



Facultad de Ingeniería Mecánica

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales



Trabajo de Diploma

Título:

*“Evaluación de las posibilidades de la utilización del aceite de higuera (*Ricinus communis*) como combustible en MCI”.*

Autor:

Daikel Quintero González.

Tutores: *MSc. Iosvani López Díaz.*

MSc. Lizet Rodríguez Machín.

Curso: 2012-2013

Año: 55 de la Revolución.



Facultad de Ingeniería Mecánica

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales



Trabajo de Diploma

Título:

*“Evaluación de las posibilidades de la utilización del aceite de higuera (*Ricinus communis*) como combustible en MCI”.*

Autor:

Daikel Quintero González.

Tutores: *MSc. Iosvani López Díaz.*

MSc. Lizet Rodríguez Machín.

Curso: *2012-2013*

Año: *55 de la Revolución.*

PENSAMIENTO

“Cuba prioriza hoy el desarrollo de las fuentes renovables de energía, su uso eficiente y el ahorro como centro de su política nacional frente a la crisis energética que vive el mundo”

Fidel Castro Ruz.

DEDICATORIA

A mi Mamá Rosa María, por traerme a la vida y convertirme en el hombre que hoy soy.

A mi Papá Eduardo, por ser mi guía y ejemplo en todos los aspectos de la vida.

A mi hermano y mejor amigo Eduardito, por ser cómplice de todo lo bueno y malo que ha pasado en mi vida.

A mi tío Arsenio, por su constante apoyo y preocupación desde que nací.

A mi querida abuela Olga, por su ayuda desinteresada brindada a mi mamá y a mí.

A ellos especialmente está dedicado este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado del esfuerzo de muchas personas que de forma directa o indirecta han ayudado a que se cumpla mi sueño.

Primero que todo quisiera agradecerle a Dios por permitirme llegar al final de este largo camino.

Aunque el mayor agradecimiento es para mi tutor y además gran amigo MSc. Iosvani López Díaz, por su confianza, dedicación, su paciencia y la invaluable ayuda prestada.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica por el conocimiento que me brindaron durante estos cinco años.

A todos mis compañeros de año, pero especialmente a Rigo Frank, Willian, Ignacio y Yosmani por los momentos buenos y malos compartidos.

A toda mi familia y compañeros más allegados Roxana, Laura, Javier, Leosvani, Carlos, Adonis, Braulio y Yuniel.

A todos ustedes muchas gracias.

Si alguien más se considera parte de este gran sueño por favor discúlpeme y de igual modo muchas gracias....

RESUMEN

En el presente trabajo se selecciona y caracteriza el cultivo de la Higuiereta como potencial proveedor de aceite vegetal con fines energéticos en las condiciones de Cuba, se evalúan tres alternativas de utilización del mismo: en su estado natural con precalentamiento, modificado a partir de la reacción de transesterificación en biodiesel y mezclado directamente con etanol, dada su capacidad de ser miscible con el mismo por presentar grupos hidroxilo asociados a sus cadenas de carbono. Luego de definir la última alternativa antes mencionada como la más promisoría para nuestras condiciones, se estudia el comportamiento de la viscosidad de estas mezclas en función de la razón etanol/aceite y se selecciona aquella composición que según sus propiedades combustibles podría ser empleada en motores de encendido por compresión con mejores resultados, analizando su influencia en los principales parámetros de funcionamiento de un motor Moto Cuba en banco de prueba.

SUMMARY

In the present project selection and characterization of the cultivation of the Higuera as a potential supply of vegetable oil as an energy resource under the conditions of Cuba, three alternatives of use of the same are evaluated: in their natural state with warm-up, as amended starting from the transesterificación reaction in biodiesel and blended directly with ethanol, given their capacity to be miscible with the same one to present groups hydroxyl associated to their chains of carbon. After defining the latter alternative mentioned before as the most promising for our conditions, the behavior of the viscosity of these mixtures are studied in function of the reason etanol/aceite and that composition is selected that could be employed in combustion engines by compression with better results according to its combustible properties, analyzing its influence in the main parameters of operation of a motor Moto Cuba in supporting bank.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: Estado del Arte.....	5
1.1 Problemática del uso de suelos fértiles o cultivos alimenticios con fines energéticos.	5
1.2 Posibilidades de empleo de aceites vegetales con fines energéticos en Cuba.....	5
1.3 Caracterización de la Planta de Ricinus Comunnis (Higuereta).	8
1.3.1 Clasificación.....	9
1.3.2 Variedades botánicas.	9
1.3.3 Origen.....	10
1.3.4 Cultivo del árbol de ricino [5].....	10
1.3.5 Beneficios medio ambientales, sociales y económicos del cultivo del Ricino.	12
1.3.6 Semilla de la planta.	13
1.3.7 Uso de las semillas.	13
1.3.8 Composición de la semilla.....	14
1.4 Propiedades del aceite de higuereta (Ricinus Communis).	14
1.4.1 Estructura molecular del aceite de higuereta.....	15
CAPÍTULO II. Materiales y Métodos.....	17
2.1 Posible utilización del Aceite de Higuereta puro como combustible en un M.C.I.....	17
2.1.1 Estudio de la influencia de la temperatura en la viscosidad del aceite de higuereta.....	18
2.1.2 Pasos para el cálculo de las viscosidades de los líquidos estudiados.	19
2.1.3 Cálculo de las magnitudes reológicas.	20
2.1.4 Consecuencias del aceite de Higuereta puro en un M.C.I.	21
2.1.5 Posibles modificaciones en los motores de combustión interna para poder utilizar aceite de Higuereta puro como combustible.	22
2.2 Posible utilización del aceite de Higuereta como materia prima en la obtención de biodiesel para su empleo en M.C.I.	22
2.2.1 Proceso de transesterificación.....	23
2.2.2 Resultados presentados por algunos autores en investigaciones destinadas a la obtención de biodiesel.	24
2.2.3 Consecuencias que puede presentar un M.C.I al utilizar biodiesel como combustible.	25
2.2.4 Evaluación preliminar de las posibilidades de obtención de biodiesel a partir de etanol, aceite de higuereta (Ricinus communis) e hidróxido de potasio (KOH) como catalizador mediante el proceso de transesterificación.	27

2.2.5 Estudio preliminar de los componentes utilizados en las reacciones.....	27
2.2.6 Procedimiento seguido para la realización de las reacciones.....	28
2.3 Posible utilización del aceite de higuera mezclado con etanol en un M.C.I.....	29
2.3.1 Determinación de las propiedades físico-químicas de la variante seleccionada para su utilización como combustible en el M.C.I.	30
2.4 Descripción del banco de pruebas.	32
2.4.1 Metodología empleada para el ensayo en banco de prueba.	34
2.4.2 Estimación de la fuerza máxima del dinamómetro sobre la balanza.	34
2.4.3 Ensayo de característica exterior de velocidad.....	36
CAPÍTULO III. Análisis de los Resultados.	37
3.1 Resultados del cálculo de la viscosidad dinámica del aceite de higuera puro cuando varía la temperatura.	37
3.2 Resultados de la obtención de biodiesel a partir de la reacción de transesterificación.....	39
3.2.1 Resultados obtenidos al medir la viscosidad de las dos reacciones de biodiesel y compararla con la del diesel.....	39
3.3 Formulación de mezclas de etanol con aceite vegetal, variando el tipo de aceite vegetal.....	41
3.4 Formulación de mezclas de etanol con aceite de higuera.....	42
3.4.1 Resultados de las mediciones de viscosidad realizadas a las mezclas.....	42
3.5 Ensayo de característica exterior de velocidad en el banco de pruebas, empleando la mezcla escogida.	45
3.5.1 Análisis de los resultados obtenidos en el banco de pruebas, empleando como combustible la mezcla seleccionada y comparándola con el diesel.	45
CONCLUSIONES.....	49
RECOMENDACIONES.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51

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.

El consumo acelerado de estos recursos ha provocado una significativa reducción en su disponibilidad a nivel internacional. Precisamente, la actual dependencia que presenta el desarrollo de la humanidad de los combustibles fósiles es lo que ha conllevado la utilización irracional de los mismos, si se tiene en cuenta que el ritmo de consumo actual de estos recursos no se corresponde con los prolongados periodos de tiempo que se necesitan para su producción de forma natural. Las reservas probadas de petróleo correspondientes a 2010 son del orden de 1383,2 miles de millones de barriles, concentrándose las principales reservas en las regiones del planeta que se muestran en la Figura 1.

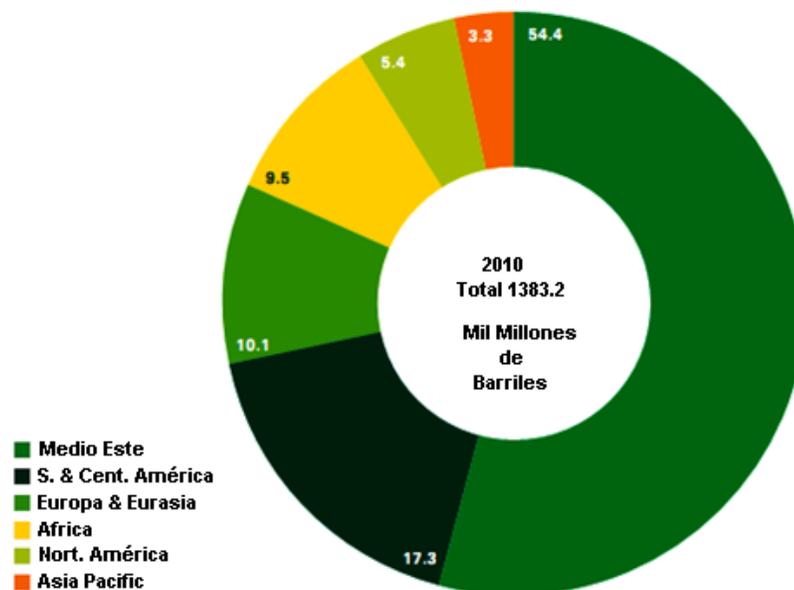


Figura 1. Reservas globales de petróleo (%) correspondientes al año 2010.

(Fuentes: BP Statistical Review of World Energy).

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. Esta búsqueda de fuentes de energías renovables y limpias se ha convertido en una necesidad urgente, debido a los graves problemas ambientales que ha causado la liberación de contaminantes provenientes de la quema de combustibles fósiles y a la disminución de las reservas petroleras. Existen varias fuentes alternativas de energía que poseen un gran potencial para cubrir nuestras necesidades energéticas en el futuro, dentro de estas fuentes se encuentran: sol, viento, mareas, olas y biomasa; esta última ha cobrado gran importancia en los últimos años y dentro de ella ubicamos a los biocombustibles que son aquellos combustibles obtenidos de una fuente biológica, de manera renovable a partir de restos orgánicos. Dentro de los biocombustibles se encuentra el biodiesel (BD). El BD está definido por éteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales. Este representa una alternativa para la sustitución del diesel derivado del petróleo. Las emisiones debido a la combustión del BD son menores en comparación con aquéllas originadas por la combustión del diesel convencional.

Uno de los factores a considerar en la producción de los biocombustibles se encuentra en las materias primas utilizadas. El reto para cualquier país o región es la implementación de procesos de producción alimenticia ó la utilización de suelos fértiles para la producción de estos biocombustibles. Sin embargo existen alternativas que permiten reutilizar aquellos suelos que ya no son usados para el cultivo de los alimentos clásicos como la soya, trigo y el maíz entre otros y además permite evadir el debate de la factibilidad de los biocombustibles en el mundo moderno debido a las limitaciones que tendrían los recursos agrícolas (principalmente al agua) sin afectar la seguridad alimentaria, es la de investigar opciones de producción de energía aprovechando recursos biológicos locales. Es decir, investigar opciones de producción de biodiesel a partir de aceites de especies vegetales abundantes (nativas o introducidas),

Una de estas opciones vegetales, altamente promisorias en términos de contenido de biomasa, es la especie (*Ricinus communis*), comúnmente conocida como higuera. Cultivo que no requiere de suelos ricos en nutrientes, desarrollándose productivamente para diversas aplicaciones alternativas, siendo la principal fuente de obtención de Aceite de Ricino. Este está establecido de manera silvestre en Cuba, lo cual deja constancia de su total adaptabilidad a las condiciones edafoclimáticas de nuestro país, sin embargo el aceite vegetal proveniente de sus semillas aun no ha sido suficientemente empleado de manera directa en la alimentación de motores combustión interna ni para la obtención de biodiesel a partir del etanol proveniente de nuestra industria azucarera y a su vez éste presenta características especiales por ser totalmente miscible en etanol, lo cual abre el camino para una nueva aplicación, la posibilidad de emplearlo directamente mezclado con este alcohol en la alimentación de motores de encendido por compresión, evitando de este modo la propia reacción de transesterificación , la cual requiere de agitación de los reaccionantes y empleo de catalizador y calentamiento, lo cual eleva los costos energéticos del proceso.

Problema científico

Es necesario estudiar las potencialidades del aceite de higuera para su utilización como biocombustible en las condiciones cubanas, ya sea en su estado puro, a partir de la reacción de transesterificación (biodiesel) o como parte constituyente de una mezcla combustible etanol/aceite.

Hipótesis

Es factible la utilización del aceite de higuera como biocombustible o parte constituyente del mismo en motores de encendido por compresión, logrando de esta manera la sustitución de combustibles fósiles.

Objetivos generales

Estudiar la posibilidad de empleo de aceite de higuera como combustible en motores de encendido por compresión, evaluando la viabilidad de usarlo en su estado puro, a partir de la reacción de transesterificación (biodiesel) o como parte constituyente de una mezcla etanol/aceite.

Objetivos específicos

1. Estudiar y caracterizar el cultivo de la higuera como potencial proveedor de aceite vegetal con fines energéticos en las condiciones de Cuba.
2. Seleccionar un modo de empleo del aceite de higuera como combustible para motores de encendido por compresión, teniendo en cuenta la posibilidad de usarlo en su estado puro, a partir de la reacción de transesterificación (biodiesel) o como parte constituyente de una mezcla etanol/aceite.
3. Evaluar la alternativa seleccionada en un motor de encendido por compresión, teniendo en cuenta su influencia en los principales parámetros de funcionamiento.

CAPÍTULO I: Estado del Arte.

1.1 Problemática del uso de suelos fértiles o cultivos alimenticios con fines energéticos.

El principal inconveniente de todo país en la producción de los biocombustibles mediante aceites vegetales es la utilización de los suelos fértiles aprovechables en la siembra de cultivos alimenticios y el uso de cereales como la soya, maíz, trigo entre otros en la fabricación de aceites industriales como materia prima para la producción de los biocombustibles. Como respuesta a esto se han realizado numerosas investigaciones y se han encontrado opciones viables para la producción de estos aceites. Existe un cultivo que ha despertado el interés de los investigadores debido a que posee un potencial favorable como proveedor de aceite vegetal con fines energéticos, dado sus altos rendimientos en aceite por unidad de superficie, además de no ser exigente en cuanto a condiciones de suelo y clima se , suelos muy fértiles ya que se reproduce bien en suelos de baja fertilidad por lo que pueden ser reutilizados aquellos que su uso ya a sido intensificando, y que presentan la pérdida de nutrientes, erosión y desestabilización de las capas freáticas. La principal ventaja de esta planta es que no es comestible, de tal manera este tipo de actividad no interfiere en la producción alimenticia de nuestro país, aspecto por el cual ha sido muy criticada la producción de este biocombustible.

1.2 Posibilidades de empleo de aceites vegetales con fines energéticos en Cuba.

En el caso de Cuba, se han realizado diversos estudios sobre la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales. Uno de ellos es utilizando como materia prima aceite de girasol, demostrando que puede ser viable de alguna forma aunque presenta un gran inconveniente y es que este aceite es de suma utilización en la industria alimenticia [10, 11,12]. En otros estudios realizados en distintas partes del mundo se ha demostrado que dentro de los aceites vegetales, el aceite de ricino representa la materia prima más viable para la producción de BD; debido a que es extraído de la semilla de higuera (Ricinus communis), una planta endémica de zonas tropicales y subtropicales, que crece de forma silvestre.

Según la herramienta de estadísticas de exportaciones e importaciones Trade Map en el año 2009, a nivel internacional la producción del Aceite de Ricino se encuentra en constante crecimiento, siendo los principales países importadores de este producto: Francia con 95.890 Ton, China con 84.256 ton y Estados Unidos con 49.832 ton [6]. Para Cuba, debido a que posee un clima adecuado para el cultivo de la higuierilla, se puede convertir en una gran oportunidad para ocupar aquellos suelos deforestados por otros cultivos o de poca fertilidad. Además, diversos estudios han demostrado que el cultivo de higuierilla es adecuado en pequeña escala, situación que podría mejorar las condiciones de vida de los pequeños agricultores. Podemos decir que ya en nuestro país se está comenzando a buscar vías que permitan la diversificación de las fuentes de energía debido a que es un reto que permitirá modificar el actual sistema energético mundial, inviable en el largo plazo debido a los impactos ambientales que genera, además existen varios grupos en el país que trabajan en el tema y se dispone de financiamiento internacional para instalar la primera planta industrial de producción de biodiesel. En la zona oriental de Cuba, en las provincias de Guantánamo, Holguín y las Tunas se ha iniciado el cultivo de la Higuierilla (*Ricinus communis*), según se muestra en las figuras 2. El objetivo fundamental de estas plantaciones es aumentar la producción de aceite vegetal destinado a la fabricación de biocombustibles, fundamentalmente biodiesel. [3].



Figuras 2. Siembra de 9600 m² de Higuiereta (*Ricinus Communis*) en la provincia de Guantánamo en la granja agropecuaria (Paraguay), 2007. [3].

Existe una gran variedad de plantas oleaginosas, pero estudios realizados en cuanto al rendimiento de aceites no comestibles que se adapten bien a suelos semiáridos demuestran que las dos especies que serían más factibles de reproducir en nuestro país son la *Jatropha Curcas* y la *Ricinus Communis* (Higuereta). Es por eso que estas dos especies están siendo estudiadas en nuestro país, existen plantaciones de higuereta y *Jatropha* que se están fomentando en la granja Paraguay (250 ha de *Jatropha* y 50 ha de higuereta) en parcelas de pequeños agricultores de San Antonio del Sur (suelos semiáridos), ambas en la provincia de Guantánamo [3].

A continuación podemos observar el rendimiento de aceite por hectárea de algunas plantas oleaginosas [1].

Variedades de plantas oleaginosas.

Tabla 1. Rendimiento en aceite (L/ha) de diferentes cultivos oleaginosos.

Nombre de las Plantas	Rendimiento (L/ha)
Soya (<i>Glicine max</i>)	420
Arroz (<i>Oriza sativa</i>)	770
Tung (<i>Aleurites fordii</i>)	880
Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	890
Maní (<i>Arachis hipogaea</i>)	990
Colza (<i>Brassica napus</i>)	1100
Higuereta (<i>Ricinus communis</i>)	1320
<i>Jatropha</i> (<i>Jatropha curcas</i>)	1590
Aguacate (<i>Persea americana</i>)	2460
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	2510
Cocotero (<i>Acrocomia aculeata</i>)	4200
Palma (<i>Elaeis guineensis</i>)	5550

Como podemos ver en el país hay experiencias positivas tanto en el cultivo de las plantas oleaginosas no comestibles (higuereta y *Jatropha*), como en el procesamiento semi-industrial para la obtención del biodiesel. En el presente trabajo se realiza un estudio profundizado de la planta Higuereta (*Ricinus communis*) con el objetivo fundamental de obtener aceite vegetal como recurso energético a emplear en los motores de encendido por compresión y se estudian los diferentes métodos de empleo del mismo.



Figuras 3. Planta (*Ricinus communis*).

1.3 Caracterización de la Planta de *Ricinus Communis* (Higuereta).

Planta herbácea alta a veces algo arbustiva, de color verde claro a azul grisáceo, en ocasiones rojiza mide hasta 6 m de alto, su tallo es engrosado y ramificado, sus hojas son lámina casi orbicular de 10 a 60 cm de diámetro profundamente palmatilobada, las divisiones ovado-oblongas a lanceoladas, agudas o acuminadas, borde irregular dentado-glanduloso; peciolo tan largo o más largo que la lámina. Flores reunidas en inflorescencias terminales, las rojas son masculinas y se encuentran en la parte inferior con un perianto de 6 a 12 mm de largo, están compuestas por 5 sépalos y numerosos estambres ramificados de color amarillo claro casi blanco, las flores femeninas se encuentran en la parte superior y tienen un perianto de 4 a 8 mm, o vario densamente cubierto por largos tubérculos blandos, frutos y semillas en una capsula subglobosa, de 1.5 a 2.5 cm de largo, con espinas cortas y gruesas; semillas elipsoides, algo aplanadas, de 10 a 17 mm de largo, lisas brillantes, frecuentemente jaspeadas de café y gris carunculadas [5].

1.3.1 Clasificación.

Nombre Científico: *Ricinus comunnis*

Reino: Plantae

Subreino: Traqueobionta (plantas vasculares)

Superdivisión: Spermatophyta (planta con semilla)

División: Magnoliophyta (planta con flor)

Clase: Magnoliopsida (dicotiledóneas)

Subclase: Rosidae

Orden: Euphorbiales

1.3.2 Variedades botánicas.

Existe una gran variedad de formas de esta especie, en tamaño, color de los tallos y de las hojas, forma de ramificarse, tamaño, color y relieve de los granos, etc. A continuación se describen las principales subespecies del *Ricinus Communis* [9].

***R. communis* var. *sanguineus*:** El tallo, las ramas y las hojas son de color rojo vinoso; de gran porte y muy vigorosa. Posee semillas grandes y alto porcentaje de aceite.

***R. communis* var. *inermis*:** Parecida a la anterior pero de clima más tropical. Las cápsulas no poseen espinas. Poca rica en aceite.

***R. communis* var. *minor*:** De baja altura (1,0 a 1,5 metros), ramificada desde la base, precoz, con cápsulas dehiscentes y semillas pequeñas.

***R. communis* var. *mayor*:** De mayor altura que la anterior, de menor precocidad y dehiscente. Posee semillas de mayor tamaño.

***R. communis* var. *viridis*:** Posee tallos, hojas y frutos de color verde. Muy abundante en África occidental, carece de cera y sus semillas son pequeñas.

***R. communis* var. *zanzibarinus*:** Netamente tropical, con gran frondosidad, muy vigorosa. Tallos y hojas rojas revestidas de cera. Semillas muy grandes pero de poco porcentaje en aceite.

1.3.3 Origen.

Es originaria de África de donde se extendió el Medio Oriente como planta silvestre. En la India y la China fue conocida hace unos 3000 años probablemente se introdujo en América después del descubrimiento. Los egipcios hace más de 4000 años, empleaban la Higuera en la iluminación ó alumbrado de sus casas, parece que era una planta altamente estimada porque en algunas tumbas egipcias se ha encontrado sus semillas [9].

1.3.4 Cultivo del árbol de ricino [5].

Requerimiento climáticos y de suelo:

Para realizar el cultivo del árbol de ricino es necesario conocer las condiciones climáticas y del suelo, las cuales se encuentran descritas a continuación.

Condiciones del suelo:

El ricino puede ser sembrado en diferentes tipos de suelo, excepto aquellos que acumulan exceso de agua provocando encharcamientos, no tolera los suelos salinos o sódicos. Los suelos con pendientes arriba de los 12% de pendiente limitan el desarrollo del cultivo.

Precipitaciones:

El ricino necesita una precipitación promedio anual de 500 mm de lluvia equivalente 5000 m³/ha. Éste puede producir con baja disponibilidad de agua, pero si dispone de ella, puede prolongar su periodo de fructificación.

Luminosidad, temperatura, altitud y pH del suelo:

El árbol de ricino es exigente a la alta luminosidad, requiriendo para completar su ciclo de 10 a 12 horas de luz solar diariamente. Se desarrolla bien con temperaturas que van entre los 20° a 30° C. y en un pH neutro, pero tolera el pH levemente alcalino.

Preparación del suelo:

Las labores consisten en una arada a 20cm de profundidad, según el suelo sea liviano o pesado, luego entre una o dos pasadas de rastra en sentido cruzado. En la última, que debe realizarse inmediatamente antes de sembrar, se acostumbra hacer surcos orientados perpendicularmente a la dirección del viento.

Siembra:

En siembras comerciales se utiliza la sembradora con un disco de distribución adecuado para depositar una semilla por metro, a una profundidad de 5 cm cuando hay humedad y a 8 cm, si no hay humedad, con un espaciamiento entre surcos de 1m, generalmente. Respetar la profundidad de siembra mencionada es de gran importancia, ya que el calor, debido al alto contenido de aceite de la semilla, la quema y disminuye mucho la germinación. Con variedades de porte enano, la densidad de siembra recomendada es de 10.000 a 15.000 plantas por hectárea. En el caso de pérdida superior al 25% de plantas sembradas, se recomienda resembrar. El período de la germinación de la semilla depende de la temperatura del suelo, si la temperatura del suelo es baja (menos de 20° C) dura de 15 a 20 días, cuando la temperatura es arriba de 30° C, puede durar 6 días.

Fertilización:

El árbol de ricino es exigente en nutrientes para producir buenos rendimientos, razón por la cual se debe conocer el nivel nutricional del suelo mediante el análisis en el laboratorio para suplir lo que le haga falta. Cuando el pH está debajo de 5 se puede aplicar cal para corregir el pH, por lo menos tres meses antes a la siembra.

Cosecha:

La cosecha de esta planta se inicia normalmente a los 120 días cuando las variedades son precoces y a los 150 días en las más tardías. En las variedades en las que el fruto no se abre (indehiscente), la cosecha se hace cuando todos los frutos están secos, por lo que la mayoría de las veces se hace una sola recolección. La cosecha mecanizada requiere variedades enanas y uniformes tanto en crecimiento como en ramificaciones, con cápsulas indehiscentes y las hojas deben eliminarse ya sea natural o artificialmente con defoliantes.

Enfermedades:

Las condiciones del clima son determinantes para la presencia de hongos que provocan enfermedades en el ricino. Hay enfermedades que dañan al cultivo ya sea en ambiente seco o húmedo y se presentan y reproducen con rapidez y frecuencia considerable. La enfermedad más limitante en la producción de ricino es el moho ceniciento causado por el *Botrytis Ricino*. Este agente ataca y destruye toda la estructura floral de la planta. Para su control es necesario eliminar todas las partes y restos de plantas dañadas, realizar rotación de cultivos y sembrar en áreas donde el año anterior no se presentó la enfermedad.

Almacenamiento:

El fruto puede pasar hasta tres años almacenado en un lugar seco y ventilado, evitando contacto con el suelo. Si no tiene daños la semilla, puede almacenarse en forma segura los frutos.

1.3.5 Beneficios medio ambientales, sociales y económicos del cultivo del Ricino.

Los cultivos de Ricino, como recurso forestal, contribuyen con la protección del suelo, mejora la incorporación de materia orgánica, evita la erosión y mejora la capacidad de retención de humedad. Todas las partes del Ricino se utilizan, por lo tanto no hay desperdicios que causen problemas ambientales por contaminación. Son las planta llamadas a sustituir los combustibles fósiles en la producción de diesel.

Los cultivos son amigables con el medio ambiente especialmente por la fijación de carbón en troncos y raíces, entre 7–8 toneladas de CO₂ por ha al año. Los subproductos son aprovechados para la elaboración de alimento para animales y abonos. Puede llegar a ser una fuente de trabajo y desarrollo en regiones cuyas condiciones no son óptimas para el establecimiento de otros cultivos comerciales; ya que este cultivo para su establecimiento y manejo requiere de mano de obra no calificada.

1.3.6 Semilla de la planta.

La semilla o pepita es la estructura mediante la cual se realiza la propagación de la planta, por ello se llaman espermatofitas (plantas con semilla). La semilla se produce por la maduración de un óvulo de una gimnosperma o de una angiosperma. Una semilla contiene un embrión del que puede desarrollarse una nueva planta bajo condiciones apropiadas. Pero también contiene una fuente de alimento almacenado y está envuelto en una *cubierta protectora* [3].



Figuras 4. Variedad de semillas de higuera. (Fotos tomadas por el autor).

1.3.7 Uso de las semillas.

El aceite extraído de las semillas nombrado aceite de ricino, tiene un mercado internacional creciente, asegurado por 700 aplicaciones que incluyen usos medicinales y cosméticos y sustitución del petróleo en plásticos y lubricantes. El producto también se utiliza en la producción de fibra óptica, vidrio a prueba de balas y prótesis óseas. Además, es indispensable para impedir la congelación de combustibles y lubricantes de aviones y cohetes espaciales, a bajísimas temperaturas. El aceite es adecuado contra las úlceras de piel, alivia los ojos cuando están enrojecidos o irritados, aplicando una gota a cada uno. Eliminan los grandes lunares que aparecen en el cuerpo y las manchas de la cara. También es utilizado en la preparación del paciente para las radiografías estomacales. El principal uso que en la actualidad se le da a este aceite es en la industria para la producción de biocombustible [6].

1.3.8 Composición de la semilla.

Está compuesta por una resina que es altamente tóxica para el hombre y los animales. Se debe tener cuidado con los residuos de este compuesto en la extracción del aceite.

Tabla 2. Composición y porcentaje de aceite de la semilla [9].

COMPOSICION	PORCENTAJE
Aceite	46.19
Almidón	20.00
Albúmina	0.50
Goma	4.31
Resina Bruta Y Principios Amargos	1.91
Fibra Leñosa	20.00
Agua	7.09
TOTAL	100.00

1.4 Propiedades del aceite de higuera (Ricinus Communis).

El aceite de higuera llamado también aceite de ricino o de castor se extrae de las semillas de la higuera (Ricinus Communis). Su principal componente es el ácido ricinoleico, el cual se encuentra formando el triglicérido simple denominado triricinoleína, cuya concentración en porcentaje por peso es cercana al 90%. Adicionalmente, en el aceite de higuera se pueden encontrar pequeñas cantidades de tripalmitina, y otros triglicéridos mixtos. Dada su naturaleza química, el aceite de higuera es un líquido altamente viscoso, miscible en alcohol y ácido acético y de bajo punto de solidificación. Este es un aceite espeso, entre los aceites vegetales, el aceite de ricino se distingue por su alto contenido de ácido ricinoleico, como antes se había mencionado; una proporción más alta de hidroxácidos grasos que la de cualquier otro aceite vegetal [1].

El enlace no saturado del aceite de ricino, el alto peso molecular de (298), su índice de yodo de (84), su índice de saponificación de (175 hasta 183), el bajo punto de fusión de (5°C) y el muy lento punto de solidificación de (-12°C hasta -18°C) hacen que sea útil a la industria, proporcionando la más alta y estable viscosidad de todos los aceites vegetales. Las características que posee el aceite de ricino cumplen con la mayoría de los requisitos para la obtención de biocombustible y biodiesel, logrando tener un buen rendimiento de éste. Se deduce que el aceite de ricino es la sustancia más adecuada para producir biodiesel, porque es el único aceite vegetal soluble en alcohol, y por lo tanto no se requiere la aplicación de calor y la consiguiente demanda de energía para transformarlo en combustible [2].

Ácidos grasos presentes en el aceite.

El aceite de higuera se encuentra compuesto por los siguientes ácidos grasos

Tabla 3. Composición de ácidos grasos del aceite de higuera

Ácido Graso	Porcentaje
Ácido ricinoleico	70 %
Ácido oleico	12 %
Ácido ricinico	12 %
Otros	6 %

Debido a su composición química posee una densidad a 15 °C de 0.964 g mL. Conserva su viscosidad a altas temperaturas y resiste muy bajas sin congelarse, razón por la cual se emplea en motores con altas revoluciones [7].

1.4.1 Estructura molecular del aceite de higuera.

Las plantas oleaginosas, a través de sus aceites, son susceptibles de ser aprovechadas como alternativa energética. Su abastecimiento está asegurado, ya que las grasas y los aceites, los lípidos, junto a las proteínas e hidratos de carbono, constituyen la principal materia orgánica de los seres vivos. Las grasas animales, los aceites de pescado y vegetales tienen en común el ser ésteres de ácidos

carboxílicos de cadena larga y del triol denominado glicerina. Los ácidos carboxílicos de cadena larga que pueden obtenerse de las grasas se denominan ácidos grasos, los cuales pueden ser saturados o insaturados. También se denominan glicéridos y presentan la estructura representada en la siguiente figura.

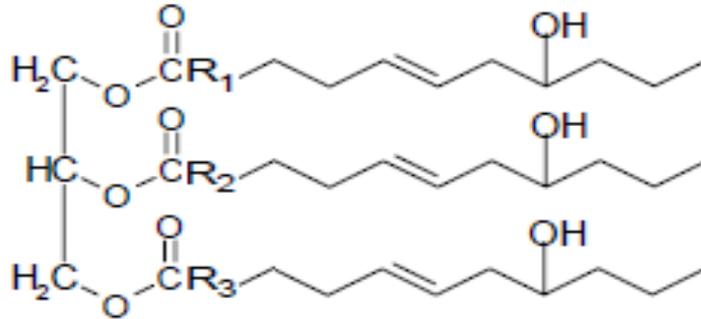


Figura 5. Estructura molecular de un aceite vegetal.

En ella, los radicales R₁, R₂ y R₃ representan las cadenas de hidrocarburos de ácidos grasos, pudiendo ser idénticos, dependiendo del tipo de aceite, aunque generalmente poseen distinta longitud y número de dobles enlaces. Las grasas naturales son, por lo general, mezclas complejas de triésteres de la glicerina (triglicéridos), siendo estos los lípidos más importantes. En la figura también se puede observar la presencia de (OH), es un grupo hidroxilo en la estructura del ácido ricinoleico lo cual provee de características especiales al aceite de ricino y a sus derivados.

CAPÍTULO II. Materiales y Métodos.

Debido a que se determinó que según las especies de plantas oleaginosas mencionadas anteriormente la más factible para extraer aceite vegetal y utilizarlo en la producción de biocombustibles según las condiciones climáticas y los suelos de Cuba es la planta (Ricinus Communis) más conocida como Higuiereta, es necesario mencionar que existen cultivos oleaginosos que son fáciles de cultivar y con gran contenido de aceite vegetal como son, (girasol, , soya, etc.), pero estos a su vez constituyen recursos alimenticios y demandan de suelos fértiles para su desarrollo, lo cual entra en contradicción con la alimentación de la población, posición que ha sido mantenida por nuestro gobierno y especialmente por Fidel Castro, quien refiriéndose al tema mencionó “Los alimentos son convertidos en energéticos para viabilizar la irracionalidad de una civilización que, para sostener la riqueza y los privilegios de unos pocos, incurre en un brutal ataque al medio ambiente y a las condiciones ecológicas que posibilitaron la aparición de vida en la Tierra. La transformación de los alimentos en energéticos constituye un acto monstruoso. El capitalismo se dispone a practicar una masiva eutanasia de los pobres, y muy especialmente de los pobres del Sur, pues es allí donde se encuentran las mayores reservas de la biomasa del planeta requerida para la fabricación de los biocombustibles. Por más que los discursos oficiales aseguren que no se trata de optar entre alimentos y combustibles, la realidad demuestra que esa y no otra es precisamente la alternativa: o la tierra se destina a la producción de alimentos o a la fabricación de biocombustibles”

2.1 Posible utilización del Aceite de Higuiereta puro como combustible en un M.C.I.

En el presente capítulo se establece las condiciones de estudio de las diferentes vías a tener en cuenta para la posible utilización del aceite de esta planta no comestible y poco exigente a condiciones edafoclimáticas como combustible en los motores de encendido por compresión.

2.1.1 Estudio de la influencia de la temperatura en la viscosidad del aceite de higuera.

Se estudia la influencia de la temperatura sobre la viscosidad del aceite vegetal con vistas a definir la posibilidad de emplear este aceite en el sistema de alimentación del motor, para lo cual se incrementa paulatinamente la temperatura con ayuda de un baño de agua, y esta última se circula con la ayuda de una bomba peristáltica a través del viscosímetro, las condiciones experimentales antes descritas se muestran en la Figura 6.



Figura 6. Baño de agua y bomba peristáltica.

Las temperaturas estudiadas fueron (28°C , 40°C , 50°C , 60°C , 70°C , 80°C , 90°C , 95°C , 97°C), y para cada uno de estos valores fue medida la viscosidad del aceite en el viscosímetro Rheotest 2.1, definiendo aquella zona donde la viscosidad del aceite precalentado de aproxima a la del combustible diesel tradicional.

Características del viscosímetro

El viscosímetro (Rheotest) es un viscosímetro rotatorio, de dos sistemas. Las propiedades reológicas de una sustancia pueden ser investigadas mediante un sistema de medición de cilindros de SEARLE o mediante un sistema de cono y plana es muy útil en determinar la viscosidad en líquidos newtonianos y no newtonianos basa su principio de funcionamiento en la rotación de un cilindro concéntrico a otro fijo, ver figura 7., mediante un mecanismo que permite obtener la tensión que se produce debido a la rotación del cilindro para un gradiente de velocidad dado, permite con la utilización de la Ley de Newton del rozamiento calcular la viscosidad del fluido contenido.

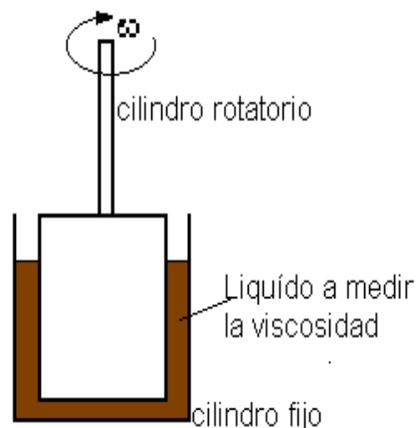


Figura 7. Esquema del funcionamiento del viscosímetro Rheotest durante la medición de la viscosidad.

2.1.2 Pasos para el cálculo de las viscosidades de los líquidos estudiados.

Para efectuar las mediciones de viscosidad tanto del aceite puro como mezclado ó en forma de biodiesel se utilizó el viscosímetro rotatorio Rheotest 2.1, con un juego de cilindro (N), en el paso (I), debido a que dentro del rango de viscosidad de este juego de cilindro se encuentra la del diesel, que es a la cual queremos semejar nuestras mediciones, los datos correspondientes a este juego de cilindros se presentan en la tabla del anexo 1.

El dispositivo de medición de cilindros (N) constituye un sistema **Searle-Couette**. En este dispositivo de medición, el cilindro exterior estacionario cuyo radio es **R** constituye un recipiente de ensayo que toma la sustancia y que está dentro de un recipiente de templar para unión con un termostato de circulación de líquido que sirve para ajustar la temperatura de la sustancia a ser investigada. El cilindro interior rotatorio gira a una velocidad angular constante ω , tiene un radio **r** y una longitud **l**, está unido a un árbol de medición con un resorte helicoidal cilíndrico cuya desviación constituye un medida del momento de torsión **M** efectivo en el cilindro interior. La desviación del resorte se explora mediante un potenciómetro de resistencia que forma parte de un circuito en puente y la variación de la corriente diagonal del puente es proporcional al momento de torsión **M** efectivo en el cilindro interior. Resulta posible calcular con exactitud la tensión tangencial τ y el gradiente de cizallamiento **Dr** para el sistema de cilindros coaxiales.

2.1.3 Cálculo de las magnitudes reológicas.

Tensión tangencial τ efectiva en la sustancia:

$\tau = Z * \alpha$, donde:

(τ): Tensión tangencial (10^{-1} Pa)

(Z): Constante del cilindro (10^{-1} Pa * 1/Skt)

(α): Lectura del valor de la escala del instrumento (Skt)

Nota: La constante del cilindro (Z) se obtienen de la tabla presentada en el anexo (1), al saber que utilizamos el juego de cilindros (N) en el paso (I).

Gradiente de cizallamiento D_r (s⁻¹):

Para determinar los valores del gradiente de cizallamiento se utiliza la tabla que se presenta en el anexo 2, el valor se toma en dependencia de la velocidad de trabajo del viscosímetro y del juego de cilindro seleccionado que en este caso es (N).

Viscosidad dinámica μ :

$\mu = \frac{\tau}{D_r} 100$, Donde:

(μ): Viscosidad dinámica (mPa.S = centipoise)

(τ): Tensión tangencial (10^{-1} Pa)

(**D_r**): Gradiente de cizallamiento (s⁻¹)

Viscosidad cinemática V :

$v = \frac{\mu}{\rho} [m^2 \cdot s]$, Donde:

(μ): Viscosidad dinámica (mPa.S = centipoise)

(ρ): Densidad del líquido [Kg. /m³]

2.1.4 Consecuencias del aceite de Higuereeta puro en un M.C.I.

Debido a su alto índice de viscosidad acarrea serios inconvenientes en el sistema de inyección del combustible, así como en el mecanismo de ruptura y pulverización de las gotas líquidas [24]. Como su valor es elevado, el bombeo y la atomización en los inyectores serán peores, disminuyendo el rendimiento, con lo cual la durabilidad del sistema de inyección disminuirá [23]. Al ser tan elevada la viscosidad, (provoca pobre atomización e ineficiente mezcla con el aire, causando una combustión incompleta), menor volatilidad pero mayor peso molecular (provoca problemas de durabilidad y operatividad por calidad de ignición: arranque en frío, depósitos carbonosos, quemado de inyectores, pegado de segmentos, dilución del aceite lubricante) y el mayor grado de instauración, que polimeriza el lubricante, dañando el motor [22]. Como posible solución para disminuir su viscosidad, se requiere calentar los aceites a altas temperaturas, mediante una resistencia, antes de introducirlos en el sistema de inyección aunque esto traerá consigo que se eleve el consumo de combustible y la emisión de humos aumente.

Experiencias realizadas por diferentes autores en M.C.I con aceites vegetales puros.

Tabla 4. Resultados de experimentos en M.C.I al utilizar aceite puro.

Tipo de Motor (inyección)	Observaciones	Referencias
Directa	<u>Con aceite de soja:</u> durante 32 h, aumentó el consumo, la potencia y la temperatura. Disminuyó la eficiencia térmica.	(Pryor et al; 1983)
Directa	<u>Con aceite de girasol:</u> su uso en motores de inyección directa requieren que sean mezclados con diesel.	(Adams et al; 1983)
Con Precámara	<u>Con aceite ricino y de girasol:</u> no se observaron problemas al no ser su viscosidad, siempre que se filtren los aceites.	(Vermeersch; 1988)

2.1.5 Posibles modificaciones en los motores de combustión interna para poder utilizar aceite de Higuera puro como combustible.

Una alternativa podría ser la adaptación del motor, de modo que permita la combustión de los aceites vegetales sin transformar. El National Biodiesel Board, NBB, en EE.UU., aconseja usar coches preparados para trabajar con los biocombustibles, indicando una extensa relación de marcas estadounidenses que ya han adaptado sus vehículos (NBB, 1992). Es el caso del motor Elsbett, que puede funcionar con cualquier combustible sin precisar modificaciones, o el 'motor mágico' de Berliet, presentado en 1958 por Man, con la idea de que pudiese funcionar directamente con el petróleo crudo, sin refinar (Joriajuria, 1992). No obstante, la empresa Valmet Diesel encontró que los motores Elsbett eran lentos y caros, proponiendo una mejora mediante modificación de las culatas, pistones y sistema de refrigeración por agua para alcanzar altas temperaturas de combustión (VD, 1992). Según Joriajuria (1992), no obstante, la eficiencia térmica de los Elsbett es del orden del 40%, lo cual supone un 10% por encima del rendimiento suministrado por el mejor motor Diesel, en la conversión de la energía térmica del combustible en mecánica. Según este autor, la ventaja principal radica en la posibilidad de 'Elsbettizar' cualquier motor convencional de combustión interna. Para ello se anula la cámara de agua del bloque, se cambian la tapa de los cilindros, los pistones y se agrega un pequeño radiador de aceite. Con este kit de conversión, cualquier motor puede transformarse en policarburante, con las ventajas que conlleva. También se ha propuesto usar motores cerámicos de alta resistencia (Joriajuria, 1992). Esto, aparte de encarecer los costes, supondría abandonar toda la tecnología y equipos que se han desarrollado hasta ahora.

2.2 Posible utilización del aceite de Higuera como materia prima en la obtención de biodiesel para su empleo en M.C.I.

A partir de que se necesita inversiones casi innecesarias además de la gran cantidad de consecuencias y modificaciones que trae consigo el uso del aceite puro como combustible, la gran mayoría de los autores intentando paliar este inconveniente, propusieron su uso mediante la transesterificación.

2.2.1 Proceso de transesterificación.

Origen:

La transesterificación nació en 1853, gracias a los científicos E. Duffy y J. Patrick, se comenzó a usar en 1864, cuando Rochieder describió la preparación de glicerina a través de la etanolisis del aceite de ricino [21]. Otros investigadores han estudiado, con posterioridad, las condiciones de la reacción y los parámetros implicados.

Objetivos:

Los objetivos de la transesterificación son los de eliminar los glicéridos, disminuir el punto de ebullición, de inflamación, punto de vertido y viscosidad. La glicerina de los aceites contribuye a la formación de depósitos y al fuerte olor de los gases de escape, en caso de usarlos como combustible. Si se transesterifican, disminuye la viscosidad y la densidad, ya que la raíz de la glicerina se elimina al sustituirla por un monoalcohol [25].

Proceso de transesterificación:

Es un proceso químico que convierte un éster de ácido orgánico (aceite) en otro éster del mismo ácido. Este método permite romper las moléculas en otras menores sin un coste excesivo. La reacción se muestra en la Figura 8.

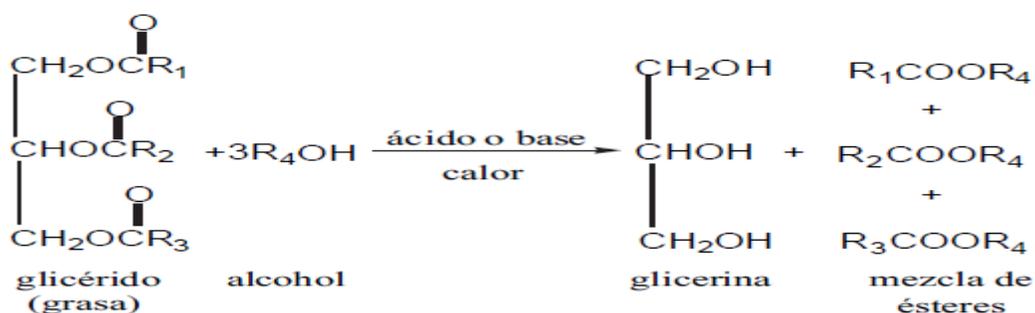


Figura 8. Reacción de transesterificación.

Generalmente, cuando reaccionan alcoholes o fenoles con ácidos y sus derivados se obtienen ésteres. Los métodos más comunes para la obtención de estos últimos son la reacción con ácidos, con cloruros o anhídridos de ácido y con ésteres, que es lo que se conoce como transesterificación. Esta reacción tiene distintos usos industriales (pinturas, poliéster), así como en laboratorio [25].

La transesterificación se basa en un equilibrio, que para ser desplazado hacia la derecha precisa utilizar un gran exceso del alcohol cuyo éster queremos obtener [22], o bien eliminar uno de los productos de la mezcla reaccionante. Este último enfoque es preferible siempre que sea aplicable; de esta manera puede llevarse la reacción hasta la conversión total. Aunque se pueden usar otros alcoholes, el más frecuente es el metanol, entre otros motivos porque, gracias a él, la separación de la glicerina como subproducto se facilita considerablemente [22]. Para aumentar la eficacia y rapidez del proceso, se suele calentar la mezcla. Para un buen rendimiento, se precisa eliminar continuamente el alcohol [20]. La alcoholisis completa de los aceites vegetales depende de la eficacia en la separación de la glicerina formada [25].

2.2.2 Resultados presentados por algunos autores en investigaciones destinadas a la obtención de biodiesel.

En el trabajo presentado por [8] mencionaron que el biodiesel fue obtenido mediante la transesterificación del aceite de higuera con metanol (metanolisis) utilizando NaOH como catalizador. Se utilizó un metanol con un 99.93% de pureza. Para la reacción de transesterificación se utilizó un reactor discontinuo de vidrio con salidas para acoplar un agitador y un condensador. Al reactor se agregó inicialmente el aceite y luego el metóxido previamente preparado mediante el mezclado del metanol con el NaOH.

La reacción se llevó a cabo a presión y temperatura constantes durante un lapso de dos horas. La separación de las fases metilésteres y glicerol se realizó en un embudo de decantación durante un lapso de 24 horas.

Sin embargo en otra investigación dirigida también a la obtención de BD se concluye que este aceite constituye una materia prima promisorio para estos fines, pero la presencia de un grupo hidroxilo en la estructura del ácido ricinoleico provee de características especiales al aceite de ricino y a sus derivados. Debido a la composición química del BD de ricino, ya que el grupo hidroxilo del metil ricinoleato y los grupos hidroxilo de la GL forman puentes de hidrógeno que permiten la miscibilidad de estos dos compuestos, no hay una separación de fases biodiesel-

glicerina formadas durante la reacción de transesterificación. Otro efecto del grupo hidroxilo es la formación de fuertes emulsiones al utilizar agua para purificar el BD [4]. Este trabajo se enfocó en la generación de una metodología experimental para resolver tal problema de purificación. Resultando como mejor método la adición de glicerina (que puede provenir del proceso mismo) para lograr la separación de fases. La reacción se llevó a cabo con las siguientes proporciones molares de aceite, metanol e NaOH (1:6:0.2), respectivamente. Aunque no se observó una separación de fases, la incorporación de GGI hizo posible la extracción de GL formada durante la reacción. El porcentaje de GGI que ofreció un mejor resultado fue 7.5 % [4].

En otro trabajo realizado se obtuvo el biodiesel de la siguiente manera. Se recolectaron semillas de (Ricinos comunnis), (Cassia canescens), (Brassica Napus) y (Vicia Villosa). Con estas semillas se procedió a la extracción del aceite mediante una prensa de 2 toneladas. Se realiza la caracterización de los aceites mediante análisis físico-químicos (índice de acidez, índice de éster, índice de yodo, pH, densidad relativa, color, viscosidad, tés de estabilidad y determinación de las grasas por el método SOXLHET). Con el aceite que presento mejor calidad que fue el de (Higuerilla) se procedió a realizar el biodiesel mediante la transesterificación, usando como catalizador metóxido de sodio al 2% y metanol al 98%, en este trabajo después de realizar la reacción de transesterificación si se pudo observar una separación de las fases BD-GL [2].

2.2.3 Consecuencias que puede presentar un M.C.I al utilizar biodiesel como combustible.

Pulverización pobre:

Si se usan aceites sin transformar su viscosidad es tan elevada que resulta imposible conseguir una adecuada atomización, la dispersión es mala y la ignición, por tanto, no es adecuada. En la universidad de Ohio, EE.UU., se propusieron tres soluciones: calentar el aceite para disminuir la viscosidad, aumentar el diámetro de las boquillas de los inyectores o mezclar el aceite con gasoil. Éste último fue el método seleccionado [23], acompañado de un filtrado del combustible. No obstante, los resultados no fueron tan halagüeños como cabía esperar. Por ello, la mejor solución es la de transesterificar los aceites.

Arranque y comportamiento en frío:

Para estudiar el funcionamiento del motor se apoyan en los test que consisten en estudiar la precipitación de las parafinas durante el enfriamiento del combustible, pero como en los aceites vegetales éstas pueden no ser considerables, estos test no sirven para los aceites. Para ellos, existe un método desarrollado por la compañía ASG, denominado Comportamiento a Baja Temperatura, que observa el flujo al disminuir la temperatura. Algunos investigadores afirmaron que determinados aceites vegetales, como el aceite de colza europea semirrefinado, precisan temperaturas más altas para volatilizarse que el gasoil o los ésteres de los aceites (inician la combustión cerca de los 70 °C y se volatilizan a los 250 °C), lo cual indica que de usarse en motores presentarán problemas durante el arranque en frío [15] y [17]. Por otro lado, los ésteres presentan tendencia a cristalizar a baja temperatura (invierno). Por ello, [22] y [24] propusieron usar ésteres ramificados, como isopropílicos.

Compatibilidad del biodiesel con los materiales:

Se observó que los problemas de compatibilidad del éster metílico de vario de los aceites vegetales con los materiales del sistema de alimentación del motor eran idénticos a los surgidos al emplear gasoil. No obstante, algunos elementos podían requerir adaptación o incluso sustitución. En este sentido, [22] afirmó que los biocombustibles presentan problemas de compatibilidad con ciertos materiales. El biodiesel es un excelente disolvente, atacando al pegamento y elastómeros del sistema de alimentación, plásticos y gomas del mismo. Según [26], el uso del biodiesel no es recomendable debido a la agresividad de los ésteres sobre algunos elastómeros. Un pH bajo puede causar corrosión en el motor.

Como se puede apreciar, de forma general, existen problemas de funcionamiento en el motor diesel con el empleo de aceite vegetal puro, lo cual radica en las diferencias de propiedades de estos con respecto al diesel y a las características de diseño del motor, que están concebidas para su funcionamiento con combustible tradicional. Una vía para conseguir un adecuado uso de los aceites en este tipo de motores se consigue realizando modificaciones técnicas en los mismos que respondan a las propiedades de los aceites.

2.2.4 Evaluación preliminar de las posibilidades de obtención de biodiesel a partir de etanol, aceite de higuera (*Ricinus communis*) e hidróxido de potasio (KOH) como catalizador mediante el proceso de transesterificación.

Como se pudo observar anteriormente en los trabajos presentados por los distintos investigadores existe contradicción en la posible obtención o no de biodiesel a partir de aceite de ricino. Con vista a esta posibilidad se realizará un experimento que consiste en dos muestras en las que varía la cantidad de catalizador y de etanol. De esta forma podremos obtener resultados propios y estaremos seguros si es posible la producción de biodiesel a partir de las características específicas que presenta este aceite vegetal.

2.2.5 Estudio preliminar de los componentes utilizados en las reacciones.

Las características del aceite de higuera (*Ricinus communis*) son presentadas en el capítulo anterior por los investigadores [1] y [2].

Características del etanol.

Tabla 5. Características del etanol empleado en las reacciones.

<i>Materia Prima: Alcohol Etilico</i>		<i>Fecha de Recepción: 11-11-11</i>
<i>Folio: 22-11</i>	<i>País: Cuba</i>	<i>Lote: A1-10</i>
<i>Ensayos</i>	<i>Resultados</i>	<i>Límites</i>
Características Organolépticas	Cumple	Líquido incoloro, transparente, sin sedimentos.
Tiempo de Permanganato	30,5	≥ 25 min
Grado Alcohólico	95,8	≥ 95,5° GL
Contenido de Aldehidos	10,91	≤ 20,0 mg/L
Acidez Total	10,80	≤ 30 mg/L
Contenido de Ésteres Totales	25,89	≤ 35 mg/L
Contenido de Alcoholes Superiores	22,27	≤ 55,0 mg/L

Características del Hidróxido de Potasio (KOH) como catalizador.

Distintos investigadores han realizado estudios sobre las distintas posibilidades de acelerar la reacción mediante catálisis. Ésta puede ser homogénea y heterogénea, y a su vez, ácida, básica o neutra. Usualmente, se lleva a cabo en presencia de un catalizador ácido (ácido sulfúrico, sulfónico, clorhídrico, etc.), salvo que la materia prima o los componentes sean sensibles al ácido [4]. Otra forma convencional y popular la constituye el uso de catalizadores básicos (NaOH, KOH, NaOCH₃) en absoluta ausencia de agua [6]. Los catalizadores básicos se conocen desde 1880, pero hasta principios de 1920 no aparecieron estudios sistemáticos de forma comprensible. Los catalizadores más populares son NaOH y KOH, debido a que proporcionan una reacción rápida a temperatura y presión suaves. Comprobaron que en aceites con muchos ácidos grasos libres se forma gran cantidad de jabones, se pierde producto y hay problemas de separación y de purificación. Si se usa un catalizador ácido, como el H₂SO₄ concentrado, no se forma jabón, pero requiere temperaturas y presiones elevadas, así como un tiempo de reacción prolongado.

La ventaja de los catalizadores homogéneos es que permiten trabajar a temperaturas moderadas (25 – 35 °C) y a presión atmosférica. No obstante, existe un interés creciente hacia los catalizadores heterogéneos, siendo muy usadas las enzimas inmovilizadas, aunque las más extendidas son las resinas intercambiadoras de iones, ya que no forman jabones y facilitan la separación y purificación. Lo más importante al usar biocatalizadores es tener en cuenta el tamaño de la cadena del alcohol [6].

2.2.6 Procedimiento seguido para la realización de las reacciones.

Para la realización de las reacciones se tuvo en cuenta las cantidades de reactantes empleadas por otros autores, como ya se ha mencionado, se utilizó 50g de aceite, agitándolo previamente durante 10 minutos en un agitador magnético con calentamiento MC8-Fabricación Alemana: Marca BUNSEN, (se muestra en la Figura 9) el cual nos da la posibilidad de un mezclado homogéneo. Las reacciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente, con lo cual no se empleó la facilidad del agitador de poder incrementar la temperatura. Simultáneamente con la agitación del aceite, se mezcló en otro recipiente 2 g del catalizador y 15 g de etanol, formando el metóxido de potasio. Posteriormente a esto se unieron los componentes y se agitaron durante 30 minutos.

Capítulo II: Materiales y Métodos.

En la segunda reacción se empleó la misma metodología pero utilizamos 3g de KOH como catalizador y 30g de etanol. De esta forma están en exceso ambos reaccionantes y no limitan la conversión de los triglicéridos en esteres etílicos, lo cual se ha de traducir en una correcta separación de las fases biodiesel-glicerina.

Las cantidades de catalizador fueron superiores a las tradicionalmente empleadas (1%-2%), las mismas fueron 4% y 6 % para las reacciones 1 y 2 respectivamente, lo cual se realizó para que esta cantidad no resultara sustancia limitante en la reacción en el caso de que la acidez del aceite fuese elevada.

Los componentes de las reacciones fueron pesados en la balanza digital que se muestra en la figura 9.



Figura 9. Agitador magnético



Figura 10. Balanza digital

2.3 Posible utilización del aceite de higuera mezclado con etanol en un M.C.I.

Dada la naturaleza química del aceite de higuera de ser el único entre los aceites vegetales miscible en alcohol, ácido acético y de bajo punto de solidificación como ya fue mencionado anteriormente, decidimos investigar si es posible utilizarlo después de mezclado con etanol como biocombustible en un M.C.I. Para iniciar esta investigación realizaremos seis mezclas en las cuales iremos variando el % de cada uno de los componentes de la siguiente manera (80% de aceite/20% de etanol, 70%/30%, 60%/40%, 50%/50%, 40%/60%, 30%/70% respectivamente). Una vez realizadas las mezclas se procede a determinar su viscosidad en las condiciones de laboratorio descritas en el epígrafe 2.1, con el objetivo fundamental de encontrar cual de dichas viscosidades es la más cercana a la del diesel.

Después de realizadas las mediciones se selecciona un grupo de mezclas con viscosidades cercanas al combustible tradicional para determinar otra serie de propiedades las cuales se mencionan a continuación.

2.3.1 Determinación de las propiedades físico-químicas de la variante seleccionada para su utilización como combustible en el M.C.I.

A partir de que ya han sido estudiadas las posibles formas en que puede ser utilizado como combustible el aceite de higuera, o sea, en su estado natural, mediante el proceso de transesterificación (biodiesel) o mezclado con etanol. El autor determinará cuál de estas variantes es la más factible y a su vez determinarle una serie de propiedades que podrán ser comparadas con las del diesel.

Numerosas son las normas que regulan la determinación de propiedades de los combustibles, la ASTM (American Standard Testing Materials) se rige por una norma para caracterizar, evaluar y comparar las propiedades como combustible de los aceites vegetales. También las relacionaron con la composición química de los mismos, mediante test AOCS (American Oil Chemist Society) [17].

Punto de inflamación o ignición:

Este método de ensayo cubre la determinación del punto de inflamación de productos en el rango de temperaturas de 20°C a 360°C, por el equipo manual o automático Pensky – Martens copa cerrada. Una copa de ensayo de latón de dimensiones especificadas, se llena hasta la marca interior con la porción de ensayo y se fija con una tapa de dimensiones especificadas, se calienta y la porción de ensayo se agita a la velocidad establecida para los procedimientos definidos (A, B ó C). Se introduce la fuente de ignición en la copa a intervalos regulares con interrupción de la agitación, hasta que se detecte la llama [27]. Esta propiedad fue determinada bajo la norma cubana ASTM D 93: 2011 (Publicada por la ASTM en 2010)

Densidad:

Este método de ensayo cubre la determinación de laboratorio, usando un hidrómetro de vidrio, de la densidad, densidad relativa (gravedad específica), o gravedad API del petróleo crudo, productos del petróleo o mezclas de productos derivados o no del petróleo, manipulados normalmente como líquidos [28], [29]. Esta propiedad fue determinada bajo la norma cubana ASTM D1298: 2009 (Publicada por la ASTM en 1999 y reprobada en 2005).

Ceniza:

La muestra contenida en un recipiente adecuado se prende y se deja combustionar hasta que solamente quede ceniza y carbón. El residuo carbonoso se reduce a ceniza por calentamiento en una mufla a 775 °C, se enfría y se pesa. El conocimiento de la cantidad de material formador de ceniza presente en un producto, proporciona información acerca de si un producto es adecuado o no para ser usado en una aplicación dada. Las cenizas pueden originarse de componentes metálicos solubles en agua, petróleo ó sólidos extraños tales como suciedad o herrumbre [26]. Esta propiedad fue determinada bajo la norma cubana ASTM D 482: 2009 (Publicada por la ASTM en 2007)

Poder calorífico:

Si se tiene en cuenta que el trabajo proporcionado por el motor es función del calor de combustión disponible, al usar aceites vegetales, el consumo se acrecentará [24]. Al aumentar el poder calorífico, menor será el consumo de combustible, mayor la potencia y viceversa [22]. Esta propiedad fue determinada bajo la norma Designation: D 4868 – 00 (Reapproved 2005).

Viscosidad:

Influye sobre el funcionamiento del sistema de inyección, la mecánica de ruptura, atomización y pulverización de los inyectores [22]. Prácticamente constituye el mayor obstáculo para el empleo de aceites vegetales como combustible de motores diesel, ya que su valor es más de 10 veces superior al que presenta el combustible tradicional. Este método de ensayo especifica un procedimiento para determinar la

viscosidad cinemática (ν), de productos líquidos del petróleo, transparentes y opacos, por medición del tiempo para que un volumen dado de líquido fluya por gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio calibrado [30], [31]. Esta propiedad fue determinada bajo la norma cubana NC ASTM D 445:2011 publicada por ASTM en el 2011.

2.4 Descripción del banco de pruebas.

El banco de pruebas donde se realizarán los ensayos consiste en un motor de fabricación cubana conocido como MOTOCUBA, de cuatro tiempos, con inyección por precámara, enfriamiento por agua y con arranque manual ó 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.

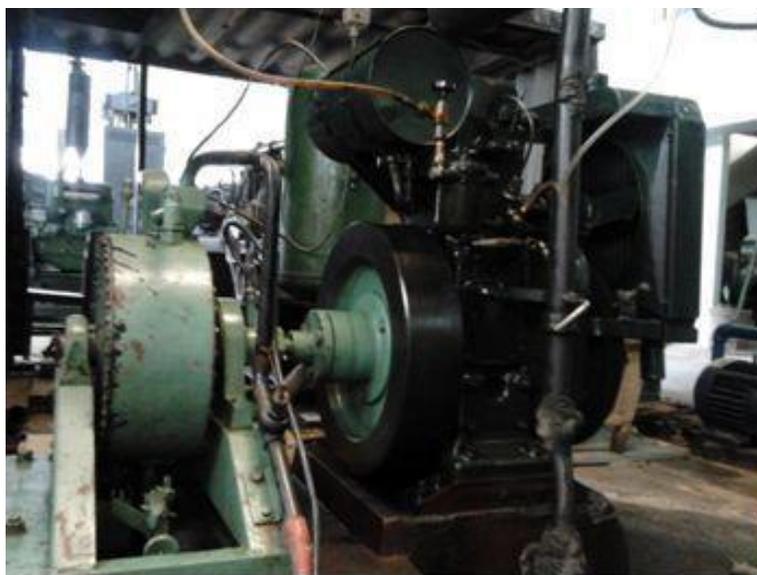


Figura 11. Banco de prueba

Características del Motor de Combustión Interna (Moto Cuba).

Tabla 6. Características del M.C.I que será utilizado.

Marca del motor	Moto Cuba
Cilindrada	860 centímetros cúbicos (cc)
Diámetro del cilindro	100 mm
Carrera del cilindro	110 mm
Potencia máxima	8 kW
N^{ro} de Pistones	1
Ciclo	Diesel
Potencia máx.	8 kW



Figura 12: M.C.I (Banco de prueba). Fotos tomadas por el autor

Características del Dinamómetro.

Tabla 7. Características del dinamómetro

Tipo de dinamómetro	Dinamómetro de copa
Brazo	0.65 m
Fluido de trabajo	Aceite para motor ó 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.



Figura 13. Dinamómetro de copa. (Fotos tomadas por el autor).

2.4.1 Metodología empleada para el ensayo en banco de prueba.

Para estudiar el comportamiento del motor durante su funcionamiento con el combustible seleccionado, (mezclas etanol/ aceite de higuera, de manera comparativa con el diesel) se obtendrá la curva característica exterior de velocidad, que representa la variación de la potencia (N) en función de la velocidad del motor (rpm), utilizando uno y otro combustible. En estas condiciones de funcionamiento del motor se corresponden con la alimentación máxima de combustible, la cual se logra al abrir totalmente la cremallera de la bomba de inyección.

Previamente al ensayo una vez que fueron revisados los niveles de líquidos del motor este se puso en marcha hasta alcanzar su temperatura de trabajo (aproximadamente 80 °C). Y a partir de este momento se procedió a llevar la cremallera de la bomba de alimentación hasta su posición de máxima dosificación del combustible, alcanzando el motor entonces su velocidad máxima regulada en vacío. Una vez en este estado de funcionamiento se comenzó a aplicar carga al motor incrementando la fuerza en el dinamómetro, para lo cual se aumentó gradualmente la cantidad de aceite en el mismo, midiendo el consumo horario de combustible (l/h) y tomando lecturas de torque en la balanza y velocidad de giro en el tacómetro acoplado al motor.

De este modo cada valor de carga representa un punto de la curva para el cual quedaron registrados los valores de potencia, velocidad de giro y consumo específico de combustible. Antes de realizar estas mediciones se dejó transcurrir un tiempo (aproximadamente 15 minutos) durante el cual el motor se mostró estable antes de las variables estudiadas.

2.4.2 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 se ejercerán.

Cálculo del torque en el 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).

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

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

$$M = 52.68 (N*m)$$

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:

$$M(N*m) = F(N) * b(m)$$

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

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

$$F = 8,1 (Kgf)$$

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

2.4.3 Ensayo de característica exterior de velocidad.

Las características externas y parciales de velocidad son las curvas de variación de potencia (N_e), momento (M_e), la presión media efectiva (P_e), los consumos específicos (g_e) y horario (G_c) de combustible contra la velocidad de giro del cigüeñal (rpm) para diferentes posiciones fijas de la cremallera del motor Diesel.

Con los datos que obtengamos durante las mediciones en el banco de pruebas podremos calcular los diferentes parámetros mediante las siguientes fórmulas.

$$N_e = \frac{F \cdot \text{rpm}}{1000} \text{ (CV)}$$

$$M_e = F \cdot b \text{ (kgm)}$$

$$g_e = \frac{\Delta g \cdot 3600}{t \cdot N_e} \left(\frac{g}{\text{CV h}} \right)$$

$$P_e = \frac{P_e \cdot 225 \cdot \tau}{V_n \cdot i \cdot n} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)$$

$$G_c = \frac{\Delta g \cdot 3600}{t \cdot 1000} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right)$$

Donde:

b: Brazo (0.65m).

τ : Número de tiempos del motor.

V_n : Volumen de desplazamiento del cilindro.

i: Número de cilindros.

n: Velocidad del motor (rpm).

V_h : Volumen de desplazamiento del motor (cilindrada).

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.

CAPÍTULO III. Análisis de los Resultados.

El capítulo tres está basado en un análisis detallado de los resultados obtenidos y en función de este análisis poder determinar cual de las tres propuestas, ya sea en su estado puro, a partir de la reacción de transesterificación (biodiesel) o como parte constituyente de una mezcla etanol/aceite, puede ser destinadas a la posible utilización del aceite de higuera como combustible para motores de encendido por compresión

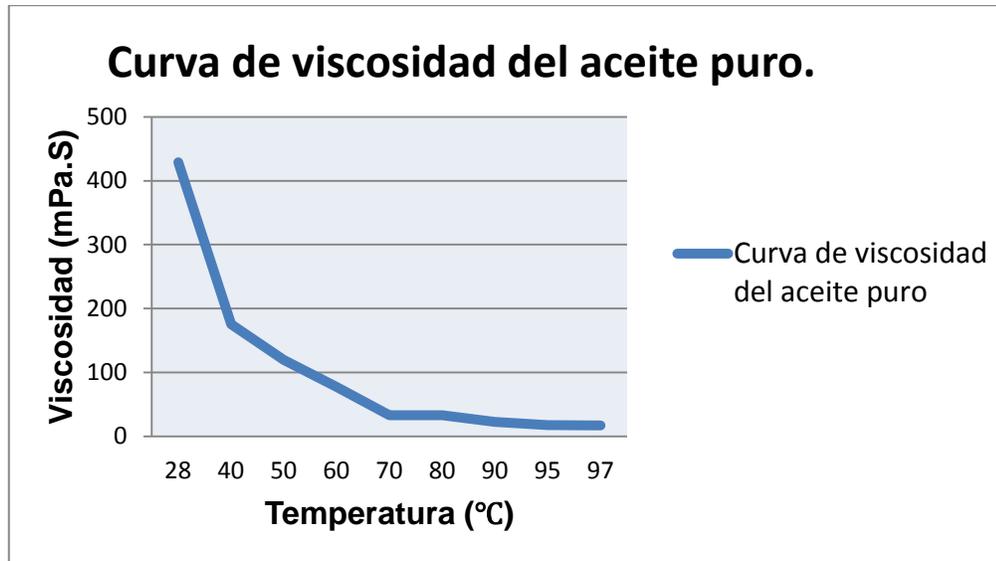
3.1 Resultados del cálculo de la viscosidad dinámica del aceite de higuera puro cuando varía la temperatura.

Los resultados de cada una de las mediciones de la viscosidad dinámica del aceite de higuera puro para los diferentes valores de temperatura estudiados son presentados en las tablas del anexo del (3). Aunque decidimos hacer una tabla, la cual se muestra a continuación, donde se resumen los valores de viscosidad dinámica determinados a medida que se aumentaba la temperatura.

Tabla 8. Resumen de los resultados obtenidos en las mediciones de viscosidad a medida que aumenta la temperaturas.

Temperatura en (°C)	Viscosidad dinámica en (mPa.S)
28	429,09
40	175,66
50	119,96
60	77,41
70	33,15
80	33,09
90	22,85
95	17,74
97	17,27

Una vez obtenido los valores de cada medición, los presentamos en la siguiente grafica para de esta forma poder conocer el comportamiento de la curva de viscosidad en función de la temperatura.



Grafica 1. Comportamiento de la curva de viscosidad del aceite puro al variar la temperatura

Como se puede observar en la tabla y la gráfica anterior, el aceite de higuera presenta una viscosidad muy elevada a temperatura ambiente y se experimenta una reducción de la misma a medida que se incrementa su temperatura, sin embargo esta se logra aproximar a la viscosidad del diesel tradicional a temperaturas muy elevadas, con lo cual se requeriría de una fuente de calentamiento de la misma si se fuese a consumir en el motor, para garantizar un correcto funcionamiento del sistema de alimentación del mismo, lo cual incurre en una modificación que puede resultar costosa desde el punto de vista técnico y económico. En la tabla, la medición de viscosidad más baja fue lograda a una temperatura de 97°C, si esta medición que es de (17,275 mPa.S) la comparamos con la del diesel que está entre (1.3 y 4.5 mPa.S) podemos darnos cuenta que no son muy similares y es por eso que se necesitan hacer modificaciones si se quisiera utilizar este aceite como combustible en un M.C.I.

Por tanto se determinó a partir de los resultados expresados anteriormente que no es factible el uso como combustible de los aceites vegetales puros debido principalmente a sus altas viscosidades.

3.2 Resultados de la obtención de biodiesel a partir de la reacción de transesterificación.

Las reacciones de transesterificación desarrolladas no consiguieron la separación de las fases biodiesel-glicerina, con lo cual se logró reducir considerablemente la viscosidad inicial del aceite vegetal pero no fue posible la separación de la glicerina contenida en el mismo, estos resultados se corresponden con los reportados por [4]. A continuación se presenta el resultado de ambas reacciones, como se puede apreciar no se observa en las mismas la presencia de jabones, sedimentos etc., como resultados de la presencia de humedad y contaminantes en la reacción.



4% de KOH y 15g de etanol

6% de KOH y 30g de etanol

Figura 14. Resultado de la reacción de transesterificación.

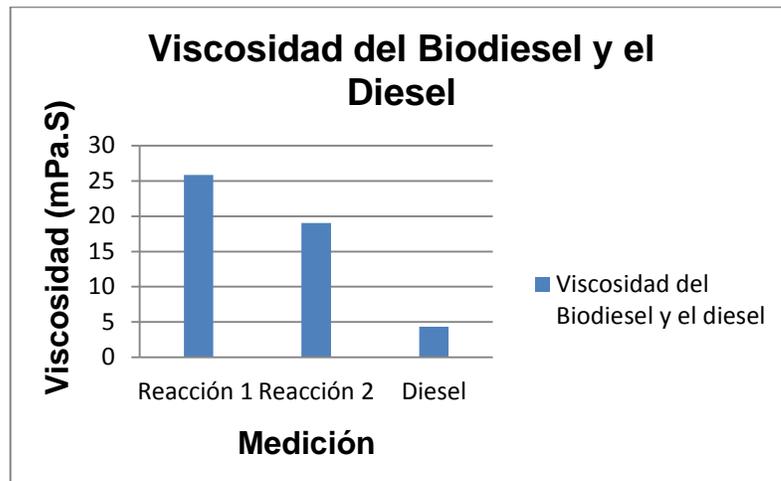
Como pudieron observar no hay separación de fases biodiesel-glicerina formadas durante la reacción de transesterificación, dicha separación no ocurre debido a la presencia de un grupo hidroxilo en la estructura del ácido ricinoleico lo cual provee de características especiales al aceite de ricino y a sus derivados, resultados similares acerca de la no separación de las fases y han sido obtenidos anteriormente por autores como [4].

3.2.1 Resultados obtenidos al medir la viscosidad de las dos reacciones de biodiesel y compararla con la del diesel.

Los resultados de la medición de viscosidad de las dos reacciones y la del diesel son presentados en las tablas del anexo (4).

Tabla 9. Comparación entre la viscosidad del diesel y la obtenida en la medición de las dos reacciones.

Comparación	
Medición	Viscosidad (mPa.S)
Reacción 1	25.86
Reacción 2	19.054
Diesel	4.32



Gráfica 2. Comparación de las viscosidades entre el diesel y las reacciones.

Con esta comparación mediante tablas y gráficas entre las viscosidades de las dos reacciones y la del diesel podemos afirmar que a medida que se aumente el % de etanol en la reacción la viscosidad disminuye, aunque la medición de la reacción dos es menor que la obtenida en la uno debemos aclarar que ninguna de las dos son similares a la del diesel y esto se debe a que no hubo una separación de las fases biodiesel-glicerina, con lo cual al no retirar la glicerina no disminuye apreciablemente la viscosidad. Es por esto que el aceite de higuera debido a la presencia un grupo hidroxilo en la estructura del ácido ricinoleico, no es recomendable utilizarlo en la producción de biodiesel para las condiciones de reacción y reaccionantes antes descritos. Aunque se debe profundizar en el estudio de esta reacción con etanol absoluto y metanol, ya que la presencia de humedad durante la reacción puede revertir los resultados e influir en la separación de las fases, pero con toda intención fue empleado el etanol proveniente de la industria azucarera cubana, ya que esto es

fundamental para lograr una adecuada viabilidad de implementación del empleo de este biocombustible en nuestras condiciones.

3.3 Formulación de mezclas de etanol con aceite vegetal, variando el tipo de aceite vegetal.

Debido a las características especiales que posee el aceite de higuera (Ricinus Communis), de ser posiblemente el único entre los aceites vegetales miscible en alcohol sin la presencia de un catalizador, característica ya mencionada anteriormente en el trabajo presentado por [4], decidimos realizar mezclas de este en etanol y compararlas con mezclas de aceite de girasol/etanol. Las mezclas fueron realizadas con un 50 % de cada componente. Los resultados obtenidos en los experimentos son los siguientes.



Figura 15. Etanol/aceite de higuera.



Figura 16. Etanol/aceite de girasol.

La mezcla presentada en la figura 15 nos muestra como el aceite de higuera (Ricinus Communis) al mezclarse con el etanol corrobora con las características mencionadas ya por algunos autores como el caso de [4] cuyos resultados han sido expuestos anteriormente. Sin embargo en la figura 16 se muestra la separación de las fases al mezclar el aceite de girasol en etanol, la cual ocurrió de manera inmediata una vez que se suspendió la agitación

3.4 Formulación de mezclas de etanol con aceite de higuera.

Dada la miscibilidad del aceite de higuera en etanol, se hace necesario estudiar el comportamiento de las mezclas de ambos combustibles, su influencia en algunas propiedades físico-químicas como la viscosidad, punto de inflamación, poder calorífico etc. Es por esto que la presente investigación persigue seguir trabajando en esta dirección. Definiendo aquellas dosificaciones de mezclas que cumplan con los requerimientos del motor para su empleo y luego estudiando el comportamiento de los principales parámetros de funcionamiento del mismo respecto al diesel.

Las proporciones de cada uno de los componentes de las mezclas tenidas en cuenta son las que se reflejan en la tabla 10, variando la cantidad de etanol desde un 20% hasta un 70%.

Tabla 10. Variación de las proporciones etanol/aceite de higuera en cada una de las mezclas.

Mezclas	% de Aceite	% de Etanol
1	80	20
2	70	30
3	60	40
4	50	50
5	40	60
6	30	70

3.4.1 Resultados de las mediciones de viscosidad realizadas a las mezclas.

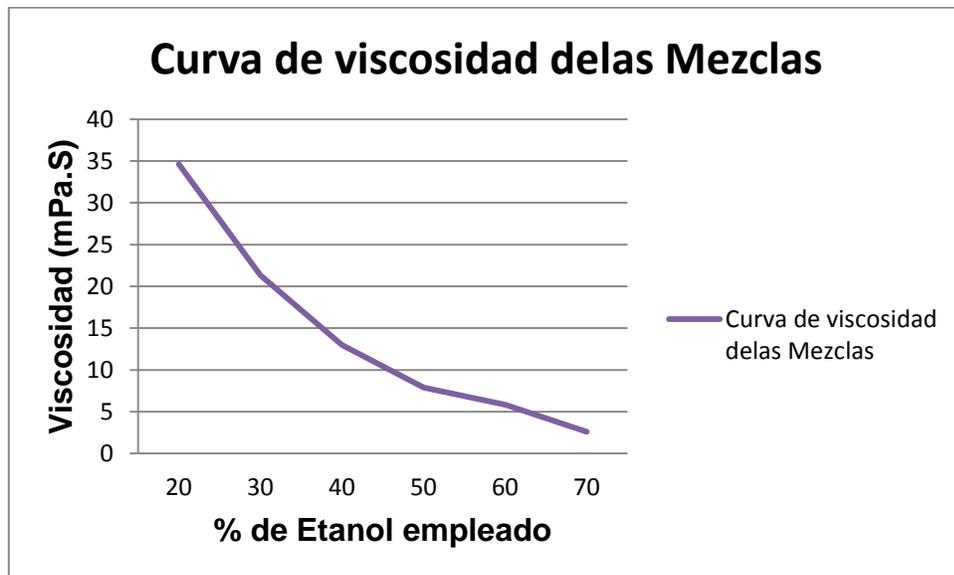
Los resultados obtenidos en las mediciones de la viscosidad dinámica realizadas a cada una de las mezclas son presentadas en el anexo (5).

Partiendo de las mediciones realizadas anteriormente, se resumieron los resultados de estas y el contenido de variación de los componentes al ser mezclados.

Dichos resultados son presentados en la tabla 11 y a su vez en la gráfica 3, la cual nos muestra el comportamiento de la viscosidad a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla combustible.

Tabla 11. Medición de viscosidad y variación del porcentaje de los componentes que fueron mezclados.

Mezclas	Viscosidad (mPa.S)	% de Aceite/Etanol
1	34,608	80/20
2	21,338	70/30
3	13,002	60/40
4	7,878	50/50
5	5,85	40/60
6	2,586	30/70



Gráfica 3. Curva de viscosidad en función de la cantidad de etanol en la mezcla.

A partir de los resultados obtenidos en las mediciones de viscosidad dinámica realizadas a las mezclas en el viscosímetro (Rehotest 2.1) y con ayuda de la gráfica anterior, determinamos que las mezclas más convenientes según su viscosidad son la 3 y la 4, aunque no están en el rango real del diesel que es (entre 1.3 - 4.5 mPa.S). Esto se debe a que las comprendidas en este rango que son la 5 y la 6, las cuales presentan una viscosidad más cercana al diesel, tienen un alto contenido de etanol, lo que conlleva por consiguiente a un bajo poder calorífico y esto hará que disminuya demasiado la potencia del motor, es por esto que no es factible su utilización.

Capítulo III: Análisis de los Resultados

Tabla 12. Comparación de viscosidad entre las posibles mezclas que se pueden utilizar como combustible en un M.C.I.

Tabla comparativa	
Mezclas	Viscosidad (mPa.S)
3	13.002
4	7.878
5	5.85
6	2.58
Diesel	1.3 - 4.5

Una vez que se decidió según la viscosidad y el contenido de etanol correspondiente a cada una, que las mezclas 3 y 4 son las ideales para experimentar su comportamiento en un M.C.I, a partir de aquí es necesario conocer ciertas propiedades físico-químicas de estas mezclas y para esto recibimos la ayuda de la refinería “Sergio Soto” situada en Cabaiguán perteneciente a la provincia de Santis Spiritus. El valor de las propiedades obtenidas en cada una de las mezclas es presentado en las siguientes tablas.

Tablas (13, 14,15). Propiedades físico-químicas de las dos mezclas escogidas y las del diesel.

Mezcla 3	
Propiedades	Valores
Densidad	0.9002 g/cm ³
Acidez	0.583
Pto. De inflamación	28°C
Ceniza	0

Mezcla 4	
Propiedades	Valores
Densidad	0.8923 g/cm ³
Acidez	0.58
Pto. De inflamación	27.2°C
Ceniza	0

Diesel	
Propiedades	Valores
Densidad	0.815-0.865 g/cm ³
Acidez	
Pto. De inflamación	45°C
Ceniza	0.01% m/m

3.5 Ensayo de característica exterior de velocidad en el banco de pruebas, empleando la mezcla escogida.

Una vez que ya conocemos las propiedades necesarias de ambas mezclas, decidimos realizarle las características exteriores de velocidad a la mezcla 3, la cual presenta una viscosidad superior a la 4, pero a su vez presenta un punto de inflamación más alto y principalmente un poder calorífico más cercano al diesel, lo que hará posible que su potencia sea mayor respecto a las demás mezclas. Además se tuvo en cuenta estudios anteriores realizados en las mismas condiciones experimentales, pero en este caso el combustible ensayado fue biodiesel de girasol, con una viscosidad ligeramente elevada de 12 mm²/s y en estas condiciones no se reportaron problemas de funcionamiento del motor, alcanzándose buenos resultados con la utilización de este biocombustible. Además en estudios sobre la influencia en el desgaste del sistema de alimentación del motor D65M, respecto al diesel, se corroboró una disminución del desgaste con el empleo del mismo, lo cual avala la posible utilización del mismo en el motor.

3.5.1 Análisis de los resultados obtenidos en el banco de pruebas, empleando como combustible la mezcla seleccionada y comparándola con el diesel.

Se realizaron mediciones con diferentes velocidades de rotación (rpm) a plena carga y se analizaron las variaciones de los diferentes parámetros que tienen lugar en el transcurso de la prueba con combustible Diesel y la mezcla seleccionada de forma comparativa. Dichos resultados son presentados en la tabla del anexo (6 y 7).

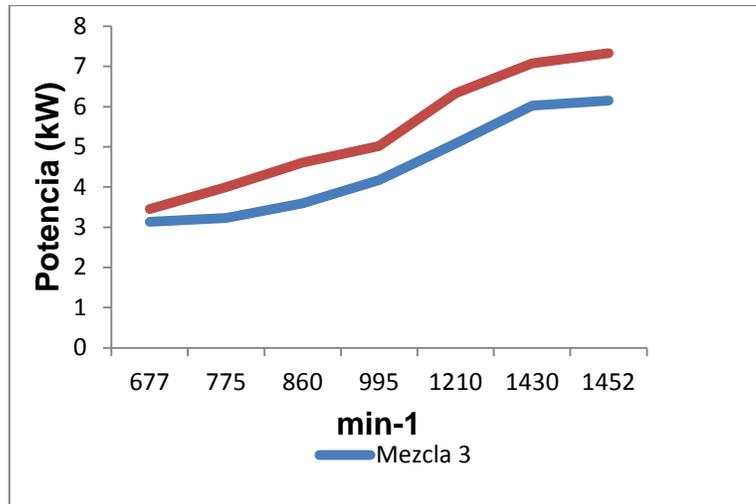
Comparación de los parámetros del motor alimentado con Diesel y la mezcla seleccionada.

Durante la evaluación de la mezcla 3 en las condiciones experimentales antes descritas se constataron problemas de arranque en frío (temperatura ambiente), pero no fue posible definir exactamente si la causa fue el tipo de combustible, ya que este motor está equipado de precámara con bujía de calentamiento y este sistema de calentamiento dirigido al arranque del motor no se encuentra funcionando, por lo cual estos mismo problemas se detectaron para el diesel y fue necesario auxiliarnos de una fuente de calor que incrementara la temperatura del aire de entrada para lograr la puesta en marcha del mismo.

Debido a que numerosos autores refieren que el número de cetano del combustible disminuye con la presencia de etanol, esto se tuvo en cuenta y se atrasó la inyección del combustible respecto al momento en que el motor está regulado para funcionar con diesel.

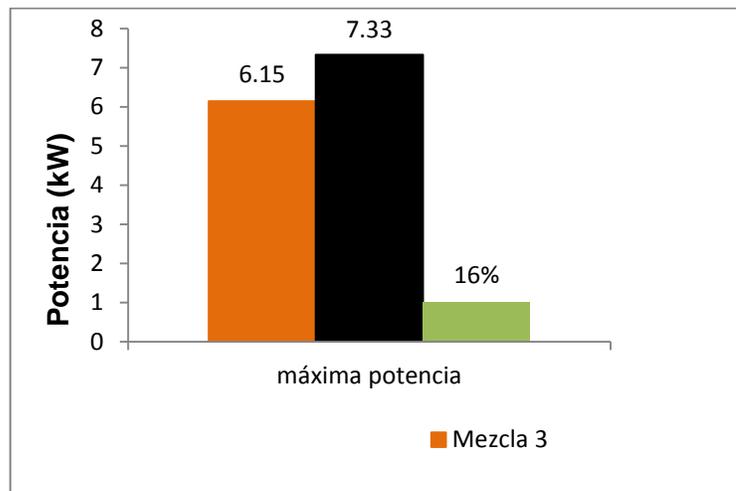
Después de analizar las tablas presentadas en los anexos 6 y 7 donde se resumen en qué forma varían los parámetros de trabajo del motor utilizando como combustible el diesel y la mezcla seleccionada respectivamente, de manera independiente pero bajo las mismas condiciones de trabajo. Se decidió realizar un análisis detallado con la ayuda del Excel y mediante gráficas para poder conocer y compara la diferencia de cada uno de los parámetros al utilizar ambos combustibles a una velocidad de rotación (rpm) determinada.

En las gráficas presentadas a continuación podemos observar como dependiendo principalmente del combustible utilizado en la alimentación del Moto Cuba, ya sea diesel o la mezcla seleccionada se comportan las curvas de potencia y de consumo específico de combustible en función de la velocidad de rotación (rpm) alcanzada por el motor y a su vez conoceremos en que porcentaje pueden variar los parámetros de ambos combustibles.



Gráfica 4: Curvas de potencia de ambos combustibles.

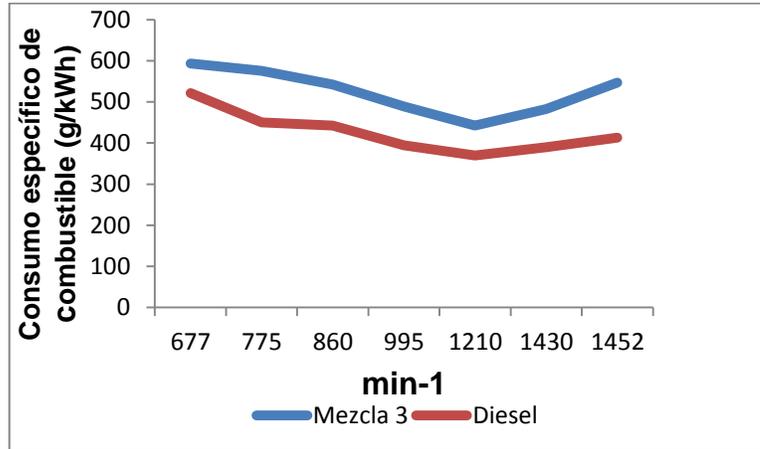
Como pudieron observar en el gráfico anterior la potencia del motor disminuye en cierta medida al utilizar la mezcla seleccionada y no el combustible tradicional, esto se debe principalmente a que el poder calorífico de la mezcla es menor que el presentado por el diesel. Es por esto que se decidió realizar un gráfico comparativo el cual se presenta a continuación entre las potencias obtenidas en ambos combustibles en la máxima velocidad de rotación alcanzada por el motor.



Gráfica 5. Diferencia de potencia de ambos combustibles a la máxima velocidad de rotación alcanzada.

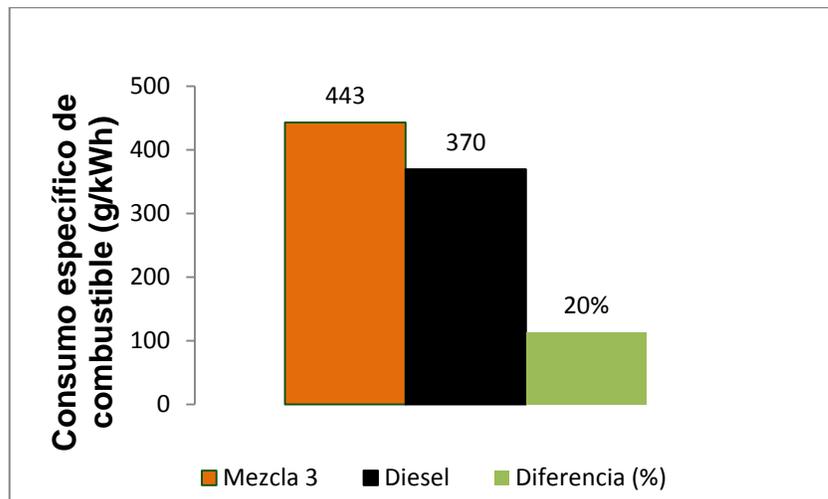
Capítulo III: Análisis de los Resultados

Podemos observar que la potencia de la mezcla disminuye en un 16% con respecto al diesel, aunque ya sabemos que esto se debe a que el poder calórico lo cual mencionamos anteriormente. La siguiente gráfica nos muestra el comportamiento del consumo específico de la mezcla 3 con respecto al diesel.



Gráfica 6. Curva del consumo específico de ambos combustibles.

La gráfica anterior nos muestra como el consumo específico de combustible es mayor cuando alimentamos el motor con la mezcla seleccionada, que cuando trabaja con el combustible tradicional. Es por eso que se realiza la siguiente gráfica la cual nos muestra en qué medida varía el consumo de ambos combustibles.



Gráfica 7. Comparación del consumo específico de ambos combustibles.

Como podemos observar la mezcla 3 produce un consumo específico superior al diesel en un 20%, aunque podemos afirmar que la variación de este parámetro también depende del poder calórico como casi todas las demás.

CONCLUSIONES

1. El cultivo de higuera (Ricinus communis) se convierte en un potencial proveedor de aceite vegetal con fines energéticos debido a que se adapta totalmente a nuestras condiciones de suelo y clima, no compite con la alimentación del hombre y puede ser cultivada en suelos no destinados a fines agrícolas.
2. No es factible utilizar el aceite de higuera en su estado natural como combustible debido a que presenta una viscosidad muy elevada a temperatura ambiente, por lo cual se requeriría de una fuente de calentamiento de la misma si se fuese a consumir en el motor, para garantizar un correcto funcionamiento del sistema de alimentación del mismo, lo cual incurre en una modificación que puede resultar costosa desde el punto de vista técnico y económico.
3. No se logra una separación de las fases biodiesel-glicerina durante la reacción de transesterificación de aceite de higuera en presencia de etanol 95.8% y KOH, lo cual se debe fundamentalmente a la presencia de un grupo hidroxilo en sus cadenas de carbono.
4. La propiedad que presenta el aceite de higuera (miscibilidad en etanol), lo cual fue corroborado, posibilita la formulación de mezclas de este tipo, dentro de las cuales la compuesta por 40% de etanol y 60% de aceite se selecciona como la más idónea para emplear en el motor, teniendo en cuenta, su viscosidad y poder calórico.
5. Durante el funcionamiento del motor con la mezcla evaluada respecto al diesel se experimenta una reducción de un 16% de la potencia y un incremento de un 20% del consumo específico de combustible, lo cual se debe fundamentalmente al menor poder calorífico de la mezcla respecto al combustible tradicional.

RECOMENDACIONES

1. Estudiar la reacción de transesterificación a partir del aceite de higuera y alcoholes con disímiles contenidos de humedad y diferentes temperaturas de reacción, con vista a definir la posibilidad de separación de las fases biodiesel y glicerina.
2. Continuar con los estudios vinculados con las mezclas aceite de higuera-etanol, principalmente en la evaluación de las mezclas declaradas en el presente trabajo, que tienen una viscosidad cercana al diesel y no fueron evaluadas en el motor. Teniendo en cuenta los parámetros de funcionamiento del motor y emisiones contaminantes.
3. Someter la mezcla seleccionada a ensayos de larga duración en el motor para estudiar su influencia en el desgaste y corrosión de los componentes del sistema de alimentación, dilución del combustible en el aceite lubricante y el proceso de formación de depósitos de carbono en la cámara de combustión.
4. Estudiar la influencia del ángulo de inyección del motor para la mezcla seleccionada, en función de los parámetros de funcionamiento del motor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pereira, Hernández, Guillermo. “Situación actual y perspectivas del uso de biocombustibles en Cuba”. Abril 2006, p. 12.
- [2] Arancibia, Soria, Yulene. “Obtención de biodiesel a partir del aceite de semillas oleaginosas de la provincia de Chimbazo”. Escuela de Ciencias Químicas, Ecuador, 2011.
- [3] 2do Proyecto del Programa nacional de Desarrollo Energético Sostenible CITMA. [SS y Guantánamo]: Departamento de Investigaciones ICINAZ, 2009, p. 29.
- [4] López, Arena, Y. “Purificación de biodiesel obtenido de aceite de ricinos”. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla”, México, 18 de junio de 2009.
- [5] Quintero, Jordán, Jorge Antonio. “Biodiesel de Higuierilla (Ricinos communis) como combustible en un motor diesel”, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, Guatemala, Abril de 2005.
- [6] Samayoa (2007). “El manual del Higuierilla” [en línea]. Disponible en Búsqueda de Libros de Google.
- [7] MAVESA S.A. (Stratta) Proyecto Ricino.
- [8] Benjumena, Pedro. El biodiesel de aceite de Higuierilla como combustible alternativo para motores diesel”. Grupo de Combustibles Alternativos, Universidad Nacional de Colombia, 29 de marzo 2007.
- [9] Muños, Mena. Devore. “Biocombustibles a través de Ricinos communis”, Escuela preparatoria de Tezoyuca, facultad de Química Orgánica, México, 2009, p 493-494.

- [10] López, D., I (2004). Biodiesel, una alternativa energética para el sector agrícola en Cuba.
- [11] López, D., I and M. Herrera, I (2006). " Biodiesel, una alternativa energética para el sector agrícola en Cuba." Conferencia Internacional Ingeniería Mecánica.
- [12] López, I., J. Pascualino, et al., Eds. (2008). Obtención y ensayo de biodiésel a partir de aceite de orujo. Proyectos de investigación 2005-2006 Universidad de Jaén, Eulogio Castro.
- [13] M, H., Osava (2007). "La energía en una semilla de ricino ", Rio de Janeiro.
- [14] L, Pugawko, Árboles y Biocombustible (Aceite de Ricino). Bionerg, Empresa cultivadora de plantas para producir biodiesel, EU, 2006.
- [15] T, J., Recio. Biodiesel a partir del aceite de higuera, Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMOR), Brasil, 12 Abril 2010.
- [16] European Biodiesel Board (EBB), Grouping Major Biodiesel Producers and Promoting the use of Biodiesel in the EU, 2003-2013.
- [17] Gil Amores A, Gómez García J, Holgado de Latorre G, López Giménez FJ y Dorado M (1997b) Efectos causados sobre el sistema de alimentación de un motor Diesel al utilizar éster metílico de aceite. Tecnoambiente 76:53–55.
- [18] DOCE (1997a) Agenda 2000. Strasbourg/Bruxelles: U.E. 15 Julio, pp. 172.
- [19] DOCE (1997b) Energía para el futuro: Fuentes de energía renovables. Libro Blanco para una Estrategia y un Plan de Acción Comunitarios. Bruselas (Bélgica): Comisión de las Comunidades Europeas. pp. 59.

- [20] Goering CE, Schwab AW, Daugherty MJ, Pryde EH y Heatin AJ (1982) Fuel properties of eleven vegetable oils. Transactions of the ASAE: 1473–1483.
- [21] Pryde EH (1981) Vegetable oil vs. Diesel fuel: chemistry and availability of vegetable oils. Alcohol and vegetable oil as alternative fuels. Proceedings of Regional Workshop, 7–9 Abril, Raleigh, N.C. (EE.UU.), pp. 217–232.
- [22] Peterson CL, Wagner GL y Auld DL (1983b) Vegetable oil substitutes for Diesel fuel. Transactions of the ASAE: 322–332.
- [23] Casanova J y Valdés M (1994) Características de los bio-óleos de pirolisis comparadas con las de combustibles convencionales para motores Diesel. XI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, vol. 2, pp. 325–332.
- [24] López Sastre JA, Guijosa L y Sanz JM (1995) Los aceites vegetales como combustibles ecológicos. Energía Septiembre/Octubre: 71–76.
- [25] Pischinger G, Falcon AM, Siekmann RW y Fernandez (1982a) Methyl esters of plant oils as Diesel fuels, either straight or in blends. International First Conference on Plant & Vegetable Oil as Fuel, 2 – 8 Agosto, Fargo, North Dakota (EE.UU.), pp. 11.
- [26] Navarro R (1997) Derivados de aceite de girasol como biocarburantes. Tecnoambiente: 103–105.
- [27] Normas ASTM: E 502 Método de Ensayo para la determinación del punto de inflamación de productos químicos por el método copa cerrada.
- [28] NC ASTM D4057 Industria del Petróleo. Petróleo Crudo y sus derivados líquidos. Método de Muestreo Manual.
- [29] Normas ASTM D1250 Tablas de mediciones del petróleo.
- [30] Normas ASTM: D 446 Especificaciones e Instrucciones de Operación para Viscosímetros Cinemáticos capilares de vidrio.

[31] Normas ISO: ISO 3104 Productos de Petróleo Líquidos Transparentes y Opacos. Determinación de Viscosidad Cinemática y Cálculo de La Viscosidad Dinámica.

[32] J. Guedes (2004) “Ensayos para la elaboración y empleo del biodiesel en Cuba”.

[33] Mendosa, K, I. López, Estudio preliminar de la influencia del uso del biodiesel en le desgaste del sistema de alimentación del motor., in Departamento de Energía. 2005, Universidad Central de las Villas (UCLV): Santa Clara ; Cuba.

ANEXOS

Anexo 1. Relación de los radios, cantidades necesarias de las sustancias, tensión tangencial, gradiente de cizallamiento y viscosidad.

Dispositivo de medición	Relación de radios R/r	Cantidad de relleno [ml]+ - 5%	Valor Z 0.1Pa/SKT	Tensión Tangencial τ [Pa]	Gradiente cizallamiento Dr. [s-1]	Viscosidad [mPa-s]
N	1,02	11	I - 3,09	1,6 a 32	1,5 a 1310	1 a 20 000
			II - 30,6	16 a 320		10 a 200 000
S1	1,02	25	I - 5,57	2,8 a 56	1,5 a 1310	2 a 38 000
			II - 55,7	28 a 560		20 a 380 000
S2	1,06	30	I - 5,83	3 a 60	0,5 a 437	7 a 120 000
			II - 61,1	30 a 600		70 a 1 200 000
S3	1,24	50	I - 8,15	4 a 80	1/6 a 145,8	30 a 500 000
			II - 79,7	40 a 800		300 a 5 000 000
H	1,24	17	I - 28,9	15 a 300	1/6 a 145,8	100 a 1 800 000
			II - 290,4	150 a 3 000		1 000 a 18 000 000

Anexo 2. Valores de los gradientes de velocidad del viscosímetro Rehotest 2.1 para los diferentes juegos de cilindros.

Juego de Cilindros		S1 y N	S2	S3 y H	Z	K1, K2 y K3
V e l o c i d a d	11bc	43,74	14,58	4,86	35,77	162
	7bd	48,60	16,20	5,40	39,74	180
	10ac	52,49	17,496	5,832	42,92	194,4
	6ad	58,32	19,44	6,48	47,70	216
	12bc	78,72	26,244	8,748	64,32	291,6
	8bd	87,48	29,16	9,72	71,52	324
	11ac	87,48	29,16	9,72	71,52	324
	7ad	97,20	32,40	10,8	79,44	360
	9bd	145,8	48,6	16,2	119,28	540
	12ac	157,44	52,488	17,496	128,76	583,2
	8ad	174,96	58,32	19,44	143,04	648
	10bd	262,44	87,48	29,16	214,70	972
	9ad	291,6	97,2	32,4	238,4	1080
	11bd	437,4	145,8	48,6	357,7	1620
	10ad	524,9	174,96	58,32	429,2	1944
	12bd	787,2	262,44	87,48	643,2	2916
11ad	874,8	291,6	97,2	715,2	3240	
12ad	1574,4	524,88	174,96	1287,6	5832	

Anexo 3. Resultados obtenidos en la medición de la viscosidad dinámica del aceite de higuera pura al aumentar sucesivamente la temperatura.

Medición a 28°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
6 ad	423,86
10 ac	435,62
7 bd	425,98
11 bc	430,93
Promed. de viscos.	429,0975

Medición a 40°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
7 ad	203,45
11 ac	201,33
8 bd	197,8
12 bc	100,09
Promed. de viscos.	175,6675

Medición a 50°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
8 ad	121,86
12 ac	121,68
9 bd	118,68
7 ad	117,62
Promed. de viscos.	119,96

Medición a 60°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
9 ad	79,47
10 bd	77,7
8 ad	75,94
12 ac	76,54
Promed. de viscos.	77,4125

Medición a 70°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 bd	33,75
10 ad	33,55
11 bd	32,49
9 ad	32,84
Promed. de viscos.	33,1575

Medición a 80°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 bd	33,36
10 ad	32,96
11 bd	33,2
9 ad	32,84
Promed. de viscos.	33,09

Medición a 90°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
11 ad	23,31
12 bd	23,15
10 ad	22,36
11 bd	22,6
Promed. de viscos.	22,855

Medición a 95°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
11 ad	18,01
12 bd	17,66
10 ad	17,66
11 bd	17,66
Promed. de viscos.	17,7475

Medición a 97°C	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 ad	17,46
11 ad	17,3
12 bd	17,27
10 ad	17,07
Promed. de viscos.	17,275

Anexo 4. Resultados obtenidos en la medición de la viscosidad dinámica de las dos reacciones y la del diesel.

Reacción 1	
Veloc. del viscos.	Viscosidad (mPa.S)
11 ad	26.13
12 bd	25.12
10 ad	26.49
11 bd	26.13
9 ad	25.43
Promed. de viscos.	25.86

Reacción 2	
Veloc. del viscos.	Viscosidad (mPa.S)
11 ad	19.07
12 bd	19.23
10 ad	18.83
11 bd	19.07
9 ad	19.07
Promed. de viscos.	19.054

Diesel	
Veloc. del viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 ad	3.92
11 ad	4.23
12 bd	4.31
10 ad	4.5
11 bd	4.64
Promed. de viscos.	4.32

Anexo 5. Resultados obtenidos en la medición de viscosidad dinámica de las diferentes mezclas etanol/aceite de higueta.

Mezcla 1	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 ad	Muy viscoso
11 ad	Muy viscoso
12 bd	Muy viscoso
10 ad	34.49
11 bd	36.02
9 ad	36.02
10 bd	36.49
8 ad	30.02
Prom. Viscoci.	34.608

Mezcla 2	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 ad	Muy viscoso
11 ad	21.54
12 bd	21.58
10 ad	21.19
11 bd	21.19
9 ad	21.19
Prom. Viscoci.	21.338

Mezcla 3	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 ad	13.34
11 ad	13.06
12 bd	12.95
10 ad	12.95
11 bd	12.71
Prom. Viscoci.	13.002

Mezcla 4	
Veloc. del Viscos.	Viscosidad (mPa.S)
12 ad	7.65
11 ad	7.77
12 bd	7.85
10 ad	7.65
11 bd	8.47
Prom. Viscoci.	7.878

Mezcla 5	
Veloc. del Viscos.	Viscocidad (mPa.S)
12 ad	5.49
11 ad	5.65
12 bd	5.88
10 ad	5.88
11 bd	6.35
Prom. Viscoci.	5.85

Mezcla 6	
Veloc. del Viscos.	Viscocidad (mPa.S)
12 ad	2.35
11 ad	2.47
12 bd	2.35
10 ad	2.94
11 bd	2.82
Prom. Viscoci.	2.586

Anexo 6. Resultados de las mediciones en el banco de pruebas empleando combustible Diesel.

No	Veloc. de rotación (n, rpm)	Fuerza ejercida por el dinamómetro (F _e , kg)	Consu. de comb. (Δg, g)	Torque (M _{io} , N-m)	Potenc. efectiva (N _e , kW)	Consu. horario (G _c , kg/h)	Consu. Especí. (g _e , g/kW-h)
1	684	7.41	60	48.17	3.45	1.8	522
2	781	7.52	60	48.88	4.00	1.8	450
4	885	7.65	68	49.73	4.61	2.04	443
5	957	7.71	66	50.12	5.02	1.98	394
6	1211	7.68	78	49.92	6.33	2.34	370
7	1371	7.58	92	49.27	7.07	2.76	390
8	1450	7.43	101	48.30	7.33	3.03	413

Anexo 7. Resultados de las mediciones en el banco de pruebas empleando como combustible la mezcla seleccionada.

No	Veloc. de rotación (n, rpm)	Fuerza ejercida por el dinam. (F_e, kg)	Consu. de comb. (Δg,g)	Torque (M_{to}, N-m)	Potenc. efectiva (N_e, kW)	Consu. horario (G_c, kg/h)	Consu. Espec. (g_e, g/kW-h)
1	677	6.8	62	44.20	3.13	1.86	594
2	775	6.13	62	39.85	3.23	1.86	575
4	860	6.14	65	39.91	3.59	1.95	543
5	995	6.16	68	40.04	4.17	2.04	489
6	1210	6.17	75	40.11	5.08	2.25	443
7	1430	6.19	97	40.24	6.02	2.91	483
8	1452	6.22	112	40.43	6.15	3.36	547