dados por el equipo en un reporte impreso, los reportes dados en este estudio pueden verse en el anexo 1.

Se utilizó además un Medidor del Índice de Bacharach (figura 3.5) para la comparación de los sólidos volátiles, este consistente en un bomba que succiona los gases de la combustión a través de un papel de filtro dejando una huella de coloración, que es comparada con un patrón, que proporciona aproximadamente un índice que corresponde al valor de los sólidos no quemados en la combustión.

Figura.3.5. Medidor del Índice de Bacharach.

3.7 Parámetros del motor obtenidos en la prueba de característica exterior de velocidad.

A continuación en la tabla 3.2 se muestran las condiciones atmosféricas que existían durante el transcurso de dichas pruebas, las características del banco de pruebas fueron dadas en la tabla 3.1

Tabla 3.2 Condiciones atmosféricas.

Presión atmosférica	1.016 bar
Temperatura de Bulbo seco	29.5 ºC
Temperatura de Bulbo húmedo	25.8 ºC
Humedad relativa	74 %

A continuación en la tabla 3.3 se muestran 11 puntos analizados con diferentes velocidades de rotación a plena carga y se puede ver la variación de los diferentes parámetros que tiene lugar en el transcurso de la prueba con combustible Diesel. Para cada punto la medición se repitió tres veces en la tabla 3.3 solo aparecen los valores promedios de las tres mediciones.

Tabla 3.3. Resultado de las mediciones en el banco de pruebas empleando combustible Diesel.

No	Velocidad de rotación (n, rpm)	Consumo de comb. (□g, g)	Torque (Mto, N-m)	Potencia efectiva. (Ne, kW)	Consumo horario. (Gc, kg/h)	Consumo específico (ge, g/kW-h)
1	684	60	48.43	3.47	1.8	519
2	781	60	48.88	4.00	1.8	450
3	885	75	49.66	4.60	2.25	489
4	957	85	49.14	4.92	2.55	518
5	1097	100	49.79	5.72	3	525
6	1211	105	49.73	6.31	3.15	500
7	1236	115	48.10	6.23	3.45	554
8	1360	135	47.78	6.80	4.05	595
9	1371	125	48.62	6.98	3.75	537
10	1450	130	48.30	7.33	3.9	532

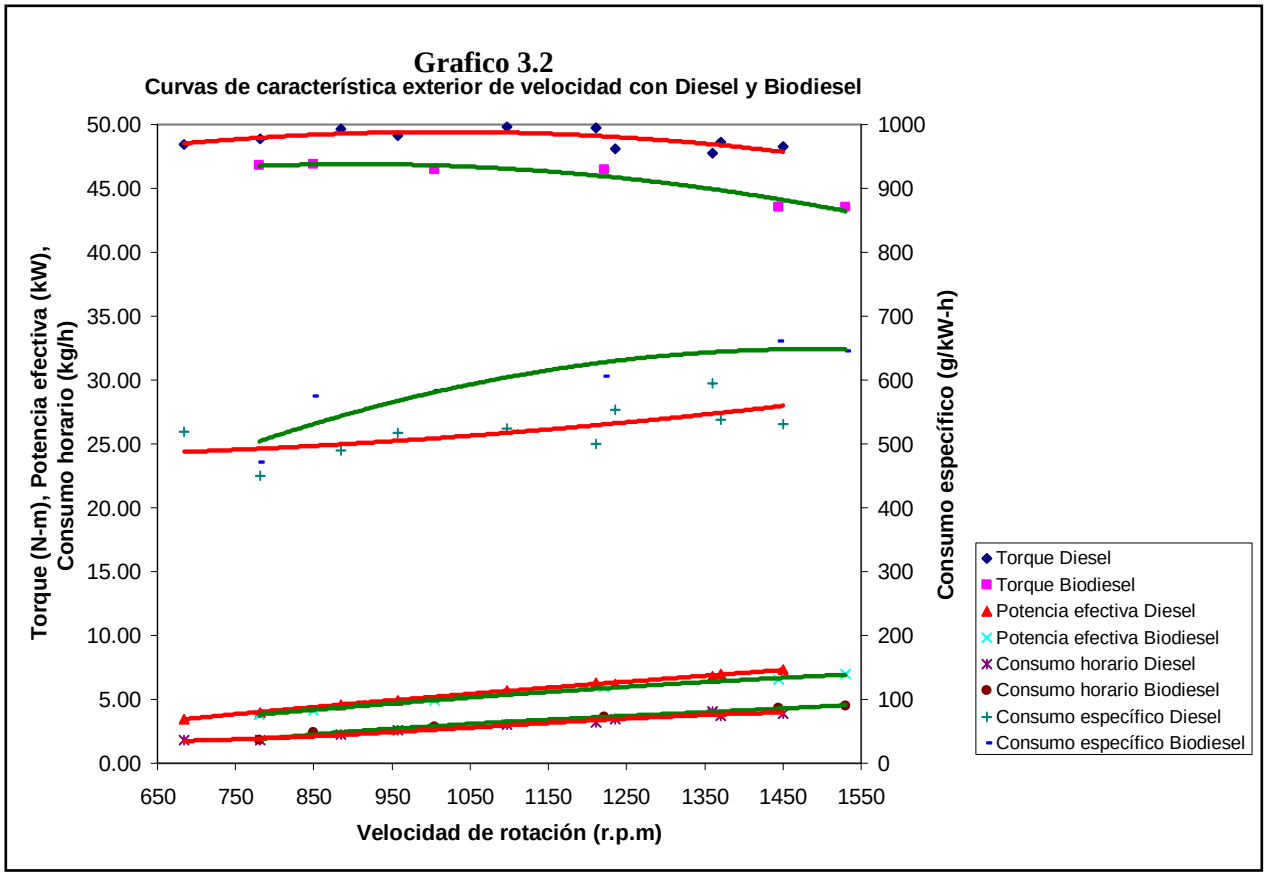
En la tabla 3.5 se muestra el comportamiento de los diferentes parámetros en el ensayo de característica exterior de velocidad, pero ahora se emplea como combustible el Biodiesel.

Tabla 3.4. Resultado de las mediciones en el banco de pruebas empleando combustible Biodiesel.

No	Velocidad de rotación (n, rpm)	Consumo de comb. (□g, g)	Torque (Mto, N-m)	Potencia efectiva. (Ne, kW)	Consumo horario. (Gc, kg/h)	Consumo específico (ge, g/kW-h)
1	780	60	46.80	3.82	1.8	471
2	850	80	46.93	4.18	2.4	575
3	1004	95	46.48	4.89	2.85	583
4	1222	120	46.48	5.95	3.6	605
5	1444	145	43.55	6.58	4.35	661
6	1530	150	43.55	6.98	4.5	645

3.8 Discusión de los resultados obtenidos en la prueba de característica exterior de velocidad.

En el gráfico 3.2 se ilustra el comportamiento de los diferentes parámetros en característica exterior de velocidad para el rango de velocidad de rotación de 684 hasta las 1530 r.p.m. para cada tipo de combustible.



Las primeras dos curvas de arriba corresponden a los valores de torque entregados por el motor y en el caso del diesel esta curva se encuentra desplazada hacia arriba de la del biodiesel, aunque

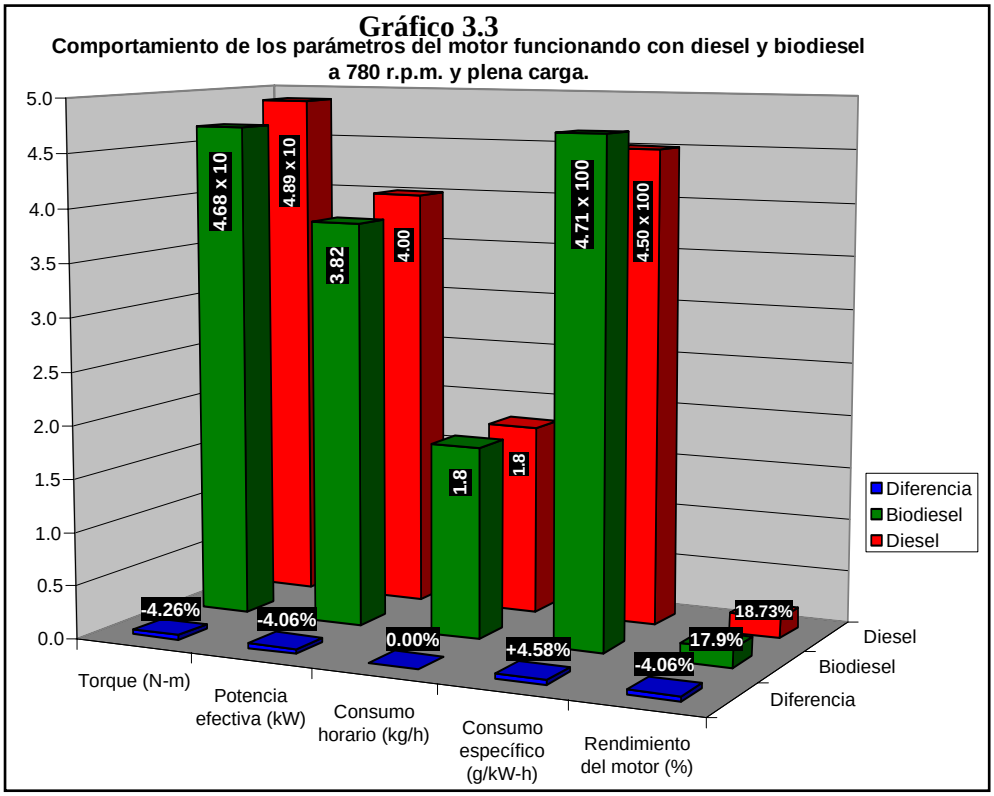
funcionando a baja velocidad de rotación las curvas presentan un mayor acercamiento, mientras que para las altas velocidades de rotación las diferencias entres ellas son mayores.

Las curvas de consumo específico son las de la zona central del gráfico, y tal como se puede apreciar para las bajas r.p.m estas curvas llegan casi a superponerse entre sí, obteniéndose consumos similares por unidad de potencia, mientras que para la zona media de velocidad de rotación (1200 r.p.m) las diferencias son más acentuadas, es decir aumentan con el aumento de la velocidad de rotación del motor.

El tercer par de curvas corresponden a las curvas de potencia, y estas curvas se encuentran con pendientes similares y características similares de comportamiento, notándose que la del diesel se encuentra ligeramente por encima de la del biodiesel, donde para los valores de las 1450 r.p.m se encuentra el punto de mayor diferencia entre ellas.

Las dos curvas situadas en la parte inferior del gráfico muestran el comportamiento de los consumos horarios al emplear Diesel y Biodiesel respectivamente, estas curvas tienen un tendencia ascendente a medida que aumentan las revoluciones del motor, y puede notarse que en el caso del Biodiesel el consumo horario es ligeramente superior que al emplear el Diesel.

En el gráfico 3.3 se muestra el comportamiento de los parámetros del motor funcionando con Diesel y Biodiesel a 780 r.p.m y plena carga.



El primer parámetro de izquierda a derecha es el torque, y tal como se aprecia el Biodisel tiene un 4.26 % de torque menor que el Diesel.

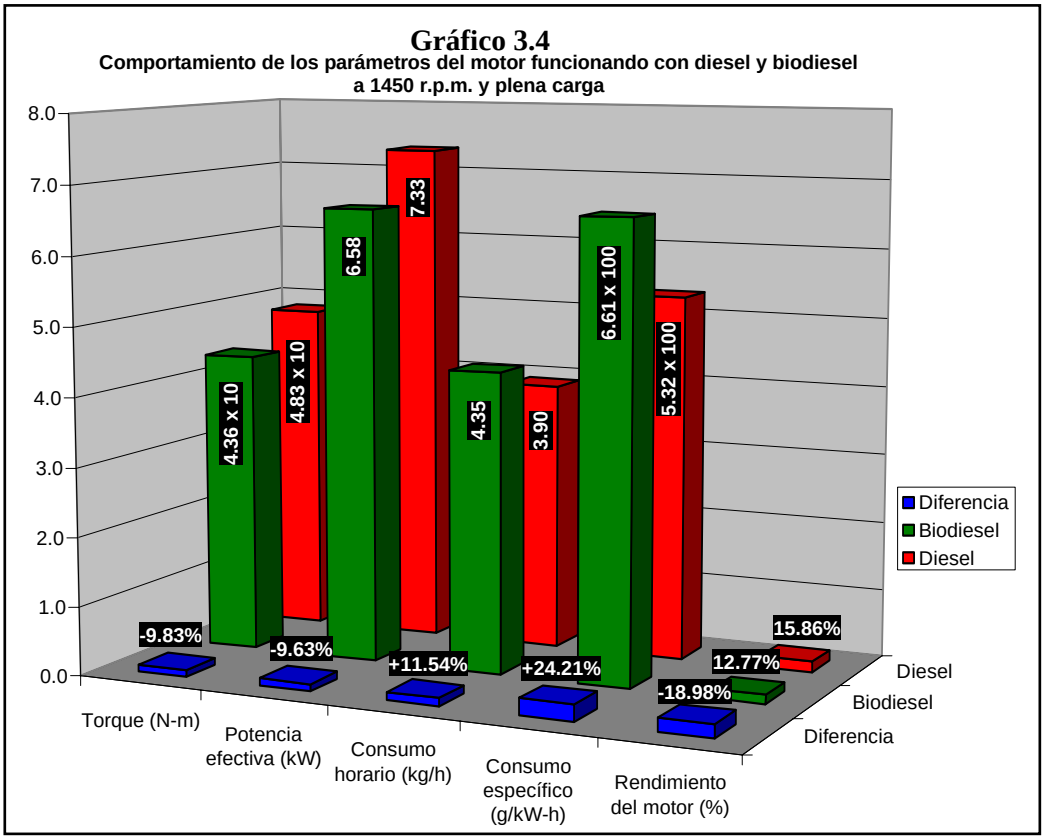
A continuación le siguen las barras de potencia efectiva, donde tal como podemos ver esta es en un 4,06 % menor para el caso del Biodiesel.

Las próximas barras que le siguen son las de consumo horario, donde no existen diferencias entre ambos combustibles para esa velocidad de giro.

Le sigue a continuación el consumo específico, donde podemos ver que el del Biodiesel resulta en un 4,58 % mayor

Las últimas barras son las del rendimiento del motor para ambos combustibles, las cuales nos muestran que al emplear el Biodiesel este diminuye en un 4,06 % respecto al Diesel, y para este último combustible el rendimiento del motor fue de 18,73 %.

En el gráfico 3.4 se muestra el comportamiento de los parámetros del motor al funcionar con Diesel y Biodiesel respectivamente a una velocidad de rotación de 1450 revoluciones por minuto.



Las primeras gráficas de izquierda a derecha son las que representan el torque, donde como se muestra el producido por le Biodiesel es un 9,83 % menor que el del Diesel.

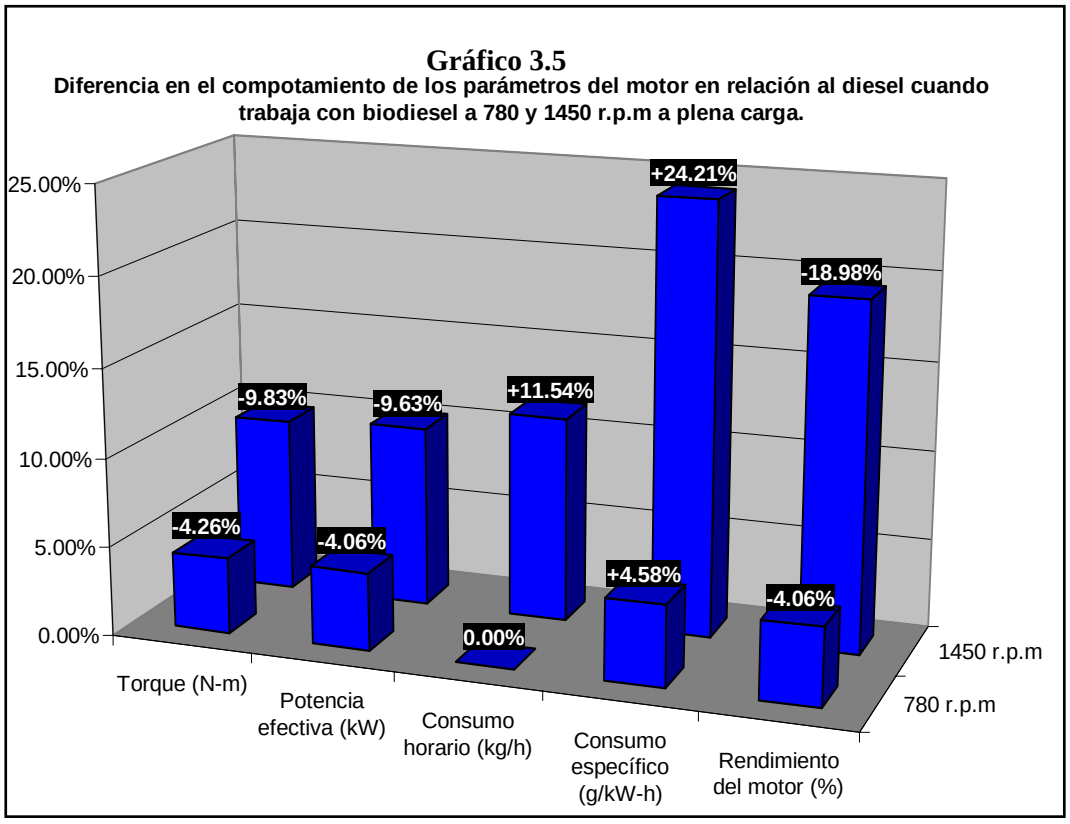
En ese mismo orden le siguen las barras de potencia efectiva, donde como se muestra para el caso del Biodiesel esta es menor en un 9,63 %.

A continuación le siguen las barras de consumo horario, donde se aprecia que en el caso del Biodiesel este es un 11,94 % mayor que el Diesel.

Posteriormente le siguen las barras de consuno específico, donde podemos ver que en el caso del Biodiesel este es un 24,21 % mayor que al emplear Diesel.

Las últimas barras son las del rendimiento del motor, se puede apreciar que empleando Biodiesel tiene un rendimiento de un 18,98 % menor que empleando Diesel.

En el gráfico 3.5 se muestra la diferencia del comportamiento de los parámetros del motor en relación al Diesel cuando trabaja con Biodiesel a 750 y a 1450 r.p.m a plena carga.



De izquierda a derecha el primer parámetro es el torque en el cuál las mayores diferencias entre ambos combustibles que se muestran se alcanzan en las altas velocidades de rotación, mientras que para las bajas velocidades las diferencias son menores y llegan hasta solamente un 4,26 %.

El parámetro que le sigue a continuación es la potencia efectiva con un comportamiento similar al torque, las mayores diferencias se producen a las mayores velocidades de rotación, alcanzando valores de un 10 % aproximadamente tal y como se plantea en la literatura consultada.

El consumo horario tiene una variación de hasta un 11,54 % para el caso de las altas velocidades de rotación, mientas que para las bajas se comporta de manera similar para ambos combustibles.

El consumo específico tiene la mayor diferencia para las altas velocidades de rotación también, donde llega a un 24,21 %, mientras que para las bajas las diferencias solo es de un 4,58 %.

El rendimiento del motor proporciona una medida del aprovechamiento de la energía química contenida en el combustible, es decir cuanta energía es capáz de convertirse en energía mecánica, y para el caso de las altas velocidades de rotación estas diferencias de rendimiento llegan hasta un 18,98 %, mientras que para las bajas velocidades de giro del motor las diferencias son de un 4,06 % solamente.

3.9 Emisiones de los gases de escape en la prueba de característica exterior de velocidad.

La medición de las emisiones de gases se realizo para tres puntos, similares para ambos combustibles a fin de conseguir una referencia válida para la comparación entre ellos.

En las tablas 3.5, 3.6 y 3.7 que se muestran a continuación se detallan las particularidades de los principales componentes de los gases de escape emitidos, la primera de ellas representa el punto a 880 r.p.m, la segunda a 1050 r.p.m, y la tercera tabla representa un punto a 1230 r.p.m.

Tabla 3.5. Análisis de los gases de escape en el punto 1 a 880 r.p.m.

Análisis de Gases.	U/M	Diesel	Biodiesel	Diferencia %
Temp gases	ºC	282	267	5.32
O2	%	1.8	6.5	63.89
NOx	ppm	203	99	51.23
SO2	ppm	414	0	100.00
CO2	%	14	10.6	24.29
Exeso de aire	_	1.09	1.45	33.03

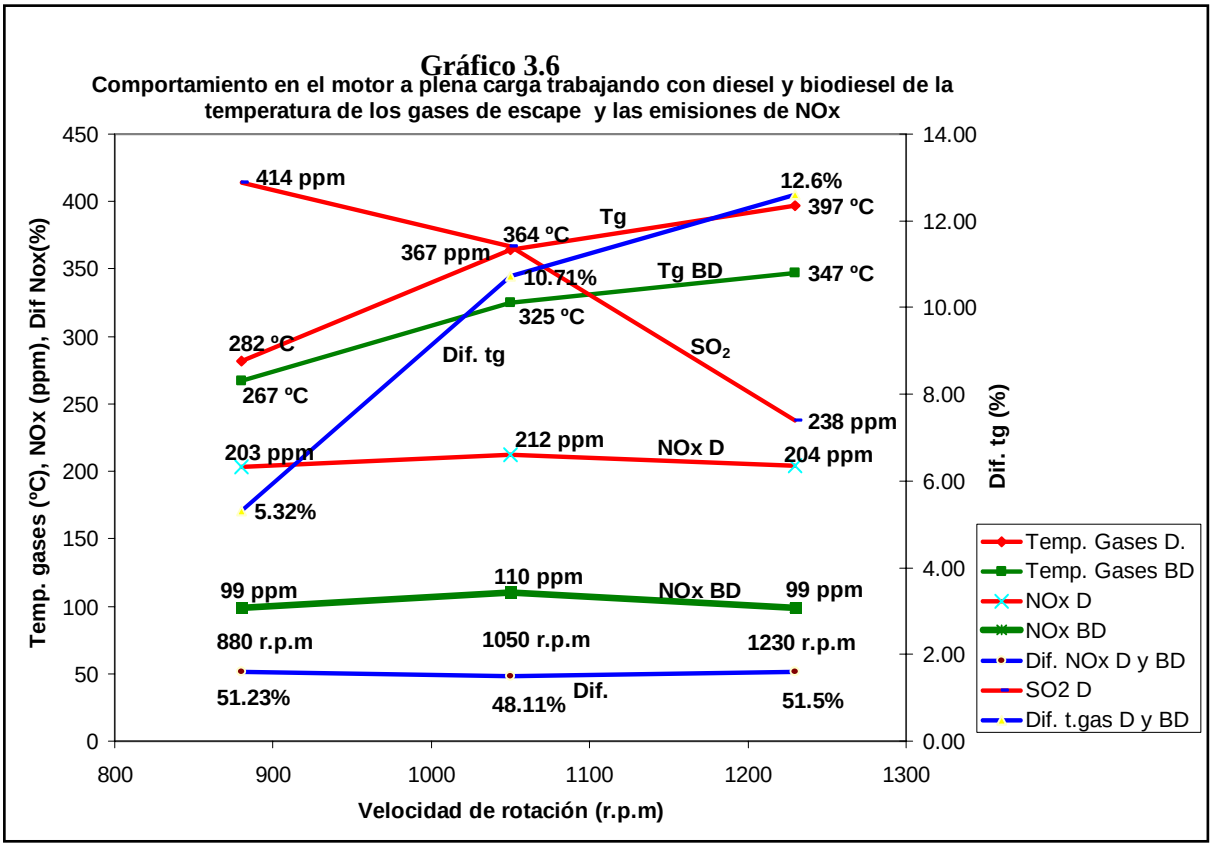
Tabla 3.6. Análisis de los gases de escape en el punto 2 a 1050 r.p.m.

Análisis de Gases.	U/M	Diesel	Biodiesel	Diferencia %
Temp gases	ºC	364	325	10.71
O2	%	1.7	5.8	65.88
NOx	ppm	212	110	48.11
SO2	ppm	367	0	100.00
CO2	%	14.1	11.1	21.28
Exeso de aire	_	1.09	1.38	26.61

Tabla 3.7. Análisis de los gases de escape en el punto 3 a 1230 r.p.m.

Análisis de Gases.	U/M	Diesel	Biodiesel	Diferencia %
Temp gases	ºC	397	347	12.6
O2	%	1.9	6.1	67.9
NOx	ppm	204	99	51.5
SO2	ppm	238	0	93.3
CO2	%	13.9	10.9	21.6
Exeso de aire	_	1.1	1.41	28.2

En el gráfico 3.6 se muestra el comportamiento en el motor trabajando en característica exterior de velocidad de la temperatura de los gases de escape, las emisiones de NOX y las emisiones de SO2 para tres velocidades de giro del motor diferentes (880 r.p.m, 1050 r.p.m y 1230 rpm).



El primer componente de los gases de escape a analizar es el SO_2 que tal como se puede apreciar para el caso del Diesel en el punto de las más bajas r.p.m tiene 415 ppm, para el punto medio de 367 ppm, y para el último punto está por las 238 ppm y para esos mismos puntos empleando Biodiesel la composición de SO_2 fue de 0 ppm, lo que demuestra que el contenido de azufre del Biodiesel como combustible es nulo, lo que sin duda es una ventaja ecológica importante.

El parámetro temperatura de los gases de escape, es mayor al emplear el Diesel como combustible, dichas curvas son similares, con tendencia al crecimiento a medida que aumentan las r.p.m, para el caso del Diesel la temperatura más alta se debe al mayor poder calórico de este combustible respecto al Biodiesel.y los porcientos de incremento de temperatura en cada punto son de 5,32%, 10,71 % y 12,6 % respectivamente.

Los valores máximos de temperatura en el Diesel llegan hasta 397 ºC, mientras que empleando Biodiesel llegan hasta 347 ºC

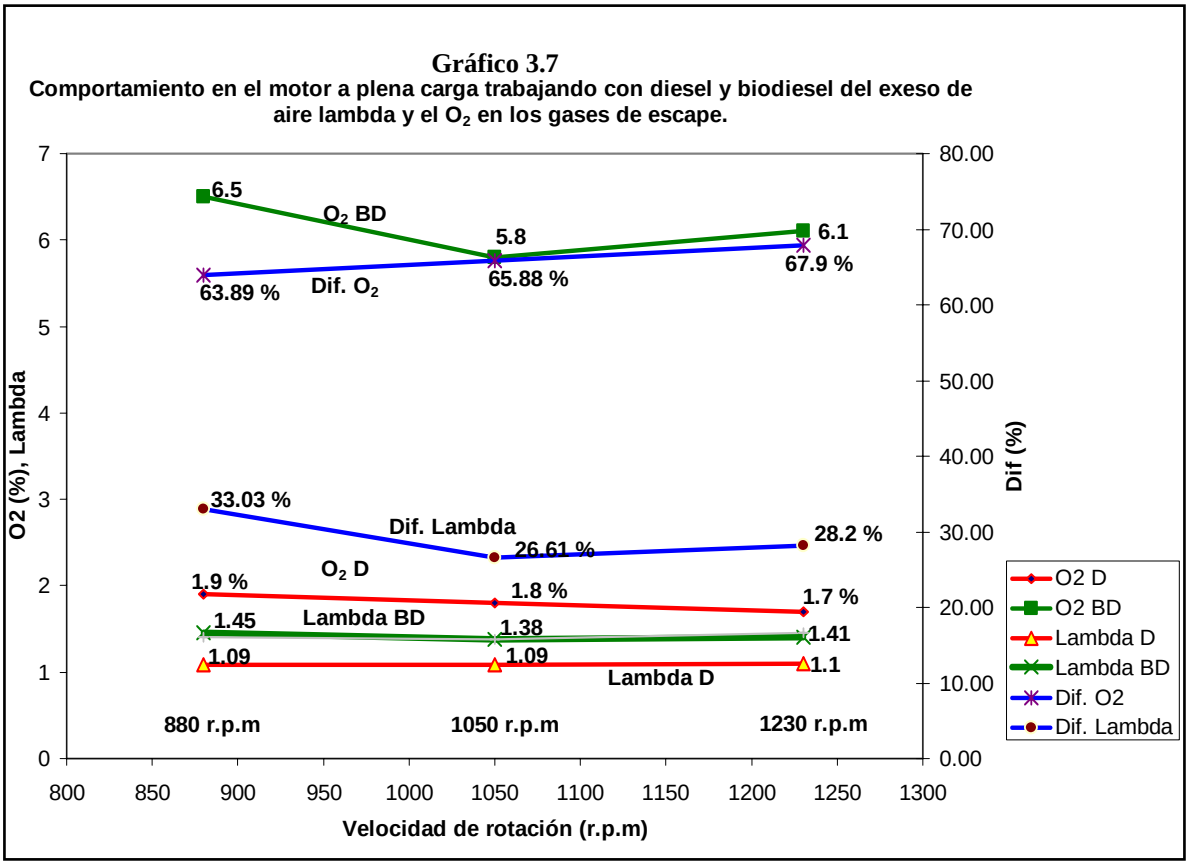
La emisión de óxidos de nitrógeno en el motor está dada por la temperatura máxima alcanzada en la combustión, y como en el caso del Diesel es mayor entonces la emisión de óxidos de nitrógeno será mayor también. Estas curvas tienen un comportamiento similar, sin embargo la correspondiente al Diesel es superior y alcanzando un valor máximo de 212 ppm, mientras que para el Biodiesel el valor máximo es de 110 ppm, lo que representa una reducción de casi el doble de este contaminante y esto puede traducirse como una gran ventaja desde el punto de vista ecológica y medioambiental.

En el gráfico 3.7 se muestra el comportamiento del exceso de aire, y de O_2 libre que queda en los gases de escape.

El O_2 que se encuentra presente en los gases de escape para el caso del Biodiesel es superior al registrado cuando se emplea el Diesel, esto se debe a que en el Biodiesel se encuentra presente cierta cantidad oxígeno, superior a las cantidades que presenta el diesel y que participa en la reacción de combustión por lo que parte del oxígeno que entra con el aire de admisión sale sin reaccionar en los gases de escape. Estas diferencias se acentúan aún más al trabajar en las bajas velocidades de rotación llegando a tener una diferencia de un 63,89 %.

Además como la temperatura alcanzada en el proceso de combustión empleando biodiesel es menor también y se forman menores cantidades de óxidos de nitrógeno queda este oxígeno libre

también y sale en los gases de escape sin haber logrado formar otros compuestos, y demás se debe tener en cuenta que en el caso del Biodiesel no se forman tampoco óxidos de azufre, por lo que este oxígeno también quedaría libre en los gases de escape.



El exceso de aire en el caso del Biodiesel es superior al del Diesel, y el punto de mínima diferencia se encuentra a las 1050 r.p.m aproximadamente, mientras que para las mínimas velocidades de rotación esta diferencia es la mayor, llegando a ser de hasta un 33 % y para las altas velocidades de rotación también tiene una pendiente creciente que da hasta un valor de diferencia entre ambos de un 28%.

Conclusiones:

1. Es posible emplear el biodiesel obtenido a partir de aceite de girasol y etanol 97 en motores de combustión interna logrando un comportamiento aceptable de sus características de potencia, torque, y consumo de combustible.
2. Al emplear biodiesel en motores de combustión interna las emisiones de dióxido de azufre se reducen a 0 y los óxidos de nitrógeno se reducen en un 50 % y también se reducen las emisiones de monóxido de carbono, por lo trae enormes ventajas ecológicas al sustituir al Diesel como biocombustible.
3. La temperatura de los gases de escape al emplear biodiesel se reduce aproximadamente en un 10 % en la gama de velocidad de rotación analizada.
4. A medida que aumentan las revoluciones del motor se incrementan las diferencias entre los parámetros del motor al emplear los combustibles Diesel y Biodiesel, para las 780 r.p.m del motor el torque, la potencia, el consumo horario y el consumo específico tienen diferencias de 4.26, 4.06, 0 y 4.58 %, mientras que para las 1450 r.p.m las diferencias son de 9.83, 9.63, 11.54 y 24.21 % respectivamente.

Conclusiones generales.

1. El balance de litros de Biodiesel que se puede generar a partir de cada litro de combustible empleado en el proceso agroindustrial por litro de aceite es de 4.31litros, por lo que se los agroproductores pueden lograr su independencia energética de los combustibles fósiles.

2. El aceite de girasol para su preparación para elaborar biodiesel requiere solamente de un filtrado para extraer las impurezas de mayor tamaño y posteriormente de un proceso de decantación.

3. Es posible obtener biodiesel, en gran medida con materias primas nacionales, a partir de la utilización de aceite vegetal de girasol y etanol a 97,8 grados.

4. El Biodiesel obtenido a través del alcohol etílico y aceite de Girasol presenta una viscosidad que aunque está todavía un poco por encima de la registrada en la norma ASTM todavía es aceptable para el empleo en motores Diesel.

5. Al emplear biodiesel en motores de combustión interna las emisiones de dióxido de azufre se reducen a 0 y los óxidos de nitrógeno se reducen en un 50 % y también se reducen las emisiones de monóxido de carbono, por lo trae enormes ventajas ecológicas al sustituir al Diesel como biocombustible.

6. A medida que aumentan las revoluciones del motor se incrementan las diferencias entre los parámetros del motor al emplear los combustibles Diesel y Biodiesel, para las 780 r.p.m del motor el torque, la potencia, el consumo horario y el consumo específico tienen diferencias de 4.26, 4.06, 0 y 4.58 %, mientras que para las 1450 r.p.m las diferencias son de 9.83, 9.63, 11.54 y 24.21 % respectivamente.

Recomendaciones

1. Se require hacer una investigación más profunda para lograr la elaboración de un Biodiesel con viscosidad más cercanas a las normas a los valores reportados en las normas ASTM.
2. Determinar el ángulo óptimo de avance de inyección al emplear Biodiesel como combustible para el cuál los parámetros del motor se acerquen más a los registrados al emplear el Gasoil.
3. Realizar un diseño de experimento para determinar la composición de la mezcla optima Diesel-Biodiesel que logre mantener aceptables parámetros del motor y a la vez reduzca la emisión de los gases contaminantes a la atmósfera.
4. Hacer un estudio de las principales dimensiones del dardo de combustible al funcionar el motor con Diesel y con Biodiesel y además profundizar en el proceso de preparación de la mezcla de combustible al emplear biodiesel.

Fuentes bibliográficas consultadas.

1. Adreani P. Wolodarsky J.,Huergo E., Andronikov A., Trigubo H.: "Estudio de prefactibilidad económica planta de elaboración de biodiesel" Bs. As. Abril 2000.
2. Adreani P. Wolodarsky J.,Huergo E., Andronikov A., Trigubo H.: "Estudio de prefactibilidad económica planta de elaboración de biodiesel" Bs. As. Abril 2000.
3. Albardíaz, A. Biocarburantes: visión de la industria del petróleo. Proyectos de desarrollo en España. Biocarburantes: Una alternativa energética. Curso de verano. UCM-IDAE. San Lorenzo del Escorial. 2002.
4. Alonso, J.A. Los biocarburantes como alternativa energética. Situación actual y objetivos. Biocarburantes: Una alternativa energética. Curso de verano. UCM-IDAE. San Lorenzo del Escorial. 2002.
5. Armstrong, L.V. The Diesel engine. Its theory, basic design and economics. L.V. Armstrong, J.B. Hartman. The Macmillan Co. 1959. pp. 360.
6. ARS-USDA"Program of Bioenergy and Energy alternatives" AURI:"Opportunities for value-added, utilization of oilseeds in Minnesota, 2001.
7. AURI:"Opportunities for value-added, utilization of oilseeds in Minnesota, 2001.
8. Barsic, N.J.; Humke, A.L. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated Diesel engine with vegetable oils. SAE paper 810262. 1981.
9. Bender M.: "Economic feasibility review for comumunity-scale farmer cooperatives for biodiesel" Bioresource Technology 70 (1999) Elsevier Science Ltd.
10. Bender M.:"Economic feasibility review for comumunity-scale farmer cooperatives for biodiesel"Bioresource Technology 70 (1999) Elsevier Science Ltd.
11. Berger M y Calvino M,: " Biodiesel: Aspectos económicos a considerar para su adopción" Bs. As. 2000.
12. Bickel K et all "Economic comparison of biodiesel blends to commercially availables exaust emission reduction technologies for underground mines" University of Minnesota, January 1997.
13. Bickel K et all" : Economic comparison of biodiesel blends to commercially availables exaust emission reduction technologies for underground mines" University of Minnesota, January 1997.

14. BIOCOMBUSTIBLES: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel Jose E. Stratta Ingeniero Agrónomo Investigador Junior Bolsa de Comercio Rosario jstratta@bcr.com.ar Agosto de 2000.
15. Biodiesel: algo más que un proyecto. El Litoral, suplemento Economía y Agro. Santa Fe, sabado 5 de agosto de 2000. pp. 4.
16. Collins K. " Economic Analysis of increasing soybeen oil demand through the development of new products" USDA-ERS Washington 2001.
17. Connemann J., Fischer J.: " Biodiesel in Europe 2000,biodiesel proccesing, technologies and future market development" Alemania 1999.
18. Connemann J., Fischer J.: " Biodiesel in Europe 2000,biodiesel proccesing, technologies and future market development" Alemania 1999.
19. De verano. UCM-IDAE. San Lorenzo del Escorial. 2002.
20. Dougher Rayola: "Pump price Update – How much we pay for gasoline" API Policy Analysis and Statistics Department USA May 2001.
21. Duffield J. Et all:" U.S. Biodiesel Development: New markets for conventional and genetically modified agricultural products" Agricultural Economic Report N° 770, ERS/USDA Washington DC, September 1998.
22. Dunn R.:" Biodiesel jet fuels" Agricultural Research Magazine, USDA-ARS, July 2001. [33]
23. Elaboración de aceite de soja Facultad Regional Córdoba - Cátedra: Integración I Autores: Don, Juan Manuel Pignatelli, Matías Romero, entre otros.
24. Engine performance and emissions. Journal of propulsion and power. Vol. 15. No. 2. pp 224-231. 1999.
25. Fernández, J. Cultivos energéticos para Castilla y León. Jornadas Técnicas: El aprovechamiento energético de los cultivos de Castilla y León. ENRE. Junta de Castilla y León. 1998.
26. Gruse, William A. Motor Fuels. Performance and Testing. William A. Gruse. Ed. Reinhold Publishing Co. New York, 1968. pp. 280.
27. Hanreich, G. La política europea sobre biocarburantes. Biocarburantes: Una alternativa energética. Curso de verano. UCM-IDAE. San Lorenzo del Escorial. 2002.
28. Hernández, C. Biodiesel: Estado actual y experiencias en España. Biocarburantes: Una alternativa energética. Curso.
29. Howard L.:" Biodiesel versus other alternate fuels", Quality Assurance Department, USA (1995).

30. Humke, A.L.; Barsic, N.J. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated Diesel engine with vegetable oils (part 2). SAE paper 810955. 1981.
31. Instituto Mexicano del Petróleo. (2001). Breves petroleras. Gaceta IMP. Vol. III, No. 114, 26 de marzo, pp 11.
32. Jóvaj, M. S. Motores de Automóvil / M. S. Jóvaj G. S. Maislov. – La Habana : Editorial Pueblo y Educación , 1985. pp. 434.
33. Lapuerta, M.; Armas, O.; Ballesteros, R. Diesel Particulate Emissions from Biofuels Derived from Spanish Vegetable Oils. SAE paper 2002-01-1657. Nevada. 2002.
34. Lapuerta, M.; Armas, O.; Hernández, J.J.; Ballesteros, R. Biocombustibles para motores Diesel. Laboreo. Nº 388, tomo Marzo, 2002. pp. 53-69.
35. Martínez, M. Estado del arte y perspectivas del biodiesel. Biocarburantes: Una alternativa energética. Curso de verano. UCM-IDAE. San Lorenzo del Escorial. 2002.
36. Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, Ministerio de Medio Ambiente del canadá y Banco mundial: "Estudio sobre los mecanismos de flexibilización dentro del contexto de la Convención Marco de la Naciones Unidas para el cambio climático y el Protocolo de Kioto,Argentina 1999.
37. Part I. Regulated emissions and performance. SAE paper 2000-01-1967.
38. Peterson C:"Production and testing of ethyl and methyl esters, University of Idaho 1994.
39. Plan de Fomento de Energías Renovables. Ministerio de Industria y Energía. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Diciembre, 1999.
40. Pohl, H.W. Hydrogen and other Alternative Fuels for Air and Ground Transportation. John Wiley & Sons. 1995.
41. Red temática "Utilización de Combustibles Alternativos en Motores Térmicos". Módulo 1. Medellín, Septiembre de 2 a 25 de 2002.
42. Schmidt, K.; Van Gerpen, J. The effect of biodiesel fuel composition on Diesel combustion and emissions. SAE paper 961086. 1996.
43. Seradi, A.; Fragioudakis, K.; Teas, C.; Zannikos, F.; Stournas, S. ; Lois, E. Effect of biodiesel addition to Diesel fuel on.
44. Sharp, C.A.; Howell, S.A.; Jobe, J. The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern Diesel engines.
45. Supple, C. (1998). Unlocking the climate puzzle. National geographic. 193.(5), 38-70. Anuario J.J. Hinrichsen S.A. N° XXXVI. Año 2001.
46. Thermal análisis of alternative diesel fuel from vegetable oils JAOCS Vol 76 n° 1 (1999).

47. Tickell, J. From the fryer to the fuel tank.. Tercera Edición. 2000.
48. Ugolini, Jorge. "Biodiesel: el futuro lo está esperando". Revista POSGRAN. Volumen 3, nº 69.
49. Urbanchuk J. "The economic contribution of biodiesel as an Alternative renewaable fuel", ASA-AUS, St. Louis, USA, july 2001.
50. USDA-National Energy Policy:" Nature's power, increasing America's use of renewable and alternative energy, Chapter 6", Washington 2001.

Páginas web visitadas.

51. http://www.afdc.nrel.gov
52. http://www.aupec.univalle.edu.co
53. http://www.biodiesel.com.ar
54. http://www.biodiesel.org
55. http://www.biofuels.doe.gov
56. http://www.cap.junta-andalucia.es
57. http://www.ccoo.es
58. http://www.clarín.com.ar
59. http://www.coopteo.es
60. http://www.cytoculture.com
61. http://www.hachette.es
62. http://www.lanacion.com.ar
63. http://www.pangea.org
64. http://www.peugeot.com.ar
65. http://www.pipeline.to
66. http://www.redauto.robotiker.es
67. http://www.savoiapower.8k.com/tinyES.html
68. http://www.soygold.com
69. http://www.soypower.net

Anexo 1.Reportes dados por el analizador de gases.

****
* ECOM SG-Plus *
****

Date	Time
24.06.00	09:55:49

Fuel type :

Diesel Punto 1

T. room	30	°C
T. gas	282	°C
O2	1,8	%
CO	-----	ppm
NO	203	ppm
NO2	0	ppm
NOx	203	ppm
SO2	414	ppm
CO2	14,0	%
Lambda	1,09	
Eff.	89,6	%
Losses	10,4	%

****
* ECOM SG-Plus *
****

Date	Time
26.06.19	16:23:03

Fuel type :

Biodiesel Punto 1

T. room	30	°C
T. gas	267	°C
O2	6,5	%
CO	-----	ppm
NO	99	ppm
NO2	0	ppm
NOx	99	ppm
SO2	0	ppm
CO2	10,6	%
Lambda	1,45	
Eff.	87,0	%
Losses	13,0	%

****
* ECOM SG-Plus *
****

Date	Time
24.06.00	10:01:53

Fuel type :

Diesel Punto 2

T. room	30	°C
T. gas	364	°C
O2	1,7	%
CO	-----	ppm
NO	212	ppm
NO2	0	ppm
NOx	212	ppm
SO2	367	ppm
CO2	14,1	%
Lambda	1,09	
Eff.	86,3	%
Losses	13,7	%

****
* ECOM SG-Plus *
****

Date	Time
26.06.19	16:31:22

Fuel type :

Biodiesel Punto 2

T. room	30	°C
T. gas	325	°C
O2	5,8	%
CO	-----	ppm
NO	110	ppm
NO2	0	ppm
NOx	110	ppm
SO2	0	ppm
CO2	11,1	%
Lambda	1,38	
Eff.	84,6	%
Losses	15,4	%

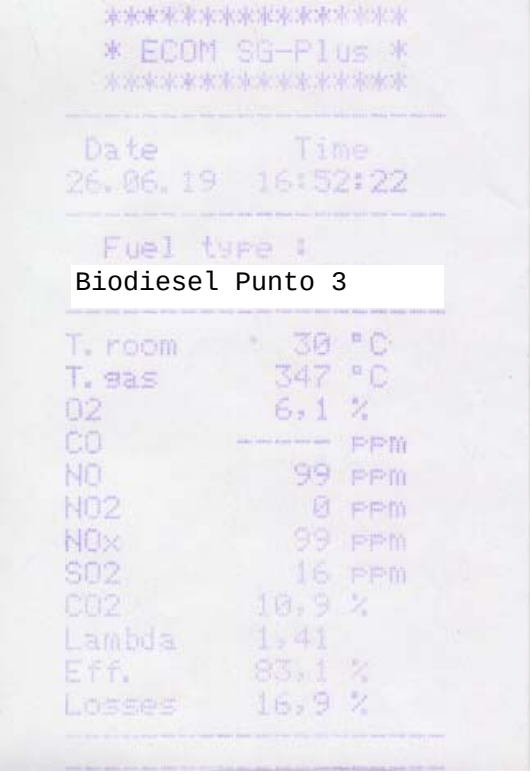
Anexo 1. Continuación. Reportes dados por el analizador de gases.

```
*****************
* ECOM SG-Plus *
*****************

Date          Time
24.06.00   10:04:53

Fuel type :
Diesel Punto 3

T. room       30 °C
T. gas       397 °C
O2           1,9 %
CO         ------ ppm
NO           204 ppm
NO2            0 ppm
NOx          204 ppm
SO2          238 ppm
CO2         13,9 %
Lambda      1,10
Eff.        84,7 %
Losses      15,3 %
```



```
*****************
* ECOM SG-Plus *
*****************

Date          Time
26.06.19   16:52:22

Fuel type :
Biodiesel Punto 3

T. room       30 °C
T. gas       347 °C
O2           6,1 %
CO         ------ ppm
NO            99 ppm
NO2            0 ppm
NOx           99 ppm
SO2           16 ppm
CO2         10,9 %
Lambda      1,41
Eff.        83,1 %
Losses      16,9 %
```