

EL BIODIESEL DE ACEITE DE HIGUERILLA COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA MOTORES DIESEL

CASTOR OIL BIODIESEL AS AN ALTERNATIVE FUEL FOR DIESEL ENGINES

ALIRIO BENAVIDES

Grupo Combustibles Alternativos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, aybenavi@unalmed.edu.co

PEDRO BENJUMEA

Grupo Combustibles Alternativos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, pbenjume@unalmed.edu.co

VESELINA PASHOVA

Grupo Combustibles Alternativos, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, vpashova@unal.edu.co

Recibido para revisar agosto 23 de 2006, aceptado febrero 09 de 2007, versión final marzo 29 de 2007

RESUMEN: En este artículo se presenta un estudio experimental sobre la producción y utilización del biodiesel de aceite de higuera. El máximo rendimiento de metilésteres en la reacción de transesterificación del aceite de higuera usado se obtiene bajo las siguientes condiciones: temperatura ambiente, una relación molar metanol/aceite de 9 y una concentración de catalizador de 0.8%. El biodiesel de aceite de higuera puede ser mezclado con el combustible diesel convencional derivado del petróleo en proporciones hasta del 15%, sin que la mezcla resultante se salga de las especificaciones de calidad estipuladas en los estándares nacionales e internacionales para combustibles diesel. La mayor dificultad para el uso del biodiesel de aceite de higuera en motores es su alta viscosidad. Sin embargo este biocombustible presenta excelentes propiedades de flujo a baja temperatura (valores bajos para los puntos de nube y fluidez). Las pruebas en motor con mezclas biodiesel de higuera/diesel convencional, en el rango de proporciones de biodiesel ensayadas, muestran que a medida que se incrementa la proporción de biodiesel en la mezcla aumenta el consumo específico de combustible, disminuye el dosado relativo, la opacidad de humos se disminuye levemente, mientras que el rendimiento efectivo y las emisiones de CO y CO₂ prácticamente permanecen constantes.

PALABRAS CLAVE: aceite de higuera, biodiesel, transesterificación.

ABSTRACT: In this paper, a study related to the production and use of castor oil biodiesel is presented. The maximum methyl esters yield of the castor oil transesterification reaction is obtained under the following conditions: ambient temperature, a molar ratio of methanol to vegetable oil equal to 9 and a catalyst percentage equal to 0.8%. The castor oil biodiesel can be blended with petroleum diesel as far as 15% in such way that the resulting blend complies with national and international technical standards for diesel fuels. Its high viscosity becomes the main difficulty for using castor oil biodiesel in engines. However this biofuel exhibits excellent cold flow properties (low values of cloud and pour points). The motor tests using castor oil biodiesel/petroleum diesel blends, for the biodiesel proportion tested, show that a biodiesel percentage increase leads to an increase in the specific fuel consumption, a decrease in the fuel/air ratio, a slight decrease in smoke opacity, while the fuel conversion efficiency and the CO and CO₂ emissions practically remain constants.

KEYWORDS: castor oil, biodiesel, transesterification.

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación general por el carácter no renovable de los combustibles fósiles y la alta participación del sector transporte en el consumo total de energía primaria y en la contaminación atmosférica urbana, se han

convertido en las fuerzas jalonadoras que están impulsando la investigación mundial sobre combustibles alternativos para motores, especialmente aquellos derivados de la biomasa.

En lo referente a motores diesel, el biodiesel, dadas las ventajas técnicas, estratégicas y ambientales que ofrece, constituye la mejor alternativa para sustituir parcial o totalmente al combustible diesel derivado del petróleo. El biodiesel se obtiene mediante la reacción de un aceite vegetal o grasa animal con un alcohol de bajo peso molecular en presencia de un catalizador.

La clave de la economía de la producción del biodiesel se encuentra en las materias primas utilizadas. El reto para cualquier país o región consiste en la implementación de procesos de producción basados en materias primas con disponibilidad local. Dichos procesos se deben optimizar con el objetivo de obtener un biocombustible con un costo de producción competitivo, y que además posea una calidad adecuada. En Colombia se han realizado varias investigaciones, a nivel de laboratorio y planta piloto, con el fin de obtener biodiesel a partir de diversas materias primas, tales como aceite de palma, aceite de higuera, aceites fritos y subproductos de la industria avícola [1-4].

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio relacionado con la obtención en laboratorio de biodiesel de aceite de higuera mediante metanolisis básica y su utilización, mezclado en diferentes proporciones con el combustible diesel convencional, en un motor diesel instalado en un banco de ensayos.

El aceite de higuera pertenece al grupo de materias primas consideradas estratégicas para la producción de biodiesel en el país, de acuerdo con el proyecto *Transición de la Agricultura* del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se realizó en dos fases. La primera de ellas incluye la caracterización de la materia prima, el proceso de producción del biodiesel y la determinación de las principales propiedades del biocombustible obtenido. En la segunda fase se estudian aspectos del comportamiento mecánico y ambiental de un motor diesel instalado en un banco de ensayos, funcionando con mezclas de biodiesel de aceite de higuera y un combustible diesel corriente adquirido en una estación de servicio.

2.1 Obtención del Biodiesel

2.1.1 Caracterización de la materia prima

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, triestearina 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 [5]. La caracterización del aceite de higuera fue realizada en la Laboratorio de Crudos y Derivados de la Facultad de Minas. Para ello se le determinaron sus principales propiedades físicas e índices característicos de acuerdo con las normas ASTM correspondientes.

2.1.2 Proceso de producción de biodiesel

El biodiesel fue obtenido mediante la transesterificación del aceite de higuera con metanol (metanolisis) utilizando NaOH como catalizador. El aceite de higuera fue facilitado por Proquimcol S.A. El metanol y el hidróxido de sodio fueron facilitados por Interquim S.A. 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. Como productos de la reacción se obtuvieron metilésteres de los ácidos grasos presentes en el aceite de higuera (biodiesel) y glicerol. La separación de las fases metilésteres y glicerol se realizó en un embudo de decantación durante un lapso de 24 horas. Para facilitar la separación de dichas fases se agregó agua en el decantador. La fase metilésteres una vez separada se sometió a un proceso de lavado utilizando una cantidad de agua igual al volumen del fluido a lavar. El

agua se agregó por la parte superior del recipiente contenedor previamente pulverizada. Este método de lavado presentó menos problemas relacionados con la formación de emulsiones que el método de burbujeo con aire recomendado en trabajos previos con otros tipos de biodiesel [6-7]. El secado del biodiesel se llevó a cabo por evaporación del agua remanente. El tiempo de secado fue fijado en 15 minutos.

Al biodiesel obtenido y a las diferentes mezclas biodiesel-diesel convencional preparadas, se le determinaron sus principales propiedades como combustibles de acuerdo con las normas ASTM D-975 e ICONTEC 1438.

2.2 Utilización del Biodiesel

El biodiesel obtenido mezclado con diesel convencional, fue probado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia en un motor monocilíndrico de encendido por compresión acoplado a un freno dinamométrico. En la figura 1 se muestra un esquema del banco de ensayos.

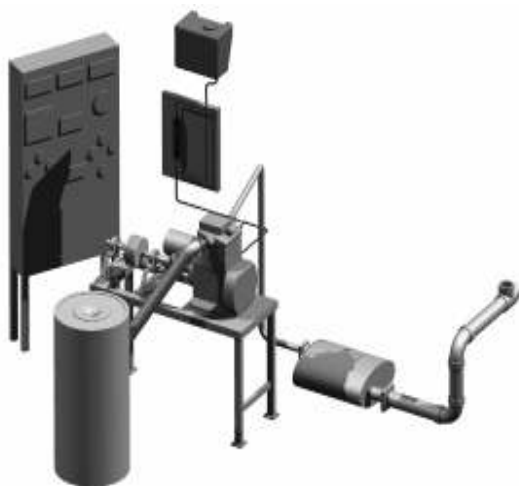


Figura 1. Esquema del banco de ensayos
Figure 1. Test bed scheme

En la tabla 1 se presentan las principales especificaciones técnicas del motor utilizado. En la Tabla 2 se presentan las variables mecánicas y ambientales medidas y los dispositivos con los cuales se llevo a cabo la medición.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor
Table 1. Engine technical specifications

Especificación	Magnitud
Referencia	HATZ D-94099 TIPO E673R47
Número de cilindros	1
Ciclo	4 tiempos Diesel
Refrigeración	Por Aire
Suministro combustible	Inyección Directa
Diámetro de pistón	73mm
Carrera	67mm
Cilindrada	280cm ³
Peso	~40kg
Presión de inyección	135+8Bar

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Obtención del Biodiesel

Las principales variables que influyen en el rendimiento, conversión y cinética de la reacción de transesterificación son la calidad de la materia prima, el tipo y cantidad de catalizador, el tipo de alcohol, la relación molar alcohol/aceite y las condiciones de reacción como temperatura, presión y agitación [8-10].

El objetivo de este estudio experimental fue la optimización de la metanólisis básica del aceite de higuera. A continuación se identifican las variables que fueron bloqueadas y aquellas cuyo efecto individual y combinado se quiso analizar. La calidad del aceite, la velocidad de agitación, la presión y el tiempo de reacción fueron mantenidos constantes. La temperatura influye en la cinética de la reacción. Un valor alto de esta variable puede ser negativo, ya que puede afectar el rendimiento de metilésteres al promover la reacción de saponificación de los triglicéridos o de la fase biodiesel a medida que se forma [11]. El metanol suele ser el alcohol preferido en la producción de biodiesel por razones técnicas y económicas [12]. Una vez fijado el tipo de alcohol, la variable de interés es la cantidad de este reactivo a utilizar, la cual se expresa como relación molar metanol/aceite (RMA). Tal relación indica el exceso de alcohol a utilizar en la reacción. Para las condiciones estequiométricas, cero exceso de alcohol, el valor de dicha variable es tres. Para este estudio experimental se seleccionó como catalizador el hidróxido de sodio, NaOH, por ser el más económico.

Tabla 2. Instrumentación del banco de ensayos
Table 2. Test bed instrumentation

Parámetros Mecánicos				
Variable Efectiva a Medir	Instrumento de Medición	Marca	Rango	Precisión
Caudal de Aire	Flujómetro de Turbina	ELSTER	2-25m ³ /h	0.01m ³ /h
Caudal de Combustible	Bureta Graduada	PYREX	0-500ml	10ml
Fuerza	Celda de Carga	UTILCELL	0-50000g	10g
Temperatura	Termopar Tipo K	SHIMADEN	-40-1250°C	1°C
Régimen de Giro	Sensor de Proximidad	GIACOMO PATRONE	0-6000rpm	200 rpm
Parámetros Ambientales				
Monóxido de Carbono	Analizador NDIR	MAIHAK	0-5% Volumen.	5% de Lectura
Dióxido de Carbono	Analizador NDIR	MAIHAK	0-5% Volumen.	5% de Lectura
Opacidad de Humos	Opacímetro	GALIO	0-100%	2%

Teniendo fijo el tipo de catalizador, la variable de análisis más relevante es la cantidad utilizada de éste. Tal cantidad se expresa comúnmente como porcentaje por peso con respecto a la masa de aceite utilizada. Cuando se usa una materia prima conteniendo ácidos grasos libres (AGLs), en el cálculo de la cantidad de catalizador (CC) que efectivamente se debe utilizar, hay que tener en cuenta la cantidad adicional de base fuerte que se consume en la neutralización de los AGLs.

Como variable respuesta se seleccionó el rendimiento final de metilésteres, el cual se puede expresar como la relación entre la masa de biodiesel purificado obtenida y la masa de aceite original.

Los valores para los niveles de los factores en estudio, CC, RMA y Temperatura, fueron seleccionados de acuerdo con una serie de preensayos llevados a cabo con el fin de constatar la viabilidad de la reacción bajo tales condiciones. En la tabla 3 se muestran los valores definitivamente seleccionados para los niveles de los factores en estudio. El diseño experimental ejecutado fue un diseño factorial 3³ con dos réplicas.

La figura 2 muestra los resultados experimentales del rendimiento del proceso de obtención del biodiesel del aceite de higuera para las diferentes combinaciones de las variables.

Tabla 3. Factores y niveles del diseño experimental. Producción de biodiesel
Table 3. Factors and levels of the experimental design. Biodiesel production

Factor	Nivel Inferior	Nivel Medio	Nivel Superior
CC (% por peso)	0.8	1.4	2.0
RMA (mole/mole)	9:1	12:1	15:1
Temperatura	Ambiente	35°C	50°C

De acuerdo con un análisis de varianza (tabla Anova) se pudo constatar que los tres factores tenidos en cuenta tienen influencia sobre el rendimiento del proceso, siendo más significativo el efecto de la cantidad de catalizador, luego la temperatura y por último el exceso de alcohol.

Mediante análisis de medias se encontró que el punto óptimo que permite el máximo rendimiento de la reacción corresponde a los niveles inferiores considerados.

Para valores de RMA y de CC inferiores a 9 y 0.8%, respectivamente, la reacción no transcurre. Valores altos de CC promueven la formación de geles, mientras que valores altos de la temperatura promueven la reacción secundaria de saponificación de los triglicéridos o de los metilésteres a medida que son producidos.

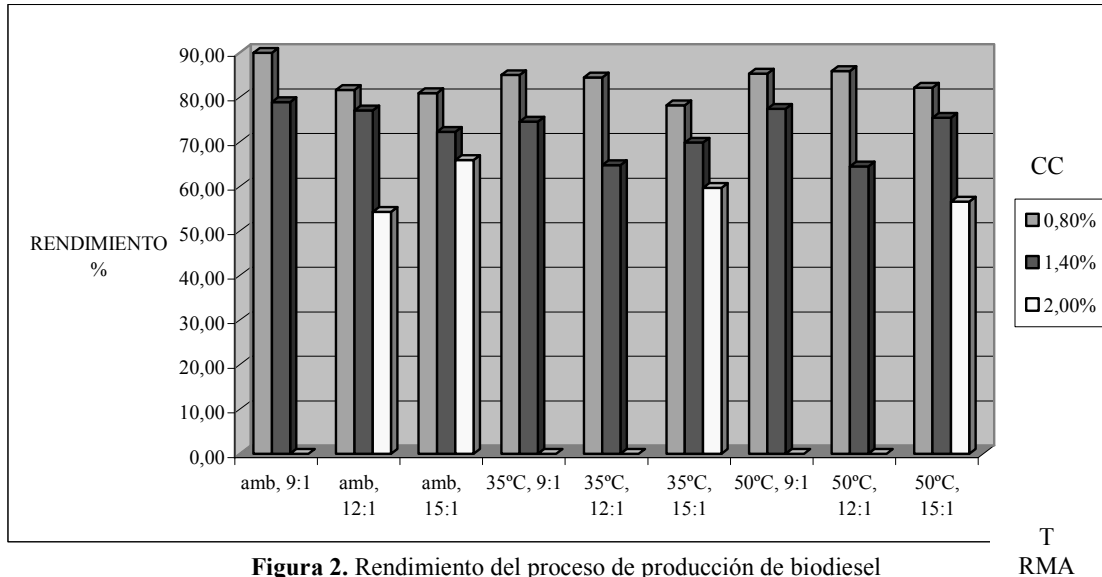


Figura 2. Rendimiento del proceso de producción de biodiesel

Figure 2. Biodiesel production process yield

3.2 Caracterización Materia Prima Y Combustibles Utilizados

En la tabla 4 se muestran las principales propiedades del aceite de higuerilla y se comparan algunos de los valores obtenidos con valores típicos reportados en la literatura. [5].

En la tabla 5 se contrastan las propiedades del biodiesel de aceite de higuerilla con las de un combustible diesel convencional adquirido en una estación de servicio y con las especificaciones para combustibles diesel contempladas en las normas ASTM D-975 e ICONTEC NTC 1438.

En dicha tabla, adicionalmente, se presentan las propiedades de las mezclas biodiesel-diesel denominadas B5, B15, B30 y B60. En dicha denominación el número indica el porcentaje de biodiesel en la mezcla.

El valor del poder calorífico del biodiesel puro presenta una disminución cercana al 17.5% con respecto al diesel corriente. Tal diferencia se reduce a un 11.7% cuando dicha propiedad se expresa en unidades de energía por unidad de volumen, dada la mayor densidad del biodiesel.

Tabla 4. Principales propiedades del aceite de higuerilla
Table 4. Main properties of castor oil biodiesel

Propiedad	Unidades	Estándar ASTM	Resultado	Valor típico
Densidad	g/cm ³	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 ² /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

Tabla 5. Comparación propiedades entre el biodiesel de higuerilla, diesel corriente y mezclas preparadas
Table 5. Properties comparison among castor oil biodiesel, conventional diesel and prepared blends

Análisis	B100	B60	B30	B15	B5	Diesel	Especificación ASTM D-975	
							Min.	Máx.
Agua por Destilación, % por volumen	0.8	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	N/A (No Aplica)	
Cenizas, % por peso	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		0.01
Color Saybolt	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5		3.0
Corrosión Lámina Cobre	1A	1A	1A	1A	1A	1A		2.0
Destilación (T en °C)								
Punto Inicial de Ebullición	204.3	191.1	190.1	171.8	174.9	182.0	Reportar	
50% recobrado	333.3	327.2	319.1	299.8	298.8	297.8		300
90% recobrado	345.5	347.5	352.6	350.6	354.6	357.7		360
Punto Final de Ebullición	353.6	351.6	362.8	362.8	372.9	380.0		390
Densidad a 60°F (kg/m ³)	926.05	901.85	882.17	871.30	868.63	865.97	Reportar	
Índice de Cetano	38.0	45.0	49.0	50.5	51.0	50.0	45	
Poder Calorífico, MJ/kg	37.52	40.0	42.95	44.2	45.01	45.43	N/A	
Punto de Inflamación, °C	84.3	64.3	64.3	62.3	62.3	62.3	52	
Punto de Fluidez, °C	-18.0	-12.0	-13.0	-18.0	-14.0	-14.0		4
Punto de Nube, °C	-4.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	N/A	
Residuo Carbonoso, % por peso	<0.05	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		0.2
Viscosidad Cinemática a 40 °C, mm ² /s	14.89	8.75	6.11	5.02	4.79	4.66	1.9	5.0

Las principales deficiencias de calidad del biodiesel de aceite de higuerilla obtenido son su bajo índice de cetano y su alta viscosidad. Hay que tener en cuenta que el índice de cetano aquí reportado se calculó utilizando una correlación que en principio es recomendada para combustibles tipo hidrocarburo. De otro lado, el biodiesel de aceite de higuerilla posee puntos de nube y fluidez que le dan ventajas para su uso a bajas temperaturas

Las propiedades particulares del biodiesel de aceite de higuerilla están muy ligadas a su naturaleza química. Tal biocombustible posee un alto contenido de metilésteres del ácido ricinoleico, el cual es de carácter insaturado (presenta un enlace doble en su estructura). Adicionalmente el ácido ricinoleico, a diferencia de los otros ácidos carboxílicos comúnmente presentes en los aceites vegetales, posee un grupo hidróxilo en su estructura que le confiere su alta viscosidad.

Un bajo valor del índice de cetano significa baja calidad de ignición de un combustible diesel y puede conducir al fenómeno

denominado “golpeteo diesel” que se presenta por un pico de presión consecuencia de un alto tiempo de retardo en el inicio de la combustión. Un combustible con alta viscosidad no será pulverizado adecuadamente por los sistemas de inyección que poseen los motores diesel de inyección directa modernos. Las mezclas B60 y B30, aunque cumplen con la especificación del índice de cetano poseen valores de la viscosidad por fuera del rango recomendado en las normas. Con las mezclas B15 y B5, las cuales cumplen especificaciones, es de esperar un funcionamiento adecuado en los motores que las utilicen.

3.3 Utilización del Biodiesel

Las condiciones de régimen de giro y par se fijan en el banco de ensayos con la ayuda del acelerador y del freno dinamométrico. Su producto es la potencia del motor, la cual se debe seleccionar procurando reproducir las condiciones más típicas a las que se encuentra sometido un motor de automoción en ruta. Este método presenta la ventaja de proporcionar

datos estadísticamente confiables y muy repetitivos [1].

Para el análisis de los parámetros mecánicos y ambientales que determinan el desempeño del motor se realizó un diseño experimental factorial, en el cual, los factores a variar son la composición del combustible (% de biodiesel en la mezcla) y el modo de operación o grado de carga del motor (caracterizado por un régimen de giro y una potencia dadas). La

tabla 6 muestra en detalle los factores y niveles del diseño experimental.

Combinando los diferentes modos de operación y tipos de combustible se obtiene la matriz de ensayos que indica las combinaciones posibles para la realización del análisis. Cada combinación se llevo a cabo con dos réplicas calculadas para obtener una confiabilidad del 95% en el diseño experimental planteado.

Tabla 6. Factores y niveles del diseño experimental. Utilización del biodiesel
Table 6. Factors and levels of the experimental design. Biodiesel Utilization

Factor	Característica nivel			Designación nivel
Combustible	Diesel Común			B0
	Diesel común 95% - Biodiesel 5%			B5
	Diesel común 85% - Biodiesel 15%			B15
	Diesel común 70% - Biodiesel 30%			B30
Modo de operación	Régimen de giro (rpm)	Fuerza (kg)	Potencia (kW)	
	1800	0.5	0.22	1
		1.0	0.45	2
		1.5	0.67	3
		2.0	0.90	4

Los parámetros mecánicos se refieren a la operación intrínseca del motor, evaluada desde el punto de vista de las magnitudes de lo que se entrega como trabajo útil, lo que se requiere para su movimiento (consumos) y la energía que se desperdicia como consecuencia de su funcionamiento. En este trabajo solo se tuvieron en cuenta los denominados parámetros efectivos, o sea, aquellos que se obtienen en el eje del motor [13]. Entre tales parámetros se analizan: el consumo específico de combustible (*gef*), el rendimiento de conversión de combustible o rendimiento efectivo (η_e) y el dosado relativo (*FR*). Los parámetros ambientales tenidos en cuenta fueron la opacidad de humos y las emisiones de monóxido y dióxido de carbono.

3.3.1 Rendimiento efectivo (η_e)

Este parámetro indica la proporción de energía que realmente se aprovecha, partiendo de toda la que puede suministrar el combustible por unidad de masa. La figura 3 muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento efectivo del motor, en otras palabras, la proporción entre la cantidad de energía suministrada al motor y la energía útil obtenida del mismo se conserva al utilizar los

diferentes combustibles. La máxima variación en el rendimiento efectivo se da entre los combustibles B5 y B15 siendo del 3.21%.

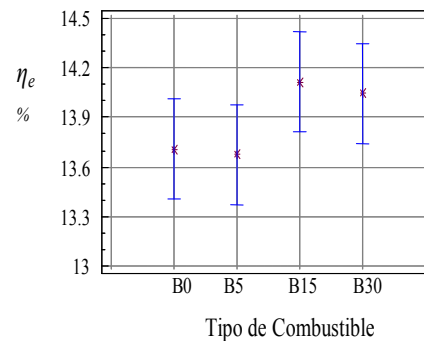


Figura 3. Variación del rendimiento efectivo con el tipo de combustible

Figure 3. Variation of efficiency with fuel type

3.3.2 Consumo específico de combustible

Este parámetro se define como la relación entre la masa de combustible utilizada y la potencia efectiva generada. Representa el aprovechamiento que se da al combustible para obtener potencia, de tal forma que la idea es obtener siempre el menor *gef* posible. La figura 4 ilustra la variación del *gef* con la proporción

de biodiesel en la mezcla para los diferentes modos de funcionamiento del motor. Dicha tendencia corresponde con la reportada ampliamente en la literatura para diferentes clases de biocombustibles [14]; e indica que para una misma potencia, el *gef* aumenta con el incremento de biodiesel en la mezcla. Este aumento es una consecuencia del menor poder calorífico volumétrico que posee el biodiesel con respecto al combustible diesel derivado del petróleo.

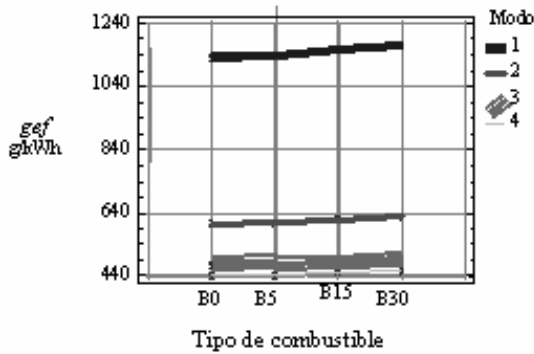


Figura 4. Variación del *gef* con el tipo de combustible y el modo de operación
Figure 4. Variation of *gef* with fuel type and operation mode

3.3.2 Dosado relativo (FR)

El *FR* es la relación entre el dosado absoluto o real (F_a) y el estequiométrico (F_{stq}). El dosado se define como la razón entre las tasas máxicas de combustible y de aire que se usan durante la combustión de cualquier carburante, sea quemado en condiciones estequiométricas (ideales) o fuera de estas. El *FR* indica si la combustión se realiza con exceso de aire o con defecto. En motores diesel el *FR* siempre debe ser inferior a 0.7 (mezcla ligeramente pobre).

De la figura 5 se observa que al incrementar el porcentaje de biodiesel en la mezcla, el *FR* disminuye. Esto se debe al aporte extra de oxígeno molecular del biodiesel. Así, el aumento en la proporción de biodiesel demanda cada vez menos aire atmosférico para efectuar la combustión. La figura 4 también ilustra la influencia que tiene el modo de operación sobre el *FR*. Claramente, a medida que aumenta la demanda sobre el motor por el incremento en la carga, el gasto de combustibles es mayor y con ello, el *FR* se hace mayor.

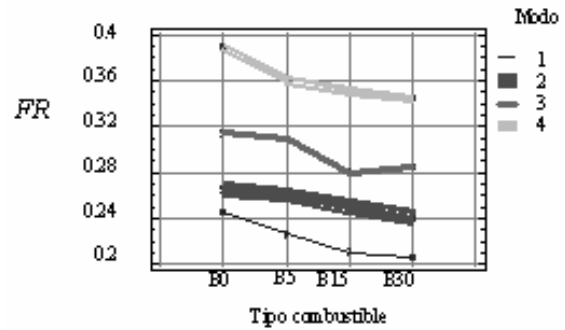


Figura 5. Variación del dosado relativo con el modo de operación y el tipo de combustible
Figure 5. Variation of equivalent ratio with operation mode and fuel type

3.3.3 Monóxido de carbono

De acuerdo con el análisis de varianza, el grado de carga y el tipo de combustible no tienen una influencia estadísticamente significativa sobre el comportamiento de las emisiones de monóxido de carbono. No obstante en la figura 6 se observa una ligera tendencia ascendente para las emisiones de CO con el aumento en la carga sobre el motor; situación razonable por el incremento del gasto de combustible. Las variaciones en el porcentaje de CO son pequeñas y analizar con más detalle este parámetro, requiere de dispositivos de mayor precisión.

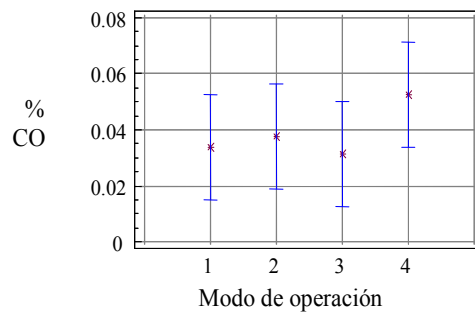


Figura 6. Variación de las emisiones de CO con el modo de operación
Figure 6. Variation of the CO emissions with operation mode

Con respecto al tipo de combustible, el porcentaje de CO no tiene variaciones significativas. En general las emisiones de CO no son un problema en la combustión diesel debido a los altos excesos de aire (bajos dosados relativos) que se utilizan.

3.3.4 Dióxido de Carbono

De acuerdo con la figura 7, las variaciones de las emisiones de CO₂ con el combustible y con el modo de operación siguen una tendencia muy similar a las presentadas con el CO. Dichas emisiones se incrementan con el grado de carga y no se ven muy afectadas con el tipo de combustible.

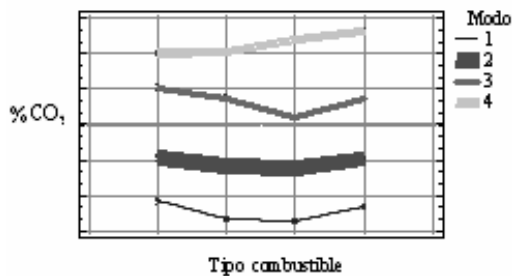


Figura 7. Variación de las emisiones de CO₂ con el modo de operación y el tipo de combustible

Figure 7. Variation of CO₂ emissions with operation mode and fuel type

3.3.4 Opacidad de Humos (OH)

La figura 8 muestra que el modo de operación tiene un efecto significativo sobre la opacidad de los humos ya que dicho parámetro ambiental es proporcional a la carga.

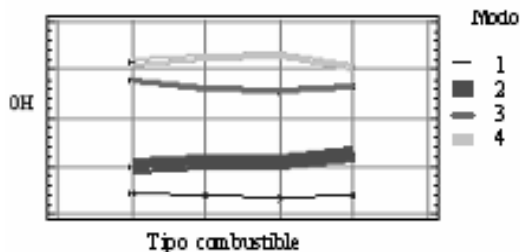


Figura 8. Variación de la opacidad de humos con el modo de operación y el tipo de combustible

Figure 8. Variation of smoke opacity with operation mode and fuel type

En lo que respecta al tipo de combustible, es de esperarse que al incrementarse la proporción de biodiesel en la mezcla se presente una disminución considerable en la opacidad de los humos, dado que se está usando un combustible oxigenado y prácticamente libre de azufre. Sin embargo, tal tendencia no se ve

bien marcada en los resultados experimentales ilustrados en la figura 8. Por el contrario, con la mezcla B30, en la mayoría de los modos de operación, se observan ligeros incrementos en la opacidad de humos con respecto a cuando se usa combustible diesel puro. Tal comportamiento anómalo puede ser debido a la alta viscosidad de la mezcla B30 que puede ocasionar una mala atomización del combustible.

3. CONCLUSIONES

- Las condiciones que permiten obtener los mayores rendimientos de biodiesel de aceite de higuera mediante metanolisis básica son temperatura ambiente (25°C), una relación metanol/aceite de 9 y un porcentaje de 0.8% en peso de NaOH. El hecho de que la reacción transcurra a temperatura ambiente es muy ventajoso ya que implica una reducción importante en los costos de producción.
- El biodiesel obtenido presenta ventajas en sus propiedades de flujo a baja temperatura como los puntos de nube y fluidez. Sin embargo, su alta viscosidad y bajo número de cetano limitan su aplicación en motores de automoción. Con mezclas hasta B15, el producto resultante cumple con las especificaciones de calidad contempladas en los estándares para combustibles diesel.
- El consumo específico de combustible (*gef*) en el motor aumenta con el porcentaje de biodiesel de higuera en la mezclas biodiesel/diesel. Si en una aplicación dada se quiere conservar el *gef*, esto se logra a expensas de disminuir la potencia. Ambas variaciones se dan en la misma proporción en la que varía el poder calorífico de la mezcla ensayada.
- El rendimiento efectivo del motor no se ve afectado con el uso del biodiesel de aceite de higuera. Para mantener la misma potencia en el eje es necesario consumir más biodiesel, sin embargo este tiene menor poder calorífico, por lo que finalmente la relación entre las energías a la salida y a la entrada es la misma que para el combustible diesel.

- En las proporciones en que se utilizaron las mezclas biodiesel/diesel en el motor no se alcanzaron a observar diferencias estadísticamente significantes en las emisiones de CO y CO₂. En lo que respecta a la opacidad de los humos se encontró que este parámetro disminuye con el porcentaje de biodiesel de higuierilla en la mezcla, no obstante las reducciones no son de la misma magnitud que las obtenidas con otros tipos de biodiesel, como el proveniente del aceite de palma.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las siguientes entidades:

- La dirección de investigaciones de la Universidad de Colombia Sede Medellín.
- Laboratorio de Crudos y Derivados de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Laboratorio de Maquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia.

REFERENCIAS

- [1] AGUDELO, J. R., BENJUMEA, P. Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: Aspectos de su obtención y utilización. Universidad de Antioquia. 2004.
- [2] BENAVIDES, A. Y. Biodiesel de aceite de higuierilla. Una evaluación de su obtención y utilización. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2004.
- [3] BARAJAS, C. L. Obtención de biodiesel a partir de la higuierilla (*ricinus communis*). 1^{er} Seminario Internacional de Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. 2004.
- [4] CORTES, J. Producción de biodiesel a partir de subproductos de la industria avícola. Megaproyecto para el futuro. 1^{er} Seminario Internacional de Biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá. 2004.
- [5] GOERING, C. E. et al. Fuel properties of eleven vegetable oils. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Vol. 25. 1982. Pág.1472 – 1483.
- [6] PÉREZ, J. F.; GÓMEZ, E. Caracterización del comportamiento mecánico y ambiental del éster metílico de aceite de palma, utilizado como combustible para motores diesel. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2003.
- [7] ZAPATA, P. A., MENDOZA, R. E. Obtención de un biocombustible mediante la transesterificación de aceite de palma con metanol. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2003.
- [8] BENJUMEA, P., AGUDELO, J. R., ZAPATA P., MENDOZA, R. Biodiesel: Una revisión del proceso de obtención mediante la transesterificación de aceites vegetales. *Revista Energética*. No. 29. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 2003. pp 9-18.
- [9] FREEDMAN *et al.*, Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils". *JAACS*, Vol. 61, No. 10. 1984. pp 1638-1643.
- [10] MA, F., HANNA, M. Biodiesel Production: A Review. *Bioresource Technology*, No. 70. 1999. pp 1-15.
- [11] VICENTE, G., *et al.* Biodiesel: una alternativa real al gasoleo mineral. *Ingeniería Química*, 2001. pp. 135-145.
- [12] KNOTHE, G., VAN GERPEN, J. KRAHL, J. The Biodiesel Handbook. AOCS Press. Campaign Illinois. 2005.
- [13] HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill. New York. 1988.
- [14] GRABOSKY, M., MCCORMICK, R. Combustion of Fat and Vegetable Oils Derived Fuels in Diesel Engines. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 24. 1998. pp 125-164.