



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Mecánica

*Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales*



## *Trabajo de Diploma*

*Título:*

*“Estudio de la formulación de mezclas etanol-diésel para la alimentación de motores de encendido por compresión”.*

**Autor:** Ignacio Rafael Ríos Méndez

**Tutores:** MSc. Iosvani López Díaz

MSc. Lizet Rodríguez Machín

Curso: 2012-2013

**CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA**



# *Dedicatoria*

*El presente trabajo de diploma está dedicado especialmente a mis padres por el amor que me han brindado durante toda mi vida.*

*A toda mi familia, profesores, amigos y mi novia por el apoyo obtenido en los buenos y malos momentos.*

## *Agradecimientos.*

*Mis más sinceros agradecimientos van dirigidos a todas las personas que de una forma u otra han contribuido a hacer realidad este sueño.*

*A mi madre por darme la vida, cuidarme y protegerme hasta el cansancio.*

*A mi padre por ser un ejemplo de hombre y un faro que me sirve de guía en todo momento.*

*A mi novia Laura por apoyarme y ayudarme en todo momento*

*A mi primo Dayan por estar siempre a mi lado ayudándome y alentándome.*

*A mi tutor Msc Josuani López Díaz por su paciencia y ayuda inigualable.*

*A la profesora Msc Lisett Rodríguez Machin por su entrega y apoyo.*

*A todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica que en el transcurso de estos cinco años han estado enmarcados en un objetivo único: mi formación como futuro ingeniero mecánico.*

*A todos mis compañeros de año por los momentos compartidos y por hacer más llevadera mi estancia en la Universidad.*

*A toda mi familia, los que están y los que por una razón u otra no se encuentran a mi lado, a ellos le debo lo que soy.*

*A todos... Muchas gracias*

## **Pensamiento**

*Ciencia y libertad son llaves maestras que han abierto las puertas por donde entran los hombres a torrentes, enamorados del mundo venidero. Diríase que al venir a tierras tantas coronas de cabezas de reyes, las cogieron los hombres en sus manos y se han ceñido a las sienes sus fragmentos.*

*José Martí*

## **Resumen.**

En el presente trabajo se establece un estado referencial en la temática relacionada con el empleo de biocombustible en los motores de combustión interna de encendido por compresión y se estudian las mezclas etanol-diésel. Se evalúa la posibilidad de formular mezclas a partir del diésel nacional y el etanol obtenido en la industria azucarera, como resultado se obtiene, de manera coincidente con la bibliografía consultada, que luego de unir los dos componentes no se consigue el mezclado de los mismos, apareciendo las dos fases correspondientes a cada uno, lo cual elimina la posibilidad del empleo de los mismos como mezcla combustible. A partir de este estudio se propone al aceite vegetal de higuera (*Ricinus Communis*) como posible sustancia a formar parte de la mezcla diésel-etanol por la hipótesis de que su composición química favorece la miscibilidad de ambos combustibles. Se establecen las condiciones experimentales bajo las cuales se pretende definir la mezcla idónea diésel-etanol-aceite de higuera y evaluar el combustible formulado en banco de prueba para motores.

## **Abstract.**

In the present study establishes a referential status in subjects related to the use of biofuel in the internal combustion engine for compression ignition and are studied ethanol-diesel mixtures. Is assessed possibility of formulating mixtures from national diesel and ethanol obtained in the sugar industry, as a result is obtained, coincidentally with the literature, that after joining the two components were not get them mixed, appearing both phases for each, which eliminates the possibility of using them as fuel mixture. This study proposes castor (*Ricinus Comunnis*) vegetable oil as a possible substance to be part of the diesel-ethanol mixture by the assumption that its chemical composition favors the miscibility of the two fuels. Experimental conditions are established under which we define the right mixture ethanol- castor oil -diesel and to be evaluated in engine test bench.

# Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: GENERALIDADES ACERCA DE LAS MEZCLAS DE BIOCOMBUSTIBLES.....	5
1.1-Introducción.....	5
1.2- Biocombustibles.....	5
1.3- Características de los biocombustibles.....	6
1.3.1- Utilización de mezclas combustibles en motores de combustión interna.....	7
1.3.1.1- Utilización de mezclas Diésel-Etanol como combustible.....	9
1.4 Potencialidades del aceite de Higuera como sustancia que posibilite la formulación de mezclas etanol hidratado-diesel.....	11
1.5- Conclusiones parciales.....	12
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
2.1- Introducción.....	14
2.2- Características de los componentes a incluir en la formulación de mezclas etanol-diésel.....	14
2.2.1- Diésel.....	14
2.2.2- Etanol.....	15
2.2.3- Aceite de higuera ( <i>Ricinus Communis</i> ).....	16
2.3- Evaluación preliminar de mezclas combustibles etanol-diésel.....	17
2.4- Evaluación de la posibilidad de obtener mezclas diesel- etanol-aceite de higuera.....	18
2.4.1- Diseño de experimento Mc Lean Anderson.....	19
2.5- Determinación de las propiedades físico-químicas.....	22
2.5.1. Densidad.....	22
2.5.2 Viscosidad.....	22
2.5.3 Cenizas.....	23
2.5.4 Agua y sedimento por el método de centrifugado.....	23
2.5.5 Punto de inflamación.....	24
2.5.6 Color.....	24
2.5.7 Acidez.....	25
2.6- Condiciones experimentales del banco de ensayo para la evaluación del combustible en el motor.....	25
2.6.1 Metodología a emplear para la determinación de los parámetros de funcionamiento en banco de prueba.....	27
CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados.....	30

3.1-Introducción.....	30
3.2- Evaluación preliminar de mezclas combustible etanol-diésel.....	30
2.4- Diseño de experimento Mc Lean Anderson.....	31
3.5- Determinación de las propiedades físico-químicas.....	33
3.5.1.Densidad.....	33
3.5.2 Viscosidad.....	34
3.5.3 Cenizas.....	35
3.5.4 Agua y sedimento por el método de centrifugado.....	36
3.5.5 Punto de inflamación.....	36
3.5.6 Color.....	37
3.5.7 Acidez.....	38
3.5.8 Estimación del poder calórico.....	38
3.6- Condiciones experimentales del banco de ensayo para la evaluación del combustible en el motor.....	39
CONCLUSIONES.....	44
RECOMENDACIONES.....	45
Bibliografía.....	46
Anexos.....	50

## **INTRODUCCIÓN.**

Desde los comienzos de la historia, el hombre ha modificado el medio, auxiliándose de todo lo que ha tenido a su alcance, como herramientas y desde su descubrimiento ha presentado una gran demanda energética que ha aumentado con el transcurso del tiempo para satisfacer sus necesidades. En sus comienzos se conformaba con una mejor elaboración de sus alimentos, librarse de los intensos fríos en el invierno y hasta logró defenderse de algunos animales. Pero con su desarrollo llegó hasta el descubrimiento de los combustibles fósiles, que le cubrían todas sus necesidades con mayor facilidad, ya que estos presentan mayor poder calórico que las fuentes precarias que tenía. Esta fuente energética dado por sus propiedades y fácil utilización ha traído una dependencia de este recurso y un uso indiscriminado de los combustibles fósiles, a lo largo de la historia ha traído como consecuencia grandes problemas ambientales, dentro de los que tenemos el efecto invernadero el cual provoca un aumento considerable de la temperatura, las lluvias ácidas, cenizas, sin contar la contaminación del propio aire que respiramos.

Entre los combustibles fósiles tenemos el carbón, el petróleo y el gas, derivados de la descomposición de materiales orgánicos ocurrida hace millones de años. Estos se encuentran constituidos fundamentalmente por carbono e hidrógeno. Debido a su lento surgimiento se consideran como no renovables y llegará el momento en que estos se agotarán.

Con frecuencia aparecen predicciones preocupantes que estiman su fin para dentro de 20 ó 50 años. Varios de estos plazos se han vencido y sin embargo, continuamos explotando estas reservas, pero nadie está ajeno a su irrevocable agotamiento, sin embargo estas reservas continúan siendo explotadas y aun se conciben nuevas tecnologías dependientes del petróleo y sus derivados. Estudios realizados por British Petroleum avizoran su progresiva utilización

según estimaciones realizadas hasta el año 2030, lo cual se observa en la figura 1.

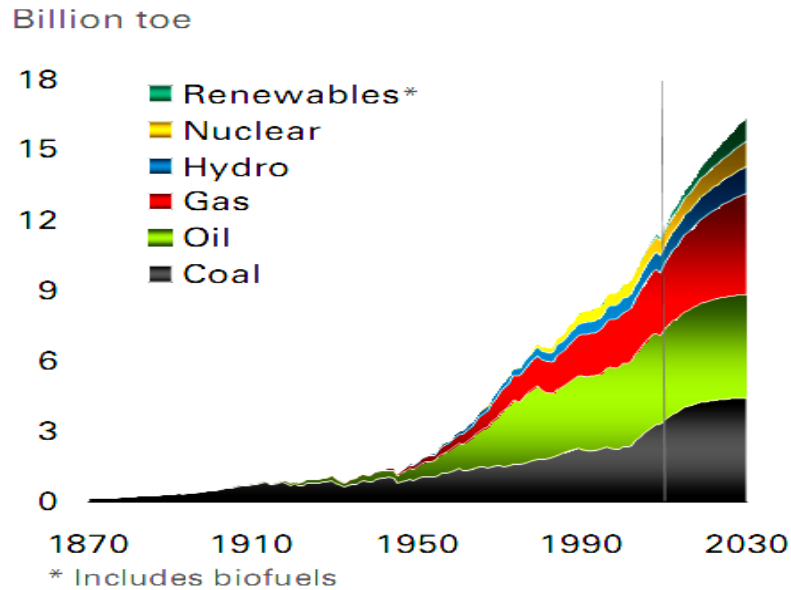


Figura 1. Utilización de las diferentes fuentes de energía a nivel mundial. [1].

La energía contenida en estos combustibles es obtenida en todos los casos mediante un proceso de combustión, en el cual el combustible rico en carbono reacciona con el oxígeno, desprendiendo su energía en forma de calor y luz. Asimismo, esta reacción exotérmica da como resultado la formación de diferentes gases, que normalmente se acumulan en la atmósfera. Entre los gases producidos se encuentran fundamentalmente el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en los procesos de combustión y la disminución de los bosques, fundamentales por su función de absorción del mismo. También son importantes las emanaciones de metano ( $CH_4$ ), debido, entre otros factores, a la ganadería intensiva sin el tratamiento adecuado de los residuales; y las emanaciones de óxido de nitrógeno ( $N_2O$ ), las cuales se deben en buena parte a la fertilización artificial y a la combustión de los fósiles [2].

Una posible solución a este preocupante problema es la utilización de los biocombustibles de origen vegetal los cuales se pueden clasificar de primera y

segunda generación teniendo en cuenta su materia prima. Los de primera generación están vinculados estrechamente con la alimentación de la humanidad y animales, provocando una posible alza de los precios en el mercado o escasez de los alimentos. Pero existe una segunda generación que no son comestibles por lo que no competirían con los alimentos y específicamente algunos de estos no demandan de óptimas condiciones de suelos para su cultivo, facilitando aun más su obtención. Nuestro país no se encuentra ajeno a los problemas energéticos, existente, manteniendo una política de no afectar la alimentación de la humanidad pero con el empleo de los cultivos de segunda generación no presentaremos este problema.

En aras de solucionar la actual problemática ambiental existente, una de las alternativas estudiadas por diferentes autores, son las mezclas de etanol-diésel, las cuales logran grados significativos de sustitución del combustible fósil (diésel) Diferentes son los criterios acerca del proceso de mezclado de estos dos compuestos, pero de forma general se reportan serios problemas de separación de ambos combustibles, lo cual exige del uso de aditivos o sustancias emulgentes que se encarguen de conseguir la miscibilidad de la mezcla.

En las condiciones de Cuba, existe un cultivo oleaginoso silvestre que según su composición química, por la presencia de grupos de hidroxilos en la estructura del ácido ricinoleico, este presenta la propiedad de ser soluble en etanol [3], a diferencia del resto de los aceites vegetales, con los cuales resulta atractivo el estudio del empleo de este aceite vegetal como sustancia que propicie la miscibilidad entre el diésel y el etanol proveniente de la industria azucarera.

Es por ellos que en el presente trabajo se plantea como problema científico:

### **Problema científico.**

El adecuado mezclado del diésel y el etanol en una sola fase es una necesidad por resolver y que necesariamente debe poder ser resuelta empleando el aceite de higuera (*Ricinus Comunnis*) en proporciones adecuadas mediante un diseño experimental y evaluando luego el comportamiento como combustible de la mezclas obtenidas.

### **Hipótesis.**

La posibilidad de formulación de mezclas homogéneas etanol -diesel para su empleo como combustible en motores de encendido por compresión es posible lograrla con el empleo de cantidades adecuadas de aceite de higuera (*Risinus comunnis*), si se evalúan las propiedades de las mezclas ternarias obtenidas y su influencia en los principales parámetros del funcionamiento del motor.

### **Objetivo General:**

Evaluar el empleo del aceite de higuera como sustancia que propicia la miscibilidad del etanol en diesel para su empleo en motores de encendido por compresión.

### **Objetivos Específicos:**

1. Realizar un estudio bibliográfico sobre el estado actual de las mezclas combustibles y los requerimientos para su empleo en el motor.
2. Seleccionar las mezclas etanol-diesel-aceite de higuera más convenientes a partir de un diseño de experimento y teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas de las mismas.
3. Evaluar la mezcla combustible seleccionada en un motor de encendido por compresión, a partir del estudio de sus principales parámetros de funcionamiento

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES ACERCA DE LAS MEZCLAS DE BIOCOMBUSTIBLES.**

## **1.1-Introducción.**

Teniendo en cuenta el eminente agotamiento de las reservas mundiales de combustibles fósiles, sumado a los daños que el empleo excesivo de estos ocasiona al medio ambiente, han creado en el hombre la necesidad de buscar nuevas fuentes de energías para lograr mantener los estilos de vida y el desarrollo de la sociedad moderna. Fundamentalmente la solución lo ha conducido a las fuentes renovables de energía, en este capítulo citaremos algunas de ellas y además es el tema central de este trabajo.

## **1.2- Biocombustibles.**

El modelo energético actual se basa mayoritariamente en el consumo de combustibles fósiles para el transporte y la generación de energía eléctrica. Hoy en día, dos factores ponen en entredicho la supervivencia de este modelo, en pie desde comienzos del Siglo XX. Dichos factores son el agotamiento de las reservas de combustible y el calentamiento global. Según la teoría del Pico de Hubbert el agotamiento de las reservas de petróleo y gas natural podrían ser un hecho antes de que acabase el presente Siglo XXI. Por otro lado, cada vez son más los científicos y grupos de opinión que alertan sobre el comienzo de un período de calentamiento global asociado al incremento de emisiones de gases de residuos de la combustión provocando el efecto invernadero. Aun cuando todavía no hay acuerdo sobre la inminencia y el alcance de ambos problemas, existe un consenso generalizado sobre el hecho de que tarde o temprano, el ser humano deberá dejar de utilizar los combustibles fósiles como su principal fuente de energía primaria y emplear fuentes más seguras, abundantes y menos dañinas para el medio ambiente.

En el presente se utilizan los combustibles fósiles como la energía primaria fundamental, representando un 97% de lo que se consume en el mundo. De esta un 38% es carbón, 40% es petróleo y 19% es gas natural. Estos generan

contaminación y no son renovables. Se estima que el petróleo durará 45 años más, el gas natural 65 años y el carbón 230 años. No obstante, existen diversas opciones de generación de energía ajenas a los combustibles fósiles que podrían mitigar la dependencia que la sociedad moderna tiene de estos recursos escasos y contaminantes. Algunas de estas opciones ya están disponibles y otras son meras hipótesis, y cada una genera distintos y enfrentados puntos de vista sobre sus supuestas ventajas e inconvenientes. Una de estas opciones podrían ser los biocombustibles de origen vegetal como posible sustituto de los combustibles fósiles [4].

### **1.3- Características de los biocombustibles.**

Los biocombustibles son combustibles de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos. Estos restos orgánicos proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas.

El uso de combustibles biológicos no es nada nuevo, increíblemente, el primer combustible utilizado por el hombre fue la leña, y en su primera prueba, quien desarrolló el primer motor de encendido por compresión, nombrado motor diésel en honor a su nombre, en 1895, empeñado en hacerlo funcionar con diferentes combustibles, muestra su motor en la Exhibición mundial París en 1900 usando aceite de maní como combustible. En el año 1911 planteó: *“el motor diésel puede ser alimentado con aceites vegetales y esto puede contribuir considerablemente en el desarrollo de la agricultura de los países que lo utilicen”*. Y un año más tarde se pronunció: *“el uso de aceites vegetales para combustibles de motores puede parecer insignificante hoy. Pero muchos aceites pueden convertirse en el transcurso del tiempo tan importantes como el petróleo y los productos del carbón de estos tiempos.”* Las palabras del Dr. Diésel hoy son más verdaderas.

Sebastián N [5], refiere que la utilización de este biocombustible en motores de combustión interna presenta problemas de compatibilidad con los diseños o

características técnicas de los motores que fueron concebidos para trabajar con combustible diésel tradicional. Las principales diferencias entre el aceite vegetal con el combustible diésel varían fundamentalmente en sus características físicas. El aceite presenta un peso específico superior a 900g/l y una viscosidad de 80cps 20°C muy alta comparada directamente con el diésel tradicional. Con un uso excesivo de los biocombustibles puede traer efectos secundarios en el motor como la formación de depósitos, la tupidión de los inyectores y así como una serie de modificaciones que hay que realizarle al vehículo para poder utilizar directamente este tipo de combustibles. Por estas razones en ocasiones resulta inapropiado el uso prolongado de este tipo de combustibles.

Posteriormente surge el biodiésel, también denominado biogasoíleo o diéster es un combustible renovable que reemplaza al gasoil fósil, este se puede elaborar a partir de cualquier aceite vegetal o animal. Debido fundamentalmente a que el uso directo de aceites vegetales en los motores diseñados para funcionar con diesel, trae problemas de funcionamiento producto la elevada viscosidad de los aceites respecto al combustible tradicional.

Encontrándose como solución la producción del biodiésel que no es más que la creación de un nuevo combustible a partir de estos aceites mediante un proceso de transesterificación que consiste en combinar el aceite con un alcohol, generalmente etanol o metanol, dejando como residuo glicerina que puede ser aprovechada por la industria cosmética, entre otras. Este proceso trae como consecuencia una pérdida considerable de la viscosidad así como la eliminación de los compuestos pesados de estos aceites [6].

### **1.3.1- Utilización de mezclas combustibles en motores de combustión interna.**

En la actualidad existen gran diversidad de tipos de combinaciones de los combustibles ya que existe una amplia gama de factores que se pueden variar teniendo en cuenta las materias primas, proporciones de estas, así como el uso que se le dará al combustible obtenido teniendo en cuenta si es un motor de

encendido por chispa por compresión o si el motor fue modificado para el empleo de otros combustibles mediante la alimentación dual, que no es mas que la suministración de ambos combustibles por separado, este método incluye dos sistemas de alimentación.

El etanol es un compuesto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares en la producción azucarera, para la producción de etanol en el mundo se utiliza mayormente como fuente de energía la biomasa. Este etanol es denominado, por su origen, bioetanol. Por sus propiedades puede ser empleado como combustible directamente, o bien mezclado en diferentes proporciones con gasolina. El uso de estas mezclas se ha extendido principalmente para reemplazar el consumo de derivados del petróleo. El combustible resultante de la mezcla de etanol y gasolina se conoce como gasohol oalconafta. Dos mezclas comunes son E10 y E85, con contenidos de etanol del 10% y 85%, respectivamente.

El etanol también se utiliza cada vez más como aditivo para oxigenar la gasolina estándar, reemplazando al éter metil tert-butílico (MTBE). Este último es responsable de una parte importante de la contaminación del suelo y del agua subterránea. También se puede utilizar como combustible en las celdas de combustible.

Las mezclas de biodiésel y diésel convencional basada en hidrocarburos son los productos más habitualmente distribuidos para su uso en el mercado del gasóleo al por menor. Gran parte del mundo utiliza un sistema conocido como la "B", factor que indica la cantidad de biodiésel en cualquier mezcla de combustible: el combustible que contiene 20% de biodiésel tiene la etiqueta B20, mientras que el biodiésel puro se denomina B100. Las mezclas con 80 por ciento de biodiésel y 20 por ciento de diésel de petróleo (B80) se pueden utilizar en general en motores diésel sin modificar [7]. El biodiésel también puede ser utilizado en su forma pura (B100), pero puede requerir algunas modificaciones del motor para evitar problemas de mantenimiento y rendimiento.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA/EE.UU.) lo tiene registrado para utilización como *combustible* puro (100% de biodiésel, o B100), como mezcla-base (con 20% de biodiésel y el resto de gasoil, B20), o como aditivo de combustibles derivados del petróleo.

Las mezclas diésel etanol en el presente representan una posible solución para el inminente fin de los combustibles fósiles ya que pueden alargar la vida de estos. En el caso particular de nuestro país que el principal productor de etanol es el Ministerio del MINAZ que representa un gran consumidor de combustible el cual pudiera en gran medida por etanol. A nivel mundial se están realizando diversos estudios al respecto en los que nuestro país también se ha involucrado.

#### **1.3.1.1- Utilización de mezclas Diésel-Etanol como combustible.**

En el Centro de Investigaciones del Petróleo, Ciudad de La Habana, Cuba, se realizó un estudio teniendo en cuenta la pérdida de lubricidad de la mezcla de etanol-diésel provocado por la adición del etanol. El estudio se basó fundamentalmente en la posibilidad de la adición de biodiésel para retomar las propiedades del diésel comercializado en nuestro país teniendo buenos resultados. Se utilizó un 8% de etanol anhidro más un 2% de biodiésel [8].

El uso de mezclas etanol- diésel ha sido estudiado por diferentes autores. Samayoa, 2007 presenta una revisión relacionada con la temática del empleo de etanol como combustible en motores, en la misma se valoraron varias técnicas con la finalidad de preparar el combustible para el proceso de alimentación del motor, dentro de las cuales se encontraban la alimentación dual, emulsiones diésel-etanol y la solución de ambas sustancias, se concluye que el primer método (alimentación dual), eleva altamente los costos por concepto de la modificación técnica necesaria a realizar al motor y la presencia de dos depósitos de combustible, así como los costos de explotación, y se reporta que para mantener una mezcla estable varios emulgentes han sido empleados, los cuales generalmente resulta de un costo elevado [9].

Relacionado con el empleo de emulgentes Baker [10], concluye que para lograr la mezcla estable de etanol y diésel se requiere una relación de 9:10 y 3:2 partes de emulgente referida al volumen de etanol y que en el caso de estos siempre se necesita que el contenido de agua no sobrepase el 0,1 %, lo cual resulta así en la mayoría de los casos. Estos emulgentes que garantizan la miscibilidad del diésel y etanol no se les conoce su naturaleza, ni formulación y su obtención en el mercado mundial es muy costosa.

En el Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte de Cuba en la actualidad han logrado algunos avances en la introducción del etanol como combustible en el transporte automotor, teniendo en consideración las características de nuestro país que están estrechamente relacionadas con la producción azucarera que es una de las fuentes fundamentales de obtención de etanol. Esta investigación se basó en el empleo de etanol hidratado para mezclar con gasolina y diésel. Se mezcló un 25% de etanol en gasolina y con un 25% de etanol en diésel pero en este caso se presentó el inconveniente de la utilización de un kit para la alimentación independiente de etanol y diésel lo cual significa una complicación en el sistema de alimentación [11].

Michael Wang [12], afirma que la inestabilidad de las mezclas etanol-diésel, o también llamado proceso de separación, se consigue reducir con el empleo de solventes químicos o aditivos que se encarguen de mantener unidas ambas sustancias y que no aparezcan en un corto tiempo, dos fases. Estas sustancias que facilitan el mezclado de ambos combustibles provienen de diferentes fabricantes y se emplean según sus características, por ejemplo el diésel, usa un co-solvente en una composición superior al 5% del volumen total, aunque más recientemente han surgido algunos aditivos, que en concentraciones menores (1-2%), consiguen la estabilidad de la mezcla.

Con vistas a estudiar en un motor el comportamiento de mezclas diésel/etanol Eckland, E [13], necesitaron un aditivo específico para procurar la homogeneidad de la mezcla, en particular se empleó una mezcla volumétrica

de etanol en diésel de un 5%, 10% y 15%, y durante el proceso de mezclado hubo que seguir rigurosamente las indicaciones del proveedor del aditivo [8].

#### **1.4 Potencialidades del aceite de Higuera como sustancia que posibilite la formulación de mezclas etanol hidratado-diesel.**

Este aceite extraído de las semillas de este arbusto nombrado *Ricinus Comunnis*, que en nuestro clima en particular se puede encontrar de forma silvestre dado a la buena adaptabilidad que a desarrollado este cultivo, con 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 se utiliza 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 [15].

La semilla es oval, de tamaño variable entre 5 y 20 mm según variedades. El tegumento es coriáceo, liso, lustroso, marmoreado, tóxico por la presencia de ricina y ricinina, su porcentaje de aceite es de un 46%. No presenta gran demanda de suelos por lo que este no competirá con los alimentos y su siembra puede ser intercalada con otros cultivos.

Este tipo de aceite presenta un grupo hidroxilo en la estructura del ácido ricinoleico como se muestra en la figura 2 que le provee de características especiales a este y a sus derivados, dada la propiedad de ser perfectamente miscible en el etanol. Debido a esto existe una dificultad a la hora de realizar la

separación de las fases en la realización de biodiésel, luego de efectuar la reacción de transesterificación [17].

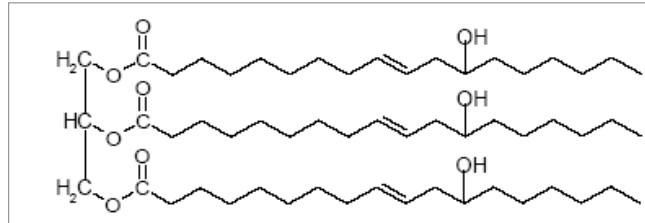


Figura 2 Esquema de la composición del aceite de ricino. Fuente: [17]

Tras el estudio preliminar realizado sobre este aceite encontramos su buena miscibilidad en etanol en cualquiera proporción no siendo así con otros aceites. Basándonos en este y en su afinidad a la vez por el diésel y teniendo en cuenta que el biodiésel ha sido empleado por diferentes autores con la finalidad de facilitar la mezcla del etanol con el diesel, el presente trabajo se orienta a la evaluación de la formulación de mezclas de este tipo pero empleando el aceite de higuera como sustancia que se encargue de suprimir la separación de las fases. Lo cual hasta el momento no ha sido encontrado por el autor en la bibliografía consultada y no existen reportes de esta aplicación con otros aceites vegetales ya que estos no cumplen con la propiedad de ser miscibles en etanol.

Con vista a comprobar lo antes descrito se realizaron mezclas con un carácter preliminar de diferentes aceites vegetales (girasol, soya, aceite usado de procedencia mixta) con etanol y se constató una separación instantánea de ambos componentes, lo cual de manera contraria no ocurrió con mezclas que se realizaron en diferentes concentraciones con el aceite objeto de estudio.

### **1.5- Conclusiones parciales.**

1- El empleo de mezclas etanol hidratado-diesel no se consigue sin la utilización de un aditivo para esta finalidad, ya que al mezclar ambos componentes la

separación de estos ocurre de forma espontánea. Una manera de utilizarlos la constituye la alimentación dual de ambos en el motor, lo cual requiere de modificaciones técnicas en el sistema de alimentación del mismo.

2- El aceite vegetal de higuera presenta la propiedad de ser miscible en etanol debido a la presencia de grupos hidroxilos en sus cadenas de carbono, propiedad que dificulta la separación de las fases biodiesel-glicerina luego de la transesterificación, pero que a su vez lo convierte en un compuesto que al ser miscible en etanol y diésel pueda contribuir a conseguir el mezclado de ambos componentes.

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **2.1- Introducción.**

En este capítulo se definen las principales características de los componentes que intervienen en la formulación de las mezclas combustibles objeto de estudio (aceite de higuera, etanol hidratado y diésel), se establecen las condiciones experimentales bajo las cuales se estudiará la formulación de las mismas, y los criterios bajo los cuales se seleccionarán aquellas composiciones de mezclas más promisorias para el empleo en motores de combustión interna.

Se describen los procedimientos empleados para la determinación de la viscosidad y demás propiedades físico-químicas, además de las condiciones de evaluación en banco de prueba de los combustibles seleccionados.

### **2.2- Características de los componentes a incluir en la formulación de mezclas etanol-diésel.**

Como antes se ha mencionado, los principales componentes a tener en cuenta en el estudio son, el combustible diésel, etanol proveniente de nuestra industria azucarera y aceite vegetal de higuera. Las principales características de los mismos se detallan a continuación:

#### **2.2.1- Diésel.**

El diésel empleado en nuestro trabajo tras un análisis de sus propiedades arrojó los siguientes resultados que se muestran a continuación en la siguiente tabla 1.

Tabla 1. Principales propiedades del diésel empleado en la investigación.

Diésel.	
Densidad	0.855 g/cm <sup>3</sup>
Punto de inflamación	70.2 °C
Viscosidad a 40 °C	3.87 mm <sup>2</sup> /s
Por ciento de azufre	0.38%
Acidez	0.118
BSW	0.00
Corrosión	1B
Color	3.0
Índice de cetano	49.5
Cenizas	0.001%
Carbón	0.034

Según los resultados obtenidos y apoyándonos en las normas que caracterizan al diésel citadas posteriormente, este se encuentra entre los parámetros normados. Los rangos en que se debe encontrar cada propiedad se muestran en el anexo 1.

### 2.2.2- Etanol.

El etanol está relacionado directamente con la producción azucarera debido a su origen, este se obtiene de plantas ricas en azúcar (principalmente la caña de azúcar de la que se obtiene la melaza que es la principal materia prima azucarada para la producción de etanol). También se puede producir de algunos cereales como, el maíz, arroz, trigo y cebada son las materias primas más comunes para la producción de etanol.

Su producción se basa en la fermentación, proceso metabólico energético que comprende la descomposición de moléculas, tales como carbohidratos, de manera anaerobia. Con la utilización de este proceso el hombre desde los tiempos antiguos lo ha empleado para la preparación de alimentos y bebidas. El desarrollo químico ha revelado la naturaleza biológica del proceso de fermentación. El producto de la fermentación es el alcohol etílico, pequeñas cantidades de propanol, butanol, ácido acético, y ácido láctico; los alcoholes de alta concentración también se pueden formar. El alcohol etílico está familiarizado con las bebidas alcohólicas. En su forma no natural es usado

como un solvente industrial y como materia prima para la manufactura de acetaldehído, acetato etílico, ácido acético, dibromito de etileno, glicol y muchos otros químicos orgánicos. El alcohol puro también puede ser utilizado para propósitos medicinales, farmacéuticos y saborizantes. La producción del alcohol etílico es realizada a través de procesos eficientes y automáticos. El proceso de manufactura no es muy complejo todo lo contrario es fácil de realizar. El control de la contaminación y el mantenimiento y reparación de las maquinarias y equipos también son fáciles. Aquellas naciones con climas tropicales y subtropicales, con abundante producción de azúcar, podrían invertir en el establecimiento de plantas de producción con el objetivo de potenciar su producción con el fin de emplearlo como biocombustible y los otros tantos usos que se le puede dar a este [14]. Por lo anteriormente citado nuestro país presenta un potencial real para la producción de etanol.

A continuación se muestra una tabla con las características del etanol empleado en nuestra investigación tabla 2 este es de producción nacional.

Tabla 2 Características del etanol.

<i>Ensayos</i>	<i>Resultados</i>
Características Organolépticas	Líquido incoloro, transparente, sin sedimentos
Tiempo de Permanganato	30,5 min
Grado Alcohólico	95,8° GL
Contenido de Aldehídos	10,91 mg/L
Acidez Total	10,80 mg/L
Contenido de Ésteres Totales	25,89 mg/L
Contenido de Alcoholes Superiores	22,27 mg/L

### **2.2.3- Aceite de higuera (*Ricinus Comunnis*).**

El aceite de higuera (*Ricinus Comunnis*) está compuesto por los siguientes ácidos grasos, ver en la tabla 1 y a continuación, en la tabla 2, se muestran sus propiedades físico- químicas.

Tabla 3- Composición química del aceite de higuera [15].

Ácidos grasos	Porcentaje
Ácido ricinoleico	70%
Ácido oleico	12%
Ácido ricinico	12%
Otros	6%

Tabla 4- Propiedades físico- químicas del aceite de higuera, [16].

Propiedad	Unidades	Estándar ASTM	Resultado	Valor típico
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	D-5	0,9707	0,96
Agua y sedimentos	% Volumen	D-96	0,0	
Corrosión	-	D-665	1A	-
Contenido de cenizas	% por peso	D-482	0,015	< 0,01
Residuo carbonoso	% por peso	D-189	0,101	0.22
Punto de inflamación	°C	D-93	279,3	270
Punto de fluidez	°C	D-97	-2	-10
Viscosidad a 40 °C	cSt (mm <sup>2</sup> /s)	D-445	266,81	297
Índice de acidez	mg KOH/g aceite	D-1980	2,1	-
Índice de saponificación	mg KOH/g aceite	D-5558	187,4	-
Índice de Yodo	g yodo/100 g aceite	D-5554	84,3	81-97

### 2.3- Evaluación preliminar de mezclas combustibles etanol-diésel.

Con el objetivo de corroborar la bibliografía consultada se realizó un diseño de experimento previo en el cual se mezcló etanol con pureza de 95.8% y diésel nacional en diferentes proporciones desde 1% a 40% de etanol hidratado obteniendo un total de 10 muestras las que fueron agitadas durante un minuto a temperatura ambiente, transcurrido un tiempo se observó su comportamiento, principalmente la aparición o no de fases independientes.

## 2.4- Evaluación de la posibilidad de obtener mezclas diesel- etanol- aceite de higuera.

En busca de las proporciones adecuadas para lograr un correcto mezclado de los tres componentes y cumpliendo con los requerimientos necesarios, se realizó un diseño de experimento del tipo Mc Lean Anderson para una región restringida, el cual se describe posteriormente. En el que variamos los tres componentes (diésel-etanol-aceite) en un rango de 10% a 80% garantizado que en ninguna de las muestras uno de los componentes fuera cero; una vez que se añadieron los tres componentes se agita durante 60 s. Tras la realización de las 36 muestras se dejaron en reposo durante un tiempo de 24 horas para que las mezclas se estabilicen. Transcurrido el tiempo se observó el número de fases en cada uno de los casos con el fin de desechar las que no tuviesen una sola fase. A las muestras obtenidas se le realizará un estudio más profundo. A continuación se muestra una foto del agitador empleado para la realización de las mezclas. figura 5.



Figura 5. Agitador magnético. Fuente: Foto tomada por el autor.

### 2.4.1- Diseño de experimento Mc Lean Anderson

El estudio de la influencia de cada componente en la muestra obtenida se realizó mediante un diseño experimental del tipo Mc Lean Anderson para una región restringida, donde cada componente se encuentra en un rango entre 10% y 80% (diésel-etanol-aceite) garantizando no analizar muestras en las que uno de los elementos sea cero.

A continuación se ilustra un gráfico número 1 con el diagrama terciario donde se representan cada una de las muestras y en el anexo 2 aparecen las proporciones de cada muestra obtenida del diseño de experimento. El diseño está constituido por 36 puntos, para lo cual se realizó la aleatorización del orden de los experimentos.

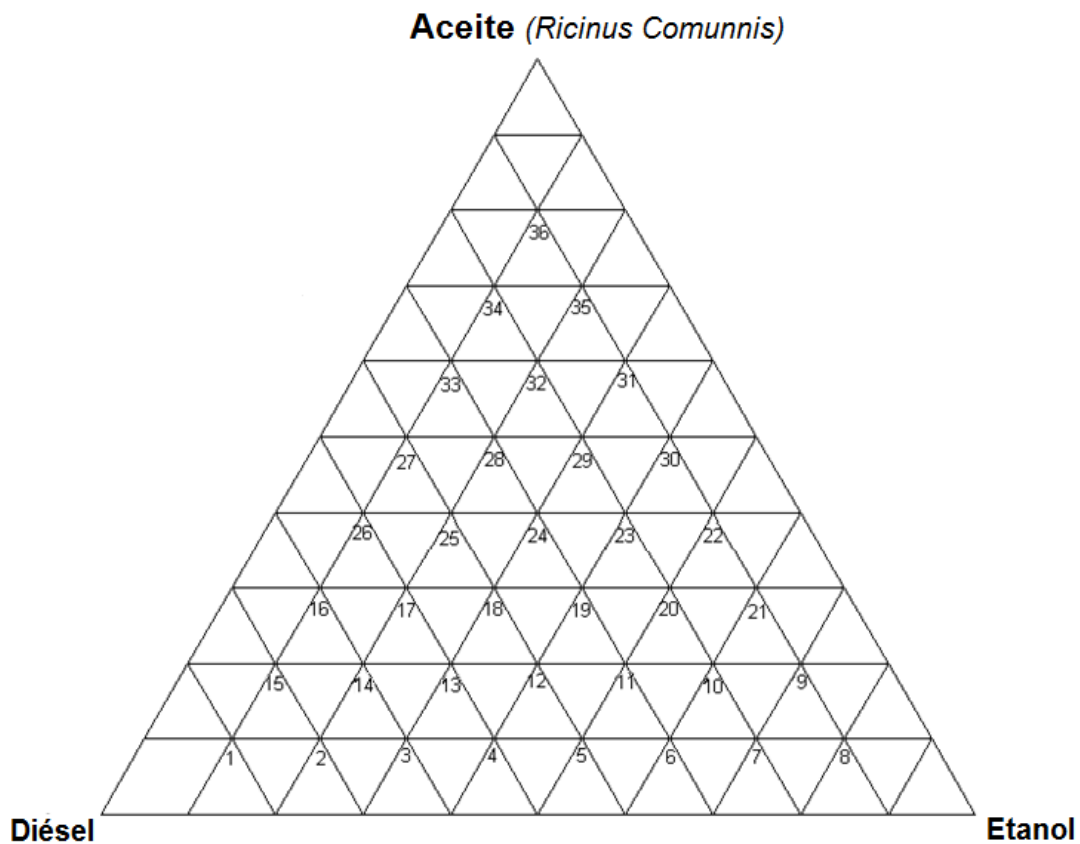


Gráfico 1 Puntos obtenidos en el diseño.

Las variables de decisión fueron la separación o no de las fases y la viscosidad de la mezcla.

Separación de las fases: Se realiza la observación visual para la definición del punto del diseño. Se identifica cada punto del diseño como líquido de una fase (cuando se mezclan los tres componentes) o líquido de dos fases (cuando no se mezclan), es muy difícil determinar, sin un análisis químico apropiado, qué componentes están presentes en cada una de las fases. Estas fases se caracterizan por su estado organoléptico como líquido claro o líquido oscuro.

Viscosidad: La viscosidad es una propiedad física de los fluidos y es una medida de su resistencia al movimiento; su determinación y el conocimiento de ella juegan un papel importante en la industria en general. Para la realización de una medición previa de viscosidad se empleó un viscosímetro Rheotest 2.1 el cual es de tipo rotatorio, muy útil para determinar la viscosidad en líquidos newtonianos y no newtonianos. Este basa su principio de funcionamiento en la rotación de un cilindro concéntrico a otro fijo, ver figura 3, 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 entre los dos cilindros. Se selecciona esta propiedad pues limita la utilización del combustible en el motor cuando alcanza valores muy diferentes al combustible diésel, según la NC-ASTM D 446:2011[23] este valor debe estar entre 1.6-5.3 mm<sup>2</sup>/s, cuando se va de este rango puede traer consecuencias en el sistema de alimentación así como en la formación de la gota ya que esta propiedad presenta gran influencia sobre el funcionamiento del sistema de inyección, la mecánica de ruptura, atomización y pulverización de los inyectores [13].

Esta propiedad prácticamente constituye el mayor obstáculo para el empleo de combustibles de origen vegetal en motores Diésel. Como lo indica la norma la realización de la medición se realiza a una temperatura de 40°C por lo que nos auxiliamos de un baño de agua con el que incrementamos la temperatura hasta

la adecuada haciendo circular esta agua por el viscosímetro auxiliándonos de una bomba peristáltica, en la figura 4 se muestra de izquierda a derecha la bomba, el baño de agua así como el viscosímetro empleados en el análisis experimental antes descrito.

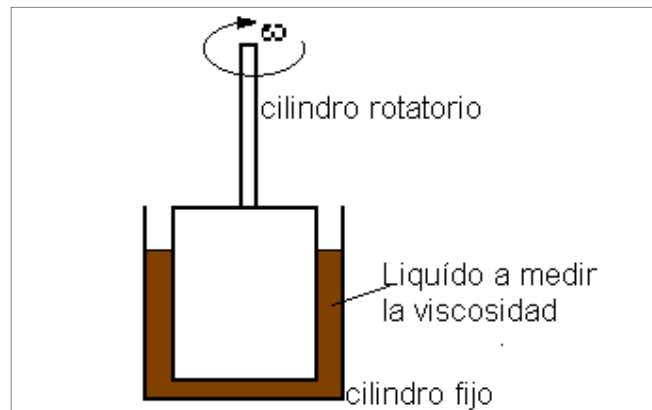


Figura 3 Esquema del viscosímetro Rheotest.



Figura 4 Bomba peristáltica, baño de agua y viscosímetro Rheotest.

## **2.5- Determinación de las propiedades físico-químicas.**

Las principales propiedades a medir son las que a continuación se describen, para la determinación de las mismas se tuvo en cuenta la normativa vigente que se emplea en nuestro país para la certificación de combustibles y lubricantes.

### **2.5.1.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, y que tengan una presión de vapor Reid igual o menor a 101,325 kPa (14,696 psi). Los valores se miden con el hidrómetro a la temperatura de referencia o a otra temperatura establecida, y las lecturas se corrigen a la temperatura de referencia mediante las tablas de mediciones del petróleo. Los valores determinados como densidad, densidad relativa o gravedad API, pueden ser convertidos a los valores equivalentes en otras unidades a la temperatura de referencia mediante las tablas de mediciones del petróleo [18], [19], [20], [21].

### **2.5.2 Viscosidad.**

Este método de ensayo especifica un procedimiento para determinar la viscosidad cinemática, ( $\nu$ ) de productos líquidos del petróleo, transparentes y opacos, por medición del tiempo para que a un volumen dado el líquido fluya por gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio calibrado. La viscosidad dinámica,  $\eta$ , puede ser obtenida, multiplicando la viscosidad cinemática,  $\nu$ , por la densidad,  $\rho$ , del líquido. El resultado obtenido a partir de este método de ensayo depende del comportamiento de la muestra y está diseñado para su aplicación en líquidos en los cuales primordialmente el esfuerzo de corte y la velocidad de corte son proporcionales (comportamiento del fluido Newtoniano). Sin embargo, si la viscosidad varía significativamente con la velocidad de corte, pueden ser obtenidos resultados diferentes con

viscosímetros de distintos diámetros de capilar. Han sido incluidos, el procedimiento y los valores de precisión para petróleos combustibles residuales, los cuales bajo algunas condiciones exhiben comportamiento no-Newtoniano. El rango de las viscosidades cinemáticas que abarca este método de ensayo es de 0,2 a 300000 mm<sup>2</sup>/s a todas las temperaturas entre (15 y 100) °C. Las unidades del Sistema Internacional usadas en este método de ensayo para la viscosidad cinemática es mm<sup>2</sup>/s, y para la viscosidad dinámica es mPa.s. [22], [23], [24].

### **2.5.3 Cenizas.**

Este método de ensayo cubre la determinación de las cenizas en el rango de (0,001-0,18) % en masa para destilados y productos residuales, crudo, aceites lubricantes, ceras y otros productos del petróleo, en las que cualquier material presente formador de cenizas, es considerado contaminante o impureza indeseable. El método de ensayo se limita a productos del petróleo, los cuales están libres de aditivos adicionados formadores de cenizas, incluyendo algunos compuestos de fósforo. 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 dado. Las cenizas se pueden originar de componentes metálicos solubles en agua o petróleo, o sólidos extraños tales como suciedad o herrumbre [25], [26] [27].

### **2.5.4 Agua y sedimento por el método de centrifugado.**

Este método de análisis de laboratorio para la determinación de agua y sedimento en combustibles utilizando el método de centrifugación, este método nos da un rango de agua en el combustible de 0 a 30% en volumen. Consiste en colocar las muestras en dos tubos de ensayo para centrifuga, de forma cónica con iguales volúmenes del producto a analizar y el tolueno saturado en agua. Después de la centrifugación, se lee el volumen de la capa de agua y sedimento de mayor densidad, depositada en el fondo de los tubos. El

contenido de agua y sedimento en los combustibles es importante porque puede ocasionar la corrosión de los equipos y por ende problemas en el proceso. Se utiliza una centrífuga capaz de hacer girar 2 o más tubos de forma cónica de 203 mm de largo a una velocidad de 1210 a 2170 min.<sup>-1</sup> en dependencia al diámetro del brazo [28], [29].

### **2.5.5 Punto de inflamación.**

Este método de ensayo cubre la determinación del punto de inflamación de productos del petróleo en el rango de temperaturas entre 40 °C y 360 °C, por el equipo manual o automático Pensky – Martens copa cerrada y la determinación del punto de inflamación del biodiésel en el rango de temperatura de 60 °C a 190 °C por el equipo automático Pensky – Martens copa cerrada. El procedimiento es aplicable a los combustibles destilados (diésel, mezclas de biodiésel, querosina, aceites de calentamiento, combustibles para turbina) aceites lubricantes nuevos y en uso y otros líquidos homogéneos de petróleo. Prácticamente consiste en una copa de ensayo de latón de dimensiones específicas, se llena hasta la marca interior con la porción de ensayo y se fija con una tapa de dimensiones específicas, se calienta y la porción de ensayo se agita a la velocidad establecida. Se introduce la fuente de ignición en la copa a intervalos regulares con interrupción de la agitación, hasta que la fuente de ignición causa que los vapores de la porción de ensayo, produzcan una llama bajo las condiciones controladas del ensayo. [30]

### **2.5.6 Color.**

Este método de ensayo cubre la determinación visual del color de una amplia variedad de productos derivados del petróleo, tales como aceites lubricantes, aceites, aceites de calefacción de combustible diésel y el petróleo. Se utiliza la determinación del color de los productos derivados del petróleo principalmente para fines de control de fabricación y constituye una importante característica de calidad, ya que el color se observa fácilmente por el usuario del producto y

en algunos casos, el color puede servir como un índice del grado de calidad del proceso de refinación del combustible. Cuando la gama de colores de un producto en particular es conocida, una variación fuera del rango establecido puede indicar una posible contaminación con otro producto. Sin embargo, el color no es siempre una guía fiable de la calidad del producto y no debe ser utilizado indistintamente en las especificaciones del producto [31].

### **2.5.7 Acidez.**

Este método de ensayo determina la acidez o componentes básicos en productos derivados del petróleo y lubricantes solubles o prácticamente solubles en mezclas de tolueno y alcohol isopropílico. Las sales reaccionan si sus constantes de hidrólisis son más grandes que  $10^{-9}$ . Para determinar el índice de acidez o base, la muestra se disuelve en una mezcla de tolueno y alcohol isopropílico que contiene una pequeña cantidad de agua, y la solución de fase única resultante se valora a temperatura ambiente con el estándar de base alcohólica o una solución alcohólica de ácido, respectivamente, el punto final se indica por el cambio de color del agregado, solución de p-naftolbenceína (naranja en ácido y verde-marrón base). Para determinar el número de ácido fuerte, una porción separada de la muestra se extrae con agua caliente y el acuoso extracto se valora con una solución de hidróxido de potasio, utilizando el anaranjado de metilo como indicador [32], [33].

## **2.6- Condiciones experimentales del banco de ensayo para la evaluación del combustible en el motor.**

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

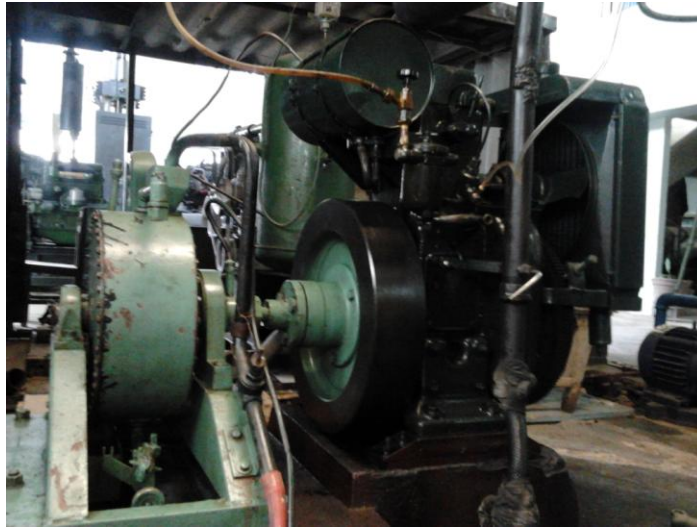


Figura 5 Banco de prueba.

El dinamómetro está formado por una parte móvil y otra fija, la parte móvil está accionada por el árbol que está conectado al motor, y la parte fija se encuentra acoplada al estator del dinamómetro que en este caso sería el cuerpo del dinamómetro, y esta parte además se encuentra soportada por dos pedestales con rodamientos que permiten que gire el dinamómetro en un solo eje, su cuerpo está unido a una barra de acero de sección cuadrada con una longitud de 0,65 m que permite accionar la balanza y de esta forma ejecutar las mediciones de torque y potencia.



Figura 6 Dinamómetro de copa de fluido.

Tabla 6 Principales características técnicas del banco de prueba.

<b>MARCA DEL MOTOR</b>	<b>MOTO CUBA</b>
Cilindrada	860 cc
Diámetro del cilindro	100 mm
Carrera del cilindro	110 mm
Potencia máx.	8 kW
<b>DINAMÓMETRO</b>	<b>DINAMÓMETRO DE COPA</b>
Brazo	0,65 m
Fluido de trabajo	Aceite para transmisiones
Fluido de enfriamiento	Agua

### 2.6.1 Metodología a emplear para la determinación de los parámetros de funcionamiento en banco de prueba.

Con vistas a estudiar el comportamiento del motor durante su funcionamiento con la mezcla elegida de etanol-diésel-aceite, se obtuvo la curva característica correspondiente a plena carga, o también conocida en la literatura como

característica exterior de velocidad. En esta, las condiciones de funcionamiento del motor se corresponden con la alimentación máxima del combustible, la cual se logra al abrir totalmente la cremallera de la bomba de inyección.

Específicamente se estudió el comportamiento de las curvas de variación de potencia (N) y el consumo específico de combustible (BSFC), contra la velocidad de giro (del cigüeñal ( $\text{min}^{-1}$ ), para cada uno de los combustibles ensayados. 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  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Y a partir de este momento se procede 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 comienza a aplicar carga al motor incrementando de forma gradual la cantidad de fluido en el dinamómetro, midiendo el consumo horario de combustible (l/h) empleando una probeta graduada, observando también en un tiempo conocido el consumo de combustible y tomando lecturas de la potencia y velocidad de giro. Esta potencia se obtiene de la multiplicación de la longitud del brazo del dinamómetro con la fuerza que este ejerce sobre la balanza y la velocidad de giro del motor, nos auxiliamos de un tacómetro de mano.

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 horario. Antes de realizar estas mediciones se deja transcurrir un tiempo (aproximadamente 15 minutos) durante el cual el motor se muestra estable antes las variables estudiadas, y se realizan tantos puntos como es necesario desde la velocidad máxima regulada en vacío hasta la velocidad mínima de trabajo a plena carga del motor.

El consumo específico de combustible, en g/kWh, se obtiene del cociente entre el consumo horario, en l/h, y la potencia desarrollada, en kW, indicando los gramos de combustible quemados por el motor para conseguir un 1 kWh de

trabajo. Con los valores de potencia y consumo específico del combustible correspondiente a los diferentes valores de velocidad de giro, se construyeron las curvas características comparativas.

Los parámetros estudiados en el motor están condicionados a los parámetros ambientales (temperatura, presión ambiental, humedad relativa) existentes durante su funcionamiento. Es por ello que para comparar diferentes motores, así como diversos ensayos efectuados a motores similares pero bajo distintas condiciones atmosféricas, es necesario corregir los resultados obtenidos en banco de prueba en condiciones estándar. De este modo se garantiza la compatibilidad de los resultados obtenidos en diferentes países del planeta, o simplemente bajo diversas condiciones de temperatura ambiental, presión atmosférica y humedad relativa, etc. Por este motivo durante la realización de los ensayos se tuvo en cuenta la medición de los parámetros ambientales (presión, temperatura y humedad) según lo dispuesto en la normativa [34].

Para la corrección de la potencia medida a condiciones estándar, se tuvo en cuenta el factor de corrección ( $c$ ), empleado por [35] según la ecuación siguiente, en la cual  $T_{amb}$  (K) y  $P$  (mm de Hg), son la temperatura y presión atmosférica medidas durante el ensayo respectivamente.

$$c = \frac{760}{P} \sqrt{\frac{T_{amb}}{285}}$$

(1)

## **CAPÍTULO: 3 Análisis de los resultados.**

### **3.1-Introducción.**

Una vez definidas aquellas mezclas etanol-diesel-aceite con viscosidades cercanas al combustible tradicional, se hace necesario estudiar el comportamiento de las propiedades físicas así como su influencia en el funcionamiento en los motores de combustión interna con su empleo, lo cual constituye su finalidad, por tal motivo resulta importante conocer cómo afecta el empleo de este combustible a los principales parámetros de funcionamiento del motor como es el caso de la potencia y consumo de combustible.

### **3.2- Evaluación preliminar de mezclas combustible etanol-diésel.**

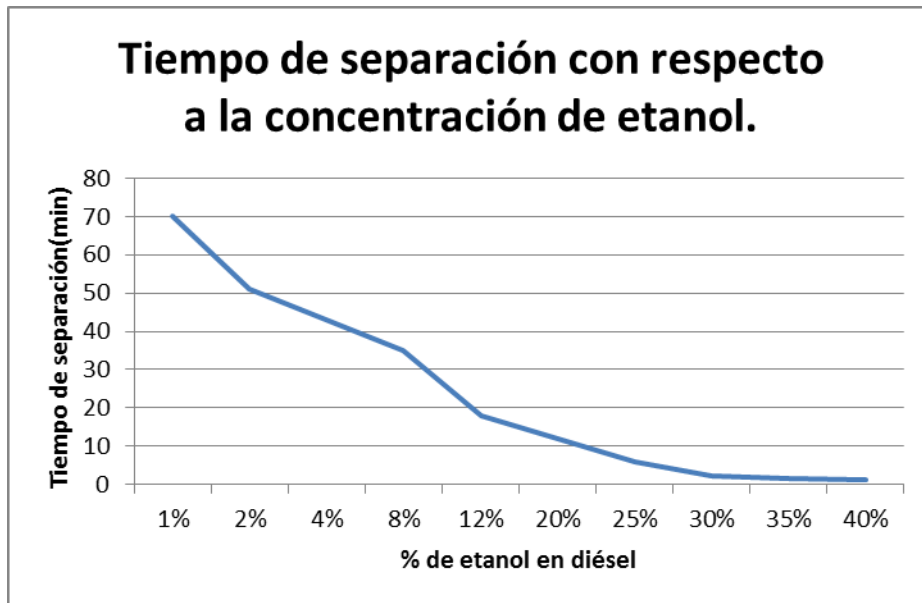
Tras la realización de las diferentes mezclas se apreció en todos los casos la separación de ambos combustibles, la misma tardó más a medida que menor cantidad de etanol fue añadido al diesel. Lo que imposibilita la utilización de estos combustibles en el motor, este es el motivo fundamental por el cual diferentes autores proponen realizar modificaciones técnicas al motor con vistas a lograr la alimentación simultánea pero por separado de ambos combustibles (alimentación dual).

Los valores de tiempo de separación medidos durante el estudio y en función de la cantidad de etanol en la mezcla son los que aparecen en la tabla 7.

Tabla 7 elaboración propia

% de etanol	Tiempo
1%	70
2%	51
4%	43
8%	35
12%	18
20%	12
25%	6
30%	2.3
35%	1.6
40%	1.15

Y en la gráfico 2 se puede apreciar el comportamiento del tiempo de separación en función de la cantidad de etanol contenida en la mezcla.



Gráfica 2. Comportamiento del tiempo de separación en función de la cantidad de etanol.

#### 2.4- Diseño de experimento Mc Lean Anderson.

En la siguiente gráfica 3 se muestran los resultados obtenidos, se señalan en color rojo aquellos puntos del diseño en los cuales se observó una sola fase. El

tiempo de observación de las mezclas fue de 24 horas aunque actualmente (período de 60 días), estas se mantienen estables y aquellas que se han reproducido a mayor escala han tenido similar comportamiento.

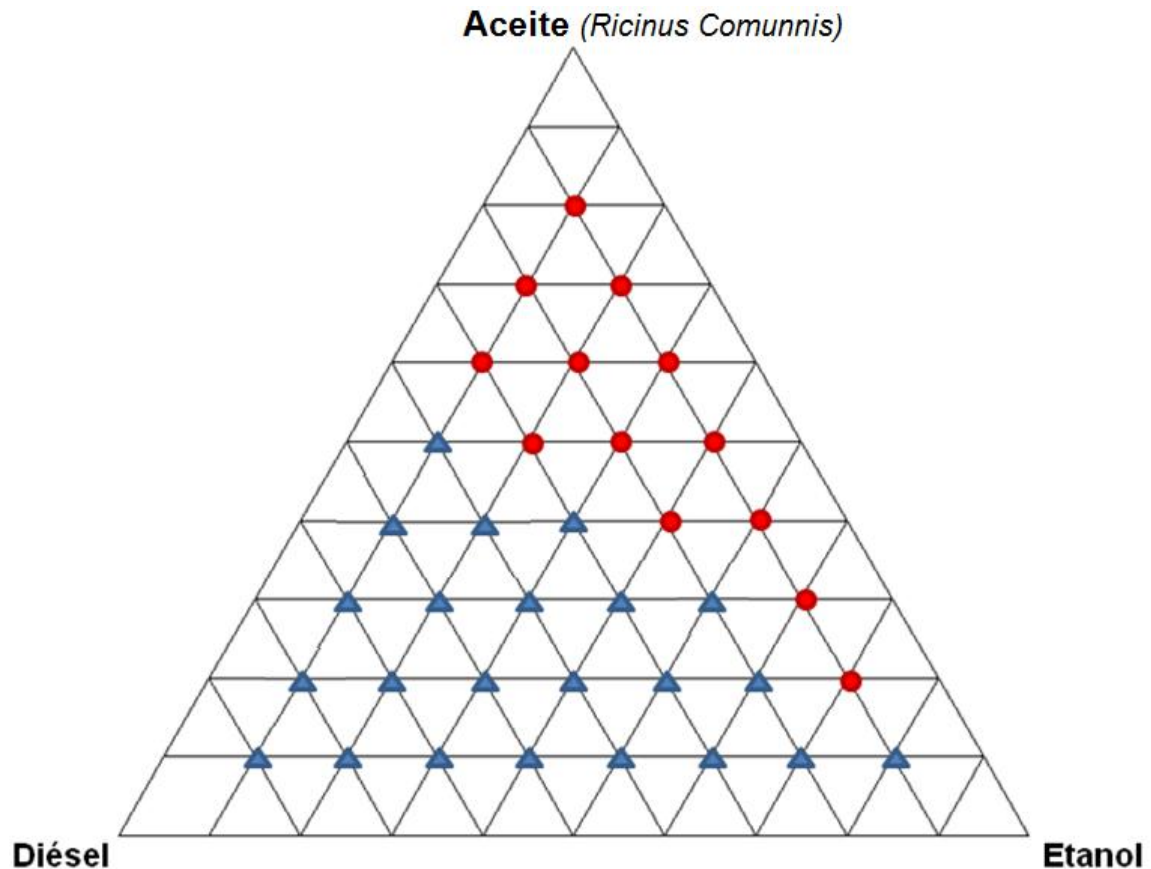


Gráfico 3 Resultados del diseño de experimentos.

Basándonos en los resultados obtenidos en el diseño de experimento se realizó un estudio de la viscosidad de aquellas mezclas que tras añadirle los tres componentes no se separaron, manteniendo una sola fase homogénea. El objetivo fundamental de este estudio es la determinación de las mezclas con viscosidad cercana al diésel. Ya que estas han de experimentar un comportamiento similar en el sistema de alimentación del motor, previamente diseñado para combustible tradicional.

Las mezclas seleccionadas bajo el criterio antes mencionado resultaron ser la 9, 21, 22 y 23, con valores de viscosidad de 3,89 mPas; 4,76 mPas; 6,79 mPas y 7,95 mPas respectivamente. Con respecto a la viscosidad del diesel empleado en las mezclas de 4,42mPas.

Los valores de viscosidad de todas las mezclas se muestran en el anexo 3, donde además se detallan la dosificación de cada componente.

### **3.5- Determinación de las propiedades físico-químicas.**

Auxiliándonos de la ayuda proporcionada por el laboratorio de la Refinería Sergio Soto en Cabaiguán se analizaron una serie de propiedades que se le realizan al diésel obtenido ahí para un control de calidad de la producción del centro que está encaminada a la refinación del crudo nacional fundamentalmente obteniendo una serie de productos para uso nacional como es la producción de aceites y combustibles. Tomando como referencia las normas que caracterizan al diésel se determinaron las propiedades de las mezclas combustibles a las previamente seleccionadas por la viscosidad para una posterior comparación con el diésel nacional. Los valores de cada una de las propiedades determinadas a cada una de las mezclas se muestran en el anexo 4.

#### **3.5.1.Densidad.**

A continuación se muestra en el gráfico 4 la relación de las densidades estudiadas, el mismo fue construido a partir del anexo 4 en el que se muestra una relación de los valores de densidad obtenidos en el laboratorio.

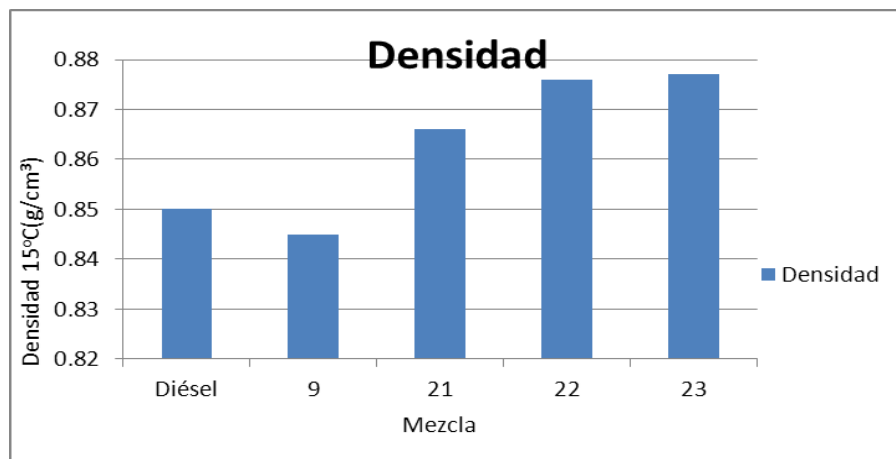


Gráfico 4# Densidad.

Los resultados obtenidos reflejan que la densidad está relacionada con la cantidad de etanol en la mezcla dando que para la muestra 9 hubo una disminución de la densidad en un 1,2% con respecto al diésel siendo todo lo contrario para las 21, 22 y 23 que con la disminución del etanol se incrementó la densidad en 1,3%, 2,4% y 2,6% respectivamente. Esta variación como se explicó anteriormente de forma muy preliminar la rige la cantidad de etanol en la mezcla

### 3.5.2 Viscosidad.

En la siguiente gráfica 5 se muestran las variaciones que experimentaron la viscosidad de las mezclas con respecto al diésel y en el anexo 4 se muestra una relación de las viscosidades obtenidas en el laboratorio.

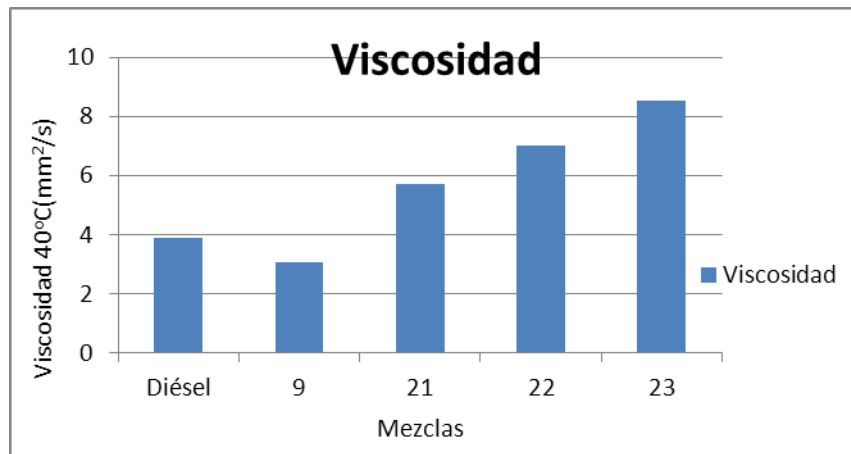


Gráfico 5 Viscosidad.

Los resultados obtenidos reflejan que la viscosidad está relacionada con la cantidad de etanol en la mezcla dando que para la muestra 9 hubo una disminución de la viscosidad en un 20,6% con respecto al diésel siendo todo lo contrario para las 21, 22 y 23 que con la disminución del etanol se incrementó la densidad en 32,4%, 44,8% y 54,6% respectivamente. Esta variación como se explicó anteriormente de forma muy preliminar la rige la cantidad de etanol en la mezcla.

### 3.5.3 Cenizas.

En la siguiente gráfica 6 se muestran las variaciones que experimentó la Cenizas de las mezclas con respecto al diésel haciendo relación al anexo 4 donde se muestra una relación de los valores obtenidos en el laboratorio

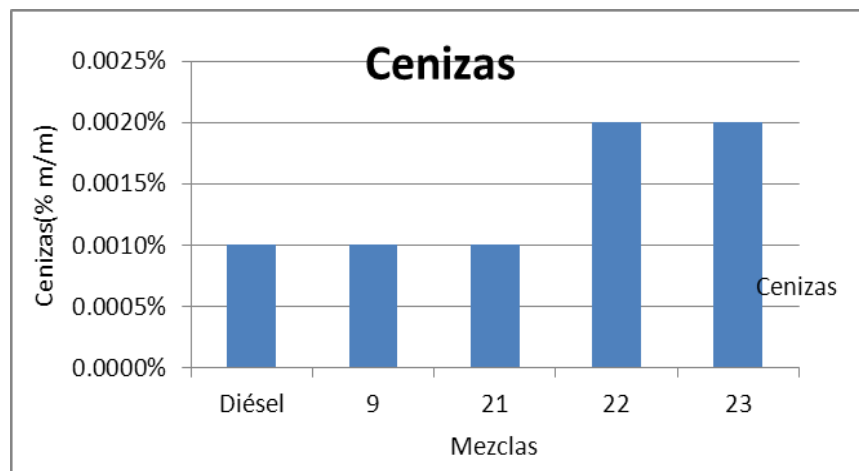


Gráfico 6 Cenizas.

Los resultados obtenidos de las cenizas tenemos que el mayor valor obtenido se encuentra en un 80% por debajo del valor máximo permisible del diésel por lo que esta propiedad tuvo una gran mejoría.

### 3.5.4 Agua y sedimento por el método de centrifugado.

En este estudio los resultados obtenidos no fueron relevantes, ya que se esperaba constatar presencia de humedad en las mezclas debido a que el alcohol empleado fue de una pureza de 95,5%, pero una vez centrifugado el combustible no fue posible detectar la presencia de agua por el método visual, que es el usado según la norma antes mencionada. Esto puede estar influenciado porque al formar parte el etanol de una mezcla ternaria donde intervienen cantidades apreciables otros dos componentes, el contenido de humedad se reduce significativamente.

### 3.5.5 Punto de inflamación.

Los valores obtenidos tras el análisis del punto de inflamación para todas las mezclas evaluadas resultaron ser muy bajo respecto al diesel, ya que la misma decrece críticamente con la adición del etanol a la mezcla combustible, criterio con el cual coinciden [38], [39], [40] y [41]. Este comportamiento va en

detrimento de la seguridad del combustible, por lo que durante la transportación, manipulación y almacenamiento del mismo se debe prestar cuidado en este sentido. Los valores específicos se pueden apreciar en el anexo 4.

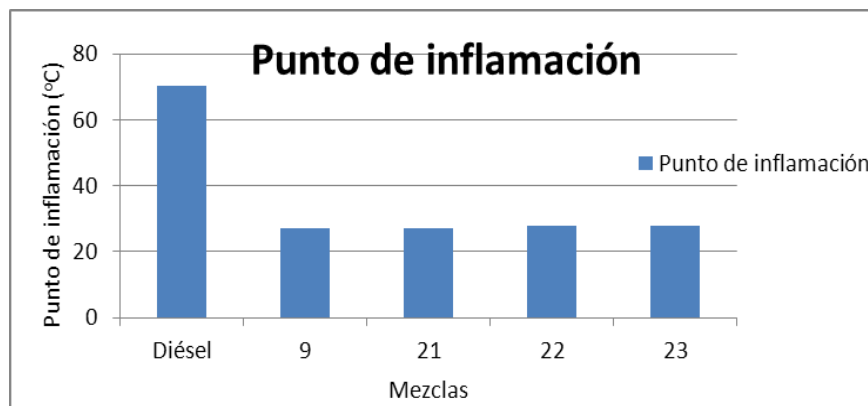


Gráfico 7 Punto de inflamación.

### 3.5.6 Color.

Esta propiedad como ya se ha mencionado describe visualmente como ha sido la calidad del proceso de refinación del diesel, pero en el caso que nos ocupa no tiene gran significación debido a la naturaleza de las mezclas. Pero se decidió incluir porque la misma para las mezclas evaluadas puede servir en algún momento como referente que indique la dosificación de sus componentes a futuras investigaciones. En el anexo 4 se muestran los valores obtenidos en esta práctica.

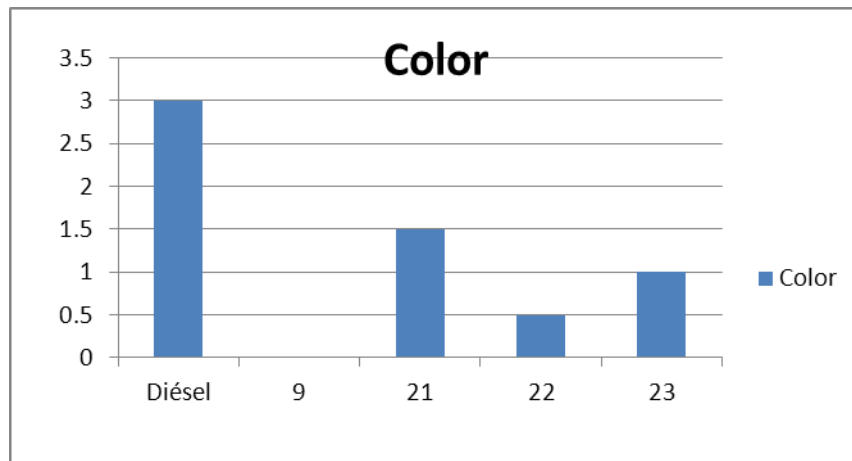


Gráfico 8 Índice de color.

### 3.5.7 Acidez.

A continuación se muestra una gráfica donde se puede apreciar un incremento de la acidez de las mezclas con respecto al diésel debido a la presencia del aceite que presenta una acidez elevada respecto a este, los valores obtenidos para cada una de las mezclas se pueden observar en el anexo 4 donde se puede apreciar que estos valores se encuentran en el rango permisible por el diesel.

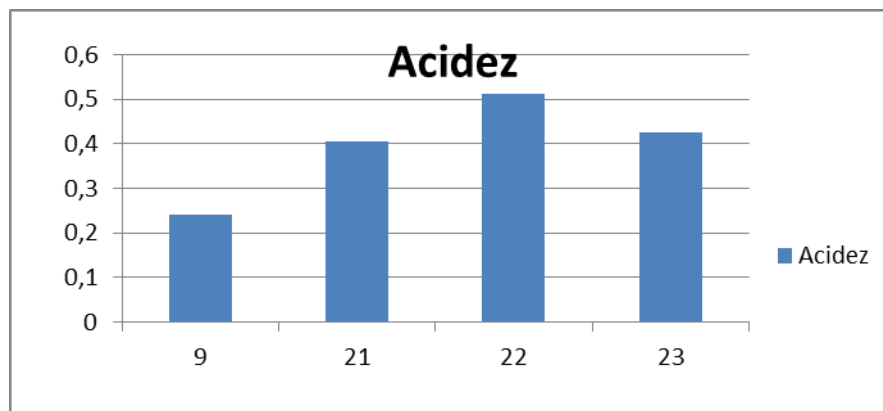


Gráfico 9 Acidez.

### 3.5.8 Estimación del poder calórico.

Para la estimación del poder calórico inferior acudimos a un método cuantitativo que consta de la suma de los porcentos de cada componente multiplicado por

su poder calórico. Según lo encontrado en la bibliografía los poderes calóricos de los tres componentes se muestran en la siguiente tabla 8.

Tabla 8 Poderes calóricos de los componentes de las mezclas [37].

Componente	Poder calórico MJ/kg
Diésel	42
Etanol	27
Aceite	39

Teniendo en cuenta las dosificaciones de cada componente en cada una de las mezclas obtenidas se estimaron los poderes calóricos en cada caso, los que se muestran en la siguiente tabla 9.

Tabla 9 Poderes calóricos estimados.

Componente	Poder calórico MJ/kg
Diésel	42
9	30,9
21	31,9
22	33,3
23	34,8

### **3.6- Condiciones experimentales del banco de ensayo para la evaluación del combustible en el motor.**

Para la evaluación de las mezclas combustibles obtenidas se procedió a evaluar en el banco de prueba antes citado la número 23 por ser la de mayor poder calórico de las más cercanas al rango de viscosidades del diésel teniendo como referencia que en este mismo banco de prueba se ensayó un biodiésel

obtenido a partir de aceite de girasol, el cual presentaba una viscosidad de  $12 \text{ mm}^2/\text{s}$  y no se reportaron anomalías en el funcionamiento del motor con este [36]. Además, se estudió la influencia de este biocombustible con respecto al gasoil en el desgaste de los elementos fundamentales de la bomba de inyección de un motor D65M, durante 120 horas de funcionamiento, a una velocidad correspondiente al régimen de plena carga del motor, obteniéndose resultados favorables con la utilización del biodiésel. [42]

Durante la evaluación de la mezcla 23 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 mismos problemas se detectaron para el diesel y fue necesario auxiliarnos de una fuente de calor que incrementa 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 del etanol [37], [43] [44] , 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. Para lo cual nos auxiliamos del siguiente procedimiento.

Cálculo del ángulo de inyección.

Datos:

Diámetro del volante: 49,0 cm.

Distancias entre marcas del volante: 3,3 cm.

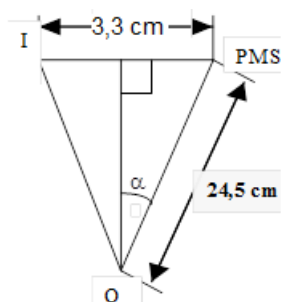


Figura 7. Triángulo formado entre el PMS, Pto de inyección (I) y centro del volante. (O).

Se tiene un triángulo isósceles (PMS-I-O), figura 7, entonces se divide la distancia entre las marcas del punto muerto superior (PMS) y el comienzo de la inyección (I) a la mitad y se traza una línea desde este punto hasta el centro del rotación (O), y se obtienen como resultado dos triángulos rectángulos a los que se le calcula el ángulo  $\alpha$ , que multiplicado por dos será el ángulo de avance de la inyección.

$$\tan a = \frac{3,3/2}{24,5} = 0,0673$$

$$a = 3,85 \text{ grados.}$$

$$2 * a = 7,7 \text{ grados}$$

El ángulo de avance de la inyección con el cuál se efectuaron las pruebas con la mezcla 23 fue de 7,7 grados que fue donde se experimentó un correcto funcionamiento del motor.

El ángulo de avance de la inyección antes de ser corregido era de 10 grados, y bajo este ángulo el motor empleando la mezcla combustible no desarrolló un adecuado funcionamiento por lo que se procedió a la corrección antes explicada.

Después de haber atrasado este ángulo mejoraron los parámetros del motor con respecto al fenómeno del golpe de diésel debido al bajo punto de inflamación y la pérdida del índice de cetano por la presencia del etanol.

En la grafica 10 se pudo apreciar un incremento del consumo específico de combustible dado por la pérdida del poder calórico. En el caso del consumo mínimo este experimento un incremento de un (12%).

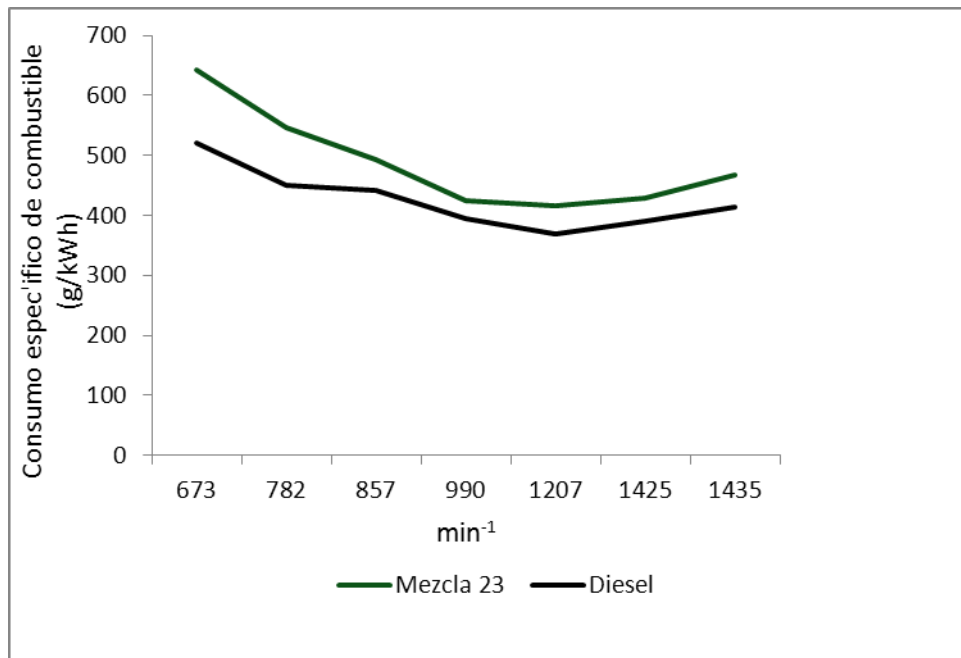


Gráfico 10 Acidez.

Debido a la causa antes mencionada en las siguientes graficas 11 y12 se observa una pérdida de potencia que en el caso de la potencia máxima fue de un (13%). Estos valores característicos del motor fueron afectados por el coeficiente  $c=1,02$  antes mencionado para estandarizar los valores del motor con una presión de 101,3 kPal y una temperatura de 32°C. Los valores desarrollados por el motor se muestran en el anexo5 para cada combustible

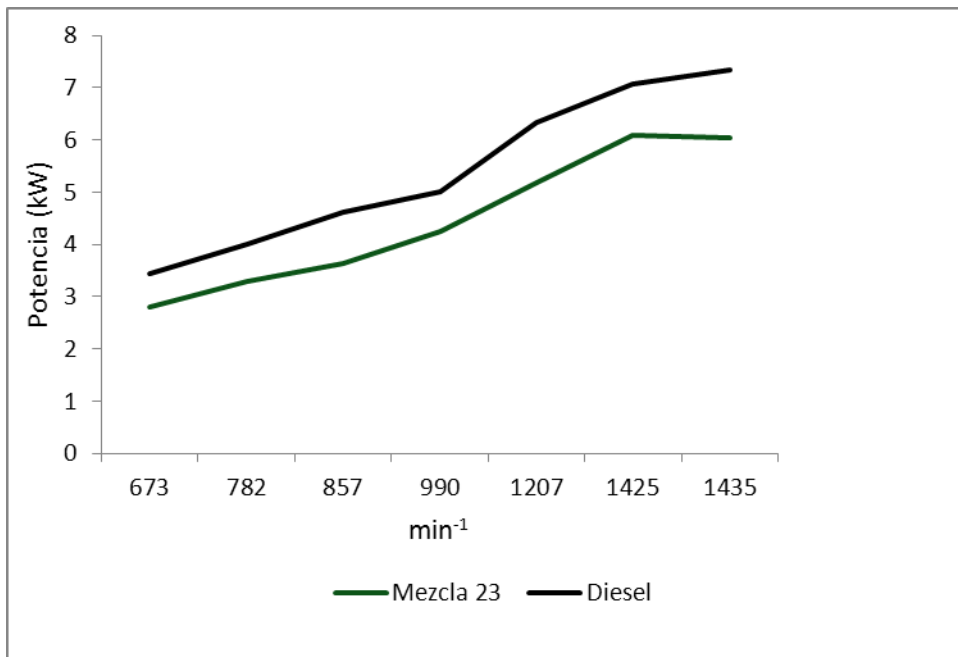


Gráfico 11 Potencia.

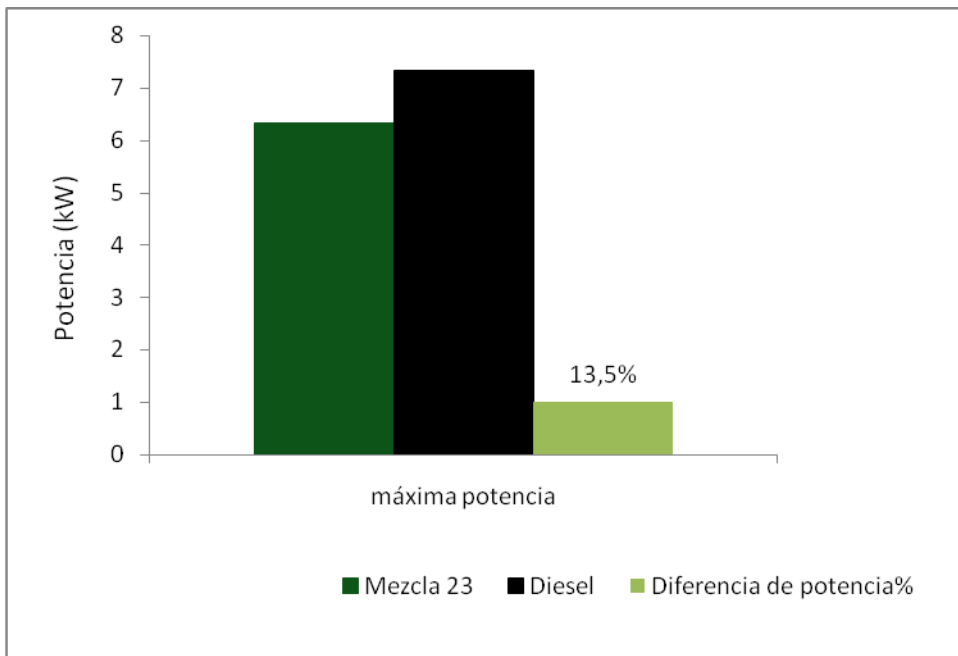


Gráfico 12 Potencia máxima.

## CONCLUSIONES

1. Luego de consultar la bibliografía y teniendo en cuenta un estudio preliminar se verifica la imposibilidad de formular mezclas etanol hidratado -diesel sin la presencia de un tercer componente que garantice la miscibilidad de los ya mencionados, este último referido por la comunidad científica como aditivo o emulgente, a lo cual se une la posibilidad de usar la alimentación dual de ambos combustibles para solucionar como alternativa de solución a este problema de miscibilidad.
2. Las mezclas estudiadas en el diseño de experimento propuesto con mayores posibilidades de empleo en el motor según su viscosidad resultaron ser 9, 21, 22, y 23 con dosificaciones diésel/etano/aceite referidas a % de 10/70/20, 10/60/30, 10/50/40 y 20/40/40. De estas teniendo en cuenta este parámetro y el poder calórico de las mismas.
3. Durante la formulación de mezclas etanol-diesel, el aceite de higuera en determinadas dosificaciones se presenta como una sustancia que inhibe la separación de ambos combustibles, formando una mezcla combustible ternaria que puede ser empleada en la alimentación de motores de encendido por compresión.
4. Durante el funcionamiento del motor con la mezcla 23, se detectó un ligero incremento del consumo específico (12%) y una disminución de la potencia (13,5%) respecto al diesel, este comportamiento se debe fundamentalmente al menor poder calórico de la mezcla respecto al combustible de diseño del motor.

## **RECOMENDACIONES**

1. Estudiar la influencia en los parámetros de funcionamiento y gases contaminantes del motor de las demás muestras de combustibles seleccionadas en este trabajo.
2. Someter las mezclas seleccionadas a ensayos de larga duración en el motor para estudiar la influencia de estas mezclas en el desgaste y corrosión de los componentes del sistema de alimentación, dilución del combustible en el aceite lubricante y la posible aparición de depósitos de carbono en la cámara de combustión.
3. Estudiar la influencia del ángulo de inyección del motor para las mezclas seleccionadas, en función de los parámetros de funcionamiento del motor, debido al menor número de cetano de las mismas.

## **Bibliografía**

- [1] British Petroleum Statistical Review of World Energy Outlook 2030, 2011
- [2] Turrini, E. (2006). El camino del Sol. A. M. Larrosa and L. T. Rodríguez, Cubasolar.
- [3] Fagundes, F. F., R. B. Garcia, et al. (2005). "Lipase catalyzed synthesis of biodiésel from castor oil in organic solvent." *Journal of Biotechnology* 118(1): 166-169.
- [4] Tickell. Josua, (2000). "Role of biotechnological interventions in the improvement of castor (*Ricinus communis* L.) and *Jatropha curcas* L." *Biotechnology Advances* 26(5): 424-435.
- [5] Sebastián. N. Fernando, (2000) "Isolation of a natural mutant in castor with high oleic/low ricinoleic acid content in the oil." *Crop Science* 44(1): 76-80.
- [6] José A Sotolongo P, 2002"Optimization of alkaline transesterification of soybean oil and castor oil for biodiesel production " *Applied Biochemistry and Biotechnology* 122(553-560).
- [7] Kegl, B. (2008). "Effects of biodiesel on emissions of a bus diesel engine." *Bioresource Technology* 99(4): 863-873.
- [8] J. I. Dominguez, E. Miguel, R. Arjona, C. Millán , THE EFFECTS OF ETHANOL-DIESEL BLENDED FUELS ON THE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF UNMODIFIED DIESEL ENGINES, 2009.
- [9] Samayoa (2007). "El manual del Higuera" [en línea]. Disponible en [Búsqueda de Libros de Google](#).
- [10] Baker, Q. A. Use of ethanol -in-Diesel Fuel Emulsions and Solutions in a Medium- Speed Diesel Engine. SAE Paper 810254.(1981)
- [11] Cetra Investigación y Desarrollo Del Transporte.

- [12] Wang, Michael; Saricks, Chris; Lee, Hanjie. Fuel-Cycle Energy and Emission Impacts of Ethanol-Diesel Blends in Urban Buses and Farming Tractors, Final Report, Illinois Department of Commerce and Economic Opportunity, July, 2003.
- [13] Eckland, E. E.; R. L Bechtold; T. J. Timbario; and P. W. McCallum. State-of-the-Art Report on the Use of Alcohols in Diesel Engines. SAE Paper 840118.
- [14] <http://www.tpcc.org.tw/index-english.asp>
- [15] BENAVIDES, A. Y. Biodiesel de aceite de higuera. Una evaluación de su obtención y utilización. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2004.
- [16] BARAJAS, C. L. Obtención de biodiesel a partir de la higuera (*ricinus communis*). 1er Seminario Internacional de Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. 2004.
- [17] D.S. Ogunniyi. Castor oil: vital industrial raw material. Department of Chemistry, University of Ilorin, Nigeria. 2005
- [18] NC ASTM D4057 Industria del Petróleo. Petróleo Crudo y sus derivados líquidos. Método de Muestreo Manual.
- [19] NC-ASTM D1298:2009
- [20] MPMS Apartado 8.1 Manual de muestreo de Petróleo y productos de Petróleo (ASTM D 4057).
- [21] MPMS Apartado 8.2 Muestreo automático del Petróleo y productos de Petróleo (ASTM D 4177).
- [22] NC-ISO 17025 Requisitos generales para la Competencia de Laboratorios de Calibración y Ensayo.
- [23] Normas ASTM *D 446 Especificaciones e Instrucciones de Operación para Viscosímetros Cinemáticos capilares de vidrio.* 2011
- [24] *ISO 3104 Productos de Petróleo Líquidos Transparentes y Opacos. Determinación de Viscosidad Cinemática y Cálculo de La Viscosidad Dinámica.*

- [25] ASTM: D 874 Método de ensayo para Cenizas Sulfatadas de Aceites Lubricantes y Aditivos.
- [26] ASTM D 4057 Práctica para Muestreo Manual de Petróleo y sus Productos.
- [27] NC ASTM D 482: 2009
- [28] NC ASTM D 4057 Industria del Petróleo. Petróleo crudo y sus derivados líquidos. Métodos de muestreo manual.
- [29] NC ASTM D 95 Método de ensayo para la determinación de agua en productos del petróleo y bitúmenes por el método de destilación.
- [30] NC ASTM D 56 Industria del petróleo-Método de Ensayo estándar para determinar el punto de inflamación por equipo TAG copa cerrada
- [31] NC ASTM D 156 Test Method for Saybolt Color of Petroleum Products (Saybolt Chromometer Method)
- [32] NC ASTM D 664 Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration
- [33] D 4739 Test Method for Base Number Determination by Potentiometric Titration
- [34] SAE J1349 (2011). Engine Power Test Code-Spark Ignition and Compression Ignition-Net Power Rating.
- [35] Dorado, M. P. (2001). Desarrollo y ensayo de nuevos biocombustibles para motores diesel precedentes de diversas semillas oleaginosas y de grasas vegetales usadas. Tesis doctoral.
- [36] J. Guedes(2004) Ensayos para la elaboración y empleo del biodiesel en Cuba”.
- [37] Xiaoyan Shi, Xiaobing Pang(2006) Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel fuel blend on a heavy-duty diesel engine.
- [38] TJimenez E,Svoljsak-jerman M, Dorado MP(2010) Physical and chemical properties of ethanol-biodiesel blends for diesel engines. Energy Fuel 2010; 24(3):2002-9.

[39]Reyes Y, Aranda DAG, Santander LAM,Cavado A (2009)Action principles of cosolvent additives in ethanol-diesel blends:stability studies. Energy Fuels 2009; 23(5):2731-5

[40] Chotwichien A, Luengnaruemitchai A, Jai-In S.(2009)Utilization of palm oil alkyl esters as an additive in ethanol-diésel blends. Fuel 2009;88(9);1618-24[41]

Kwanchareon P, Luengnaruemitchai A, Jai-In S.(2007) Solubility of a diesel-biodiesel-ethanol blend, its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. Fuel 2007; 86(7-8);1053-61.

[42] Mendosa, K, I. López,(2005) *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.

[43] M Senthil Kumar, A Ramesh,B Nagalingam. (2002) Anexperimental comparison of methods to use methanol and Jatropha oil in a compression ignition engine. Biomassas and Bioenergy 25 (2003) 309-318.

[44] P Kwanchareon, A Luengnaruemitchi. (2006) Solubility of diesel-biodiesel-ethanol blend,its fuel properties, and its emission characteristics from diesel engine. Fuel 86 (2007) 1053-1061

## Anexos

### Anexo 1: Rango de los valores característicos del diesel, emitido por CUPET.

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO				
INDICES DE CALIDAD	U/M	METODO DE ENSAYO	VALOR ESPECIFICADO	
			REGULAR	ESPECIAL
1- AZUFRE TOTAL	% m/m	ASTM D 129, D 4294, D 1552	0.80 máx	0.50 máx
2- DESTILACION: INICIAL 10 % RECOBRADO 50 % RECOBRADO 90 % RECOBRADO FINAL	°C	NC ASTM D 86	Reportar Reportar 235-300 360 máx	Reportar
3- TEMPERATURA DE INFLAMACION	°C	NC ASTM D 93	45 mín	Reportar
4- INDICE DE CETANO	-	ASTM D 4737	43 mín	
5- VISCOSIDAD A 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D 445	1.6-5.3	
6- No. DE NEUTRALIZACION	mg KOH/g	ASTM D 974	0.5 máx	
7- COLOR ASTM	-	ASTM D 1500,D 6045	3.5 máx	
8- CORROSION AL Cu, 3 h A 50 °C	-	NC ASTM D 130	1 máx	
9- CENIZAS	% m/m	ASTM D 482	0.01 máx	
10- CARBON CONRADSON	% m/m	ASTM D189,D4530	0.1 máx	
11- DENSIDAD A 15 °C	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D1298,D4052	0.815-0.865	
12- AGUA Y SEDIMENTOS	% v/v	NC ASTM D 1796,D 2709,	0.05 máx	
13- APARIENCIA	-	VISUAL	(1)	
14- PARTÍCULAS CONTAMINANTES	mg/kg	ASTM D 6217	(2)	
15- ESTABILIDAD A LA OXIDACIÓN	mg/kg	ASTM D 2274	(2)	
16- ADITIVOS (3)				

## Anexo 2

No muestra	X1 diesel %	X2 etanol %	X3 aceite %
1	80	10	10
2	70	20	10
3	60	30	10
4	50	40	10
5	40	50	10
6	30	60	10
7	20	70	10
8	10	80	10
9	10	70	20
10	20	60	20
11	30	50	20
12	40	40	20
13	50	30	20
14	60	20	20
15	70	10	20
16	60	10	30
17	50	20	30
18	40	30	30
19	30	40	30
20	20	50	30
21	10	60	30
22	10	50	40
23	20	40	40
24	30	30	40
25	40	20	40
26	50	10	40
27	40	10	50
28	30	20	50
29	20	30	50
30	10	40	50
31	10	30	60
32	20	20	60
33	30	10	60
34	20	10	70
35	10	20	70
36	10	10	80

### Anexo 3 Elaboración propia

No muestra	X1 diésel	X2 etanol	X3 aceite	Viscosidad
	%	%	%	mPa s
9	10	70	20	3,89
21	10	60	30	4,76
22	10	50	40	6,79
23	20	40	40	7,95
28	30	20	50	14,87
29	20	30	50	12,01
30	10	40	50	10,54
31	10	30	60	16,29
32	20	20	60	22,1
33	30	10	60	26,67
34	20	10	70	36,89
35	10	20	70	24,87
36	10	10	80	55,78

### Anexo 4

Propiedad	Diésel	9	21	22	23
Densidad 15°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,855	0,845	0,866	0,876	0,877
Viscosidad 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	3,873	3,079	5,725	7,016	8,518
Cenizas(% m/m)	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
Agua y sedimentos(%v/v)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Punto de inflamación(°C)	70.2	27	27	28	28
Color	3.0	0	1.5	0.5	1
Acidez	0.118	0.240	0.405	0.501	0.425

## Anexo 5

### Diesel

No	Velocidad de rotación (n, rpm)	Fuerza ejercida por el dinamómetro( $F_g$ , kg)	Consumo de comb. ( $\Delta g$ , g)	Torque ( $M_{to}$ , N-m)	Potencia efectiva ( $N_g$ , kW)	Consumo horario ( $G_c$ , kg/h)	Consumo específico ( $g_g$ , 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

### Mezcla 23

No	Velocidad de rotación (n, rpm)	Fuerza ejercida por el dinamómetro( $F_g$ , kg)	Consumo de comb. ( $\Delta v$ , v)	Torque ( $M_{to}$ , N-m)	Potencia efectiva ( $N_g$ , kW)	Consumo horario ( $G_c$ , kg/h)	Consumo específico ( $g_g$ , g/kW-h)
1	673	6.12	60	39.78	2.80	1.8	642
2	782	6.18	60	40.17	3.29	1.8	547
4	857	6.25	60	40.63	3.65	1.8	494
5	990	6.29	60	40.89	4.24	1.8	425
6	1207	6.32	72	41.08	5.19	2.16	416
7	1425	6.27	87	40.76	6.08	2.61	429
8	1435	6.18	94	40.17	6.04	2.82	467