

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE MANERA CONTINUA

CARLOS ALIRIO DÍAZ GONZÁLEZ

*Ingeniero Mecánico UIS.
carlosdiaz_13@yahoo.com*

NÉSTOR A. LÓPEZ

*Ingeniero Mecánico UIS.
email: lopbar@yahoo.es*

OMAR A. GÉLVEZ AROCHA

*Magister en Informática, UIS
Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica
Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente, GIEMA
Universidad Industrial de Santander
ogelvez@uis.edu.co*

JORGE LUIS CHACÓN VELASCO

*Doctor en Ingeniería, UPV, España.
Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica
Director del Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente, GIEMA
Universidad Industrial de Santander
jchacon@uis.edu.co; jchaconvelasco@gmail.com*

Fecha de Recibido: 31/08/2007

Fecha de Aprobación: 30/05/2008

RESUMEN

Este trabajo desarrolla un sistema piloto para producción de biodiesel y su futura implementación a nivel regional y nacional. En este estudio, los más importantes parámetros en la producción y calidad del biodiesel fueron determinados preliminarmente y así conocer la relación molar aceite-alcohol y la cantidad de catalizador necesarias. Una vez estos valores fueron obtenidos, la planta piloto fue construida y la producción a una mayor escala y sus pruebas de desempeño en motores fueron efectuadas. Estas pruebas resultaron satisfactorias en lo concerniente a potencia, torque consumo y emisiones contaminantes y concuerdan con resultados que han sido obtenidos en experiencias nacionales e internacionales.

PALABRAS CLAVES: Biodiesel, Biocombustibles, Motores de combustión interna, Reducción de emisiones, Consumo de combustible.

ABSTRACT

This work develops a pilot system for biodiesel production and its future implementation at regional or national

level. In this research, the most important parameters in the production and quality of biodiesel were determined preliminarily and they turned out to be the alcohol-oil molar relation and the necessary amount of catalyst. Once these values were obtained, the pilot plant was built and greater scale production and quality test took place. These tests produced satisfactory results concerning power, torque, consumption and polluting emissions, and are very related to the results that have been obtained in other works with biodiesel at national and international level.

KEYWORDS: Biodiesel, Biofuels, Internal Combustion Engines, Reduced Emissions, Fuel Consumption

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos treinta años la evolución de los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA) para aplicaciones automotrices, ha sido influenciada en gran parte, por el ahorro energético y las nuevas legislaciones medioambientales en torno a las emisiones contaminantes. Un paso en la obtención de este logro se está dando en la actualidad con los llamados “*Biocombustibles*” y, en el caso de este trabajo de investigación, con el “*biodiesel*”. Este biocombustible se caracteriza especialmente por los beneficios ambientales que su uso genera. Estas ventajas ecológicas son un factor que ha hecho de su uso en automóviles algo necesario en los países con legislación ambiental estricta, principalmente de Norte América, Europa y Asia y, en menor proporción, en el resto del mundo [1].

En el ámbito internacional el MPOB (Malaysian Palm Oil Board) posee varias patentes para la producción de metilesteres de aceite crudo de palma, estearina y oleína de palma y aceite crudo de palmiste. El interés por la investigación en Malasia sobre el biodiesel se inició en la década de 1980 debido a la alta producción de aceite de palma, la caída de los precios internacionales del mismo hasta el año 2000, y el desarrollo de la industria química Malaya [1].

En el ámbito nacional el estudio más significativo sobre la obtención de biodiesel a partir de aceite de palma fue realizado en conjunto por la Universidad de Antioquia y la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en donde se ha trabajado en la optimización del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite crudo de palma bajo la financiación de COLCIENCIAS y la empresa Interquim S.A. [1], [2]. Los resultados de ese trabajo han servido como referencia para las pruebas experimentales realizadas en este estudio.

La norma ASTM D6751 describe al biodiesel como cadenas largas de esteres de ácidos grasos provenientes de grasas animales o vegetales, de forma que una molécula de alcohol este unida con un ester [3].

El proceso más usado para la obtención del biodiesel es la transesterificación y es el proceso mediante el cual los triglicéridos de los aceites vegetales y animales se transforman en las largas cadenas antes mencionadas que también reciben el nombre de metilesteres de ácidos grasos o FAME (Fatty acid methyl esters). En este proceso se hace necesaria la presencia de un catalizador, generalmente hidróxido de sodio NaOH o soda cáustica, que haga posible la reacción de transesterificación sin tener que alcanzar condiciones extremas de presión y temperatura.

La materia prima para este proceso, por consiguiente, es aceite vegetal, alcohol metílico y un catalizador. Para el proceso descrito en este trabajo se utilizó aceite de palma refinado ya que el aceite crudo de palma presenta dos fracciones: la oleína (fracción líquida) y la estearina (fracción sólida), cada una de ellas con propiedades y usos alimenticios diferentes y este caso, la oleína, como fracción líquida es la indicada para realizar el proceso de transesterificación [4],[5]. Adicionalmente es un cultivo que en el ámbito regional es una importante fuente de empleo.

Durante el desarrollo del trabajo se cubrieron tres fases: 1) Fase experimental preliminar para la conversión, 2) Desarrollo de la planta piloto, 3) Pruebas experimentales en Motores de Combustión Interna (MCI).

2. FASE EXPERIMENTAL PRELIMINAR

Para este trabajo se utilizó un reactor tipo CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor), como su nombre lo indica este reactor se encuentra bajo constante agitación, con una temperatura controlada, además de alimentación de reactivos y salida de productos de forma continua.

El montaje experimental para estudiar la reacción de transesterificación para la obtención de biodiesel está constituido por los siguientes componentes: *Reactor, agitador, control de temperatura, decantador, lavador y purificador.*

En la **Figura 1** se muestra el montaje experimental inicial que se utilizó.

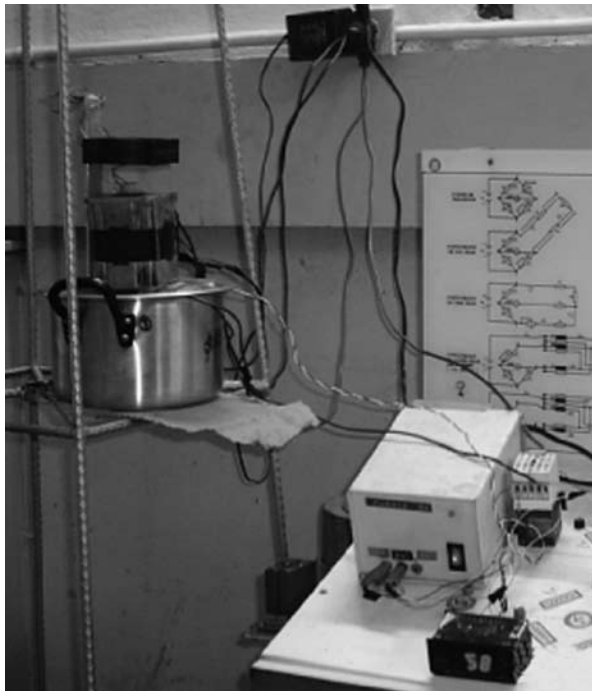


Figura 1. Montaje experimental

Es necesario determinar las variables que más afectan la reacción de transesterificación y cuales no afectan significativamente el proceso. Las variables que casi no afectan el proceso son: Presión, material del reactor y resistencia eléctrica, y el tiempo de reacción, si éste es mayor de 75 minutos [5], [6].

Las variables que afectan principalmente la reacción son:

- **Calidad de materia prima.**
En este trabajo se selecciono oleina de palma que a diferencia del aceite crudo de palma es homogéneo, lo cual evita la aparición de estearina que es otra fase del aceite crudo de palma. La cantidad usada en la fase experimental fue de 1 litro para todas las pruebas realizadas.
- **Tipo y cantidad de alcohol.**
El alcohol seleccionado fue el metanol, ya que es el más utilizado en el mundo para la producción de biodiesel. Esta variable se expresa como la relación molar alcohol / aceite de palma (RMA)
- **Tipo y cantidad de catalizador.**
El catalizador seleccionado fue hidróxido de sodio (NaOH) o “soda cáustica” por ser el más utilizado y el más económico en la industria.
- **Condiciones de reacción.**
Para la fase experimental se tomo un rango de temperatura de 56 – 58 °C, una temperatura menor a

la temperatura de ebullición del alcohol utilizado en este estudio.

- **Índices de calidad del proceso.**
Para determinar la calidad del proceso se tomaron los siguientes índices:
(a) El porcentaje (%) de conversión del aceite vegetal a biodiesel, expresado como la relación entre el volumen original de aceite y el volumen de biodiesel purificado obtenido.
(b) La viscosidad cinemática expresada en mm²/s que según los estándares internacionales del biodiesel debe ser de un máximo de 6 mm²/s. Estas pruebas se efectuaron bajo la norma ASTM D88.
(c) Los puntos iniciales y finales de ebullición determinados bajo la norma ASTM D86 que según los estándares, para el punto máximo de ebullición debe ser máximo de 360°C.
(d) El Índice de Cetanos(IC), estimado según la norma ASTM D976. Según las especificaciones internacionales para el biodiesel este índice debe ser de mínimo 47.

El proceso seguido fue el siguiente: Una vez determinados el porcentaje de conversión de cada prueba, se escogieron los tres mejores porcentajes y a estas muestras se les realizaron ensayos de viscosidad según la norma ASTM ya mencionada y, estos resultados se compararon con los estándares internacionales consultados en la bibliografía. Se seleccionó la muestra que cumplió con las especificaciones mínimas para biocombustibles, y se procedió a determinar nuevas propiedades fisicoquímicas como los puntos de ebullición bajo prueba de destilación, y la estimación del índice de cetanos siguiendo los procedimientos de las normas ASTM D86 – 90, y ASTM D976 – 80, respectivamente.

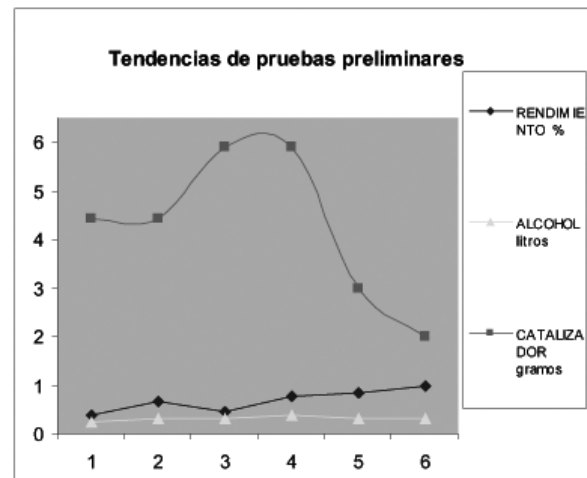


Figura 2. Grafica representativa de tendencia fase experimental

En la **Figura 2** se muestran las tendencias de las pruebas de la fase experimental. Se observó que había un compromiso entre el mayor porcentaje de conversión y el menor número de cetano, por lo que se buscó un punto de optimización

Con los resultados obtenidos en esta fase, se pudo determinar:

- La cantidad de materia prima para la producción de la planta piloto.
- Los parámetros para el diseño de los diferentes componentes de la planta.
- Las propiedades fisicoquímicas con las cuales se estableció un punto de referencia con el cual se comparan los resultados del biodiesel obtenido ya utilizando los equipos de la planta piloto.

3. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO.

El diseño de la planta se realizó siguiendo las recomendaciones encontradas en la literatura [6], [7], [8], [9]. La planta piloto consta de los siguientes elementos: Reactor, decantador, tanques de alimentación con su soporte, recuperador de alcohol, tanque de lavado. En las **Figuras 3 y 4** se muestran los principales elementos de la planta empleada.

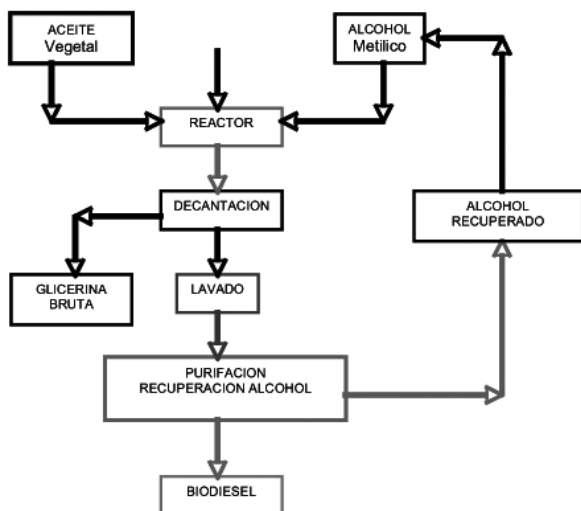


Figura 3. Proceso para la obtención del Biodiesel.

El diseño de estos elementos, se ha hecho una vez conocidos los resultados de las pruebas experimentales, que permitieron encontrar las cantidades de materia prima que intervienen en el proceso y que aseguran un alto rendimiento y una alta calidad del producto obtenido. El primer elemento que se diseñó fue el reactor, éste equipo es el más importante de la planta debido a que de su buen diseño depende una buena reacción. Posteriormente, se diseñó el decantador para

poder asegurar la separación de las dos fases resultantes del proceso de transesterificación de manera continua como se especificó en los objetivos iniciales de este trabajo.

Una vez lograda una correcta separación de los productos (Biodiesel+glicerina), se hace necesario diseñar e implementar el sistema de purificación del Biodiesel y de recuperación de la parte del alcohol que interviene en el proceso.

Después de la construcción de cada uno de los elementos constituyentes de la planta se procedió a las siguientes etapas:

- **Montaje:** Para este montaje se ubicó el estante en un lugar relativamente amplio el cual debe estar cerca a una línea de 110 voltios para las conexiones eléctricas sobre este estante se ubicaron los tanques de alimentación del reactor, previo diseño, el sistema de control de temperatura, el sistema de encendido para los agitadores y las resistencias eléctricas para calentamiento; luego se ubicó el reactor y el decantador, y, por último, el tanque de lavado y el purificador.

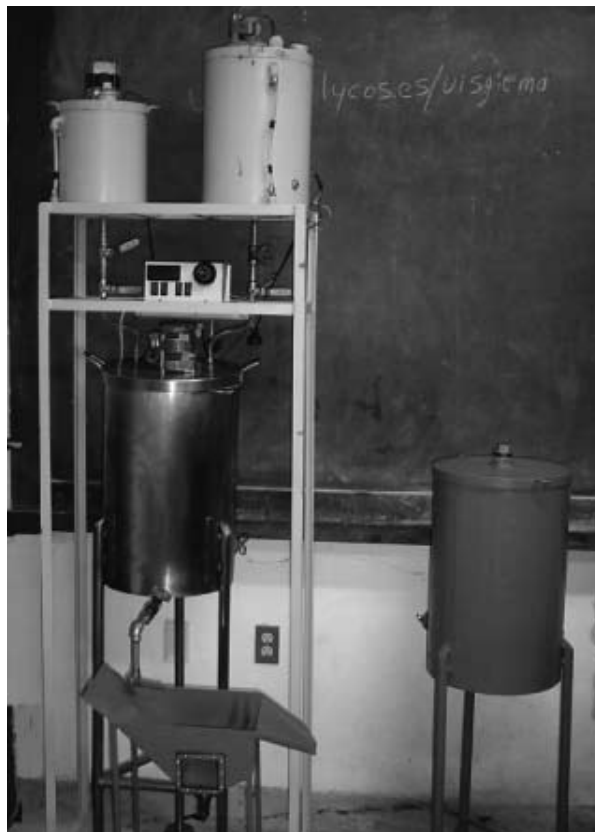


Figura 4. Montaje final

En la **Figura 4** se aprecia el montaje final de la planta piloto construida para la producción de Biodiesel.

3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA PLANTA PILOTO.

Flujos Volumétricos de aceite y alcohol: Tomando una base de 20 Kg. de aceite, y al tener una RMA¹ de 10: 1, se necesitan 7.576 Kg. de alcohol; los volúmenes de aceite y alcohol por hora requeridos son: 23.256 L de aceite y 9.57 L de alcohol.

Cantidad de catalizador: La cantidad de catalizador necesaria, tomando como referencia la cantidad obtenida en las pruebas experimentales, fue de 5,5 g de catalizador (NaOH) por cada litro de aceite.

El flujo másico total de entrada de 23,82 Kg. /h al reactor. El volumen total del reactor se calculo de 40 L. El material de construcción escogido fue el acero inoxidable AISI 304.

El **volumen del decantador** determinado de 5 L es el necesario para posibilitar que la fase pesada se deposite totalmente en el fondo y la fase liviana que sale por rebose se encuentre libre de glicerina.

Lavado: Para este proceso se seleccionó un tanque plástico, con una perforación en el fondo para extracción del agua de lavado, esto se hizo con el fin de poder lavar grandes cantidades de biodiesel y después enviarlo al proceso de purificado.

Purificado: Debido a que después del lavado, aun se encuentran residuos de alcohol presentes en el biodiesel, se necesita hacer una extracción de este, por lo cual se diseño este recipiente que permite la evaporación y recuperación de estos residuos. El diseño de este equipo empezó por determinar su volumen, el cual fue fijado en 40 L que es la producción aproximada de la planta durante 2 horas de operación continua. Esto permite tener un tiempo prudencial para carga y descarga de este equipo sin afectar el proceso de producción.

Sistema eléctrico: El sistema eléctrico utilizado es para la alimentación de cada una de las resistencias que calientan los fluidos y para la alimentación de los motores de agitación de cada uno de los tanques; todos ellos van conectados a la línea de 110 voltios, con requerimientos de amperaje diferentes.

3.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LA PLANTA PILOTO.

Después de haber logrado un punto optimo de funcionamiento de la planta, se dispuso que ésta puede

producir una cantidad considerable de biodiesel, necesaria para la determinación posterior de las pruebas de producción como el rendimiento y, la realización de otras pruebas como el consumo de potencia, costos de operación y pruebas fisicoquímicas.

Rendimiento: Para esta prueba se utilizaron 20 litros de aceite con sus equivalentes necesarios de alcohol y catalizador, durante 1 hora, manteniendo la temperatura dentro de los rangos ya establecidos en la fase experimental, y con una agitación de 220 rpm. Bajo estas condiciones se obtuvo un rendimiento similar a la fase experimental, de 16.3 L de biodiesel purificado, lo cual representa un 81.5% de rendimiento de la reacción, se recuperó además, 0.823 L de alcohol que equivale a un 10% del alcohol introducido.

Consumo de potencia: Debido al uso de resistencias eléctricas y agitadores se debe hacer un estimativo de consumo de energía de la planta piloto.

En la **Tabla 1** se muestra el consumo de potencia de la planta piloto en donde se observa que las resistencias del reactor y el purificador son los mayores consumidores de energía.

Tabla 1. Consumo de Potencia Horario

ELEMENTO	POTENCIA NOMINAL	TIEMPO DE CONSUMO PROMEDIO	CONSUMO DE POTENCIA
Resistencia el'ctr ica reactor	2 KW	0,5 h	1 KWh
Agitador reactor	0,1865 KW	1 h	0,1865 KWh
Agitador alcohol	0,1865 KW	0,5 h	0,09325 KWh
Resistencia el'ctr ica aceite	1 KW	0,5 h	0,5 KWh
Agitador aceite	0,1865 KW	0,5 h	0,09325 KWh
Purificador	2 KW	0,5 h	1 KWh
TOTAL			2,873 KWh

Costos de operación: Los costos a tener en cuenta para una producción hipotética de esta planta durante 330 días al año y 24 horas al día, que equivalen a 7920 h/año, para una producción de 129096 L/año de biodiesel (16,3 L/h), son los siguientes: Costos fijos, Costo de materia prima, Ingresos por subproductos, Costos directos del proceso, Costos indirectos del proceso. Costos fijos: Es el costo de la construcción de la planta para este trabajo fue de \$1'084000. Estos costos fueron calculados según la metodología encontrada en [10].

En la **Tabla 2** se presenta un resumen de los costos anteriormente mencionados. Se puede afirmar que la principal desventaja del biodiesel, \$7498,85/L, frente a otros combustibles como el diesel cuyo precio promedio

¹Relación molar alcohol sobre aceite de palma.

es de \$ 1006,45 por litro, es su alto precio de producción, aunque para una planta de proporciones mucho mayores el precio de producción debe ser menor que el acá estimado. Sin embargo es aconsejable no darle un valor

favorable a la GLICERINA, por que esto depende de si la calidad la hace un producto comercializable o un residuo. En este último caso, debería valorarse como un sobre costo ambiental [11].

Tabla 2. Costos Anuales de Producción

	Cantidad anual	Costo por unidad	Costo por año \$/año	Costo por litro \$/L
MATERIA PRIMA				
Aceite vegetal	158400 L	2500	396'000000	
Alcohol metílico	65181,6 L	7483.87	487'810000	
Catalizador	871,2 Kg	12000	10'454000	
SUBPRODUCTOS				
Glicerina bruta	29304 L	4000	-117'048000	
COSTOS DIRECTOS				
Agua lavado	396 m ³	767	303732	
Electricidad	370892 KWh	273.48	101'431544	
Mano de obra	39600 trab/h	1608.3	63'688680	
Recargos por nomina	40% de trabajadores		25'475472	
Mantenimiento	6% de costos fijos		65040	
COSTOS INDIRECTOS				
Depreciación	5% de costos fijos		54200	
Aseguramiento	0,5% de costos fijos		5420	
TOTAL			968'072088	7498.85

Pruebas Físicoquímicas del biodiesel obtenido en la unidad piloto.

Tabla 3. Pruebas Físicoquímicas del biodiesel

DENSIDAD (gr/ml)	0.867
VISCOSIDAD 40 °C (mm²/seg.)	4.075
Punto inicial de ebullición (°C)	307.5
50% Recuperado (°C)	320.1
90% Recuperado (°C)	327.7
Punto final de ebullición (°C)	334
% Recuperado	97%
% Perdidas	1%
% Residuos	2%

Debido a la necesidad de comparar los niveles de calidad obtenidos en la fase experimental, con una producción mayor, se realizaron nuevamente las pruebas de viscosidad, destilación y estimación del IC como lo indican las normas ya referenciadas. Los resultados obtenidos son los siguientes:

El índice de cetanos obtenido para la prueba de

producción final fue de: 51. Además, se determinó el punto de nube del biodiesel, y se comparo con los consultados de literatura de pruebas anteriores. Este punto se halló en un baño de enfriamiento de temperatura controlada, el valor fue de 10 oC.

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Después de realizar las pruebas físicoquímicas para comprobar la calidad del biodiesel, se hicieron pruebas de desempeño en un motor, para valorar los factores en los cuales este influye. Estas pruebas se hicieron con diferentes mezclas de biodiesel para ver el comportamiento tanto en emisiones como en potencia, y par. En estas pruebas se siguió la metodología encontrada en [12].

4.1 Equipo utilizado.

Para estas pruebas se utilizó el siguiente equipo:

- Motor diesel, 4 tiempos marca KIA, de 2.2 litros de aspiración atmosférica con una potencial nominal de 60 HP.
- Prototipo Diagma D100, desarrollado por el “Grupo de Investigación de Energía y Medio Ambiente” GIEMA de la Universidad Industrial de Santander, en el cual encontramos un analizador de gases, un opacimetro y un sensor Hall con el cual se mide la potencia y el par para cada una de las pruebas, utilizando para cada uno su respectiva interfase gráfica desarrollada en el ambiente de LabView [13], [14], [15], [16].
- Para la realización de las pruebas se utilizo, además de diesel convencional, mezclas de biodiesel y diesel, en diferentes proporciones de volumen. Estas mezclas fueron: B5 (5% de volumen de Biodiesel y 95% de diesel convencional), B10 y B20.

4.1.1 Resultados de emisiones

A continuación se muestra el comportamiento con respecto a las emisiones de cada una de las mezclas de Biodiesel – diesel, estas pruebas se comparan con el combustible diesel normal y con respecto al consumo de combustible en el motor.

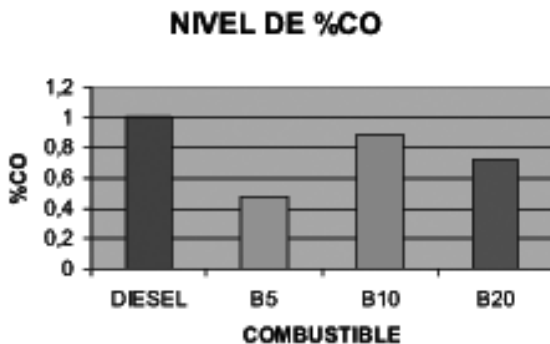


Figura 5. Grafica nivel CO

En la **Figura 5** se puede observar que a primera vista el porcentaje del CO se disminuye en las mezclas Diesel-Biodiesel.

En la **Figura 6**, también se observa una disminución relativa de las emisiones de material particulado en las diferentes mezclas con biodiesel en comparación el combustible diesel convencional.

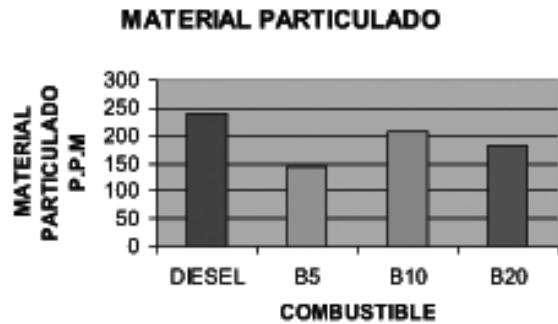


Figura 6. Grafica del Material Particulado (MP)

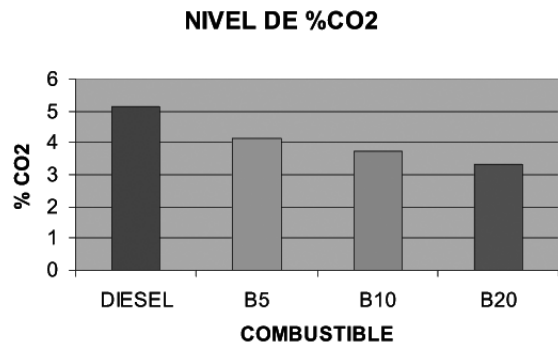


Figura 7. Grafica nivel CO₂

En la **Figura 7** se observa, también, una disminución en las emisiones de CO₂ que están relacionadas posiblemente con la disminución de CO y MP mostrado en las **Figuras 5 y 6**.

4.1.2 Resultados de potencia y par.

A continuación se muestra el comportamiento con respecto al torque y la potencia con cada una de las diferentes mezclas de combustible.

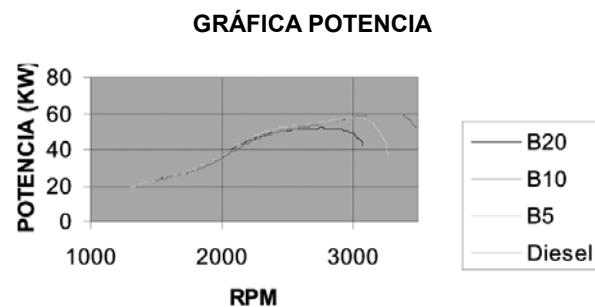


Figura 8. Curva de Potencia Vs rpm

En la **Figura 8** se observa que la potencia a bajas revoluciones no presenta ninguna disminución cuando se utilizan diferentes mezclas con biodiesel. Sin embargo, a altas revoluciones se puede observar un ligero aumento de la potencia especialmente en la mezcla B10.

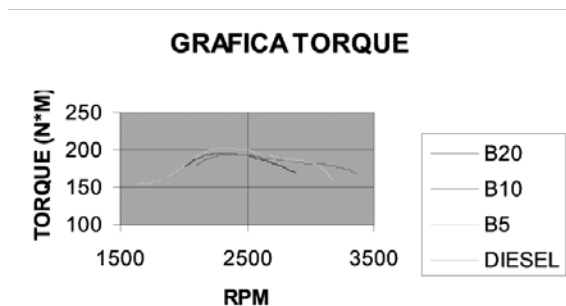


Figura 9. Curva de Torque Vs rpm

En la **Figura 9** se puede observar un comportamiento muy similar al de la potencia para el par producido por el motor que emplea mezclas de biodiesel en comparación con el combustible diesel convencional.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Del presente trabajo de investigación, se puede concluir:

- El presente trabajo es una contribución adicional al desarrollo científico y tecnológico del país en el área energética; debido a que se logró desarrollar un sistema de producción de combustible para Motores de Combustión Interna a partir de una fuente renovable, como lo es el aceite de la palma, cuya utilización en el motor de prueba arrojó resultados satisfactorios en cuanto al desempeño del motor y concordantes con los resultados obtenidos en experiencias similares en el ámbito nacional e internacional. Esta planta es de fácil instalación y puesta en marcha, lo que la hace atractiva para su utilización por parte de los pequeños productores y las asociaciones y cooperativas que tienen una oportunidad de desarrollo económico y social.
- En el aspecto medioambiental los resultados del producto obtenido, también fueron satisfactorios debido a que se logró disminuir relativamente los índices de emisiones contaminantes producidas por la combustión en el motor como CO, CO₂ y MP, lo cual es una de las ventajas del biodiesel. No se midió la influencia del biodiesel sobre los NO_x.
- Mediante este proyecto se avanza hacia la aplicación de una tecnología que no requiere una gran inversión, con miras a la no dependencia de fuentes de energía convencional y a una futura implementación de una

reglamentación sobre el tema de la disminución de las emisiones contaminantes en el país y, como una respuesta regional, al problema del calentamiento global, como ya se ha hecho en países europeos, asiáticos, los estados unidos y en Latinoamérica.

- Ante las desventajas presentadas por este biocombustible, como es su precio, el aumento del consumo en el motor y su corto tiempo de almacenamiento antes de comenzar su degradación, se hace necesario un análisis de ésta problemática y la comparación con las ventajas anteriormente mencionadas antes de avanzar en la futura aplicación de esta tecnología a gran escala.

Se requiere profundizar mediante trabajos futuros dirigidos a realizar estudios en cuanto a la optimización del diseño del proceso de producción del biodiesel mediante tecnologías más innovadoras para resolver el problema de la reducción de la glicerina producida, el empleo de otros tipos de catalizadores, la determinación de un mejor punto de niebla para que sea atractivo para la exportación a países con estaciones muy frías, probablemente a través del empleo de otras fuentes de materia prima autóctonas diferentes al aceite de palma, como son la higuera, el girasol, la soya, grasas de origen vegetal, etc; con el objetivo de disminuir los costos de producción por unidad de volumen.

También se hace necesario realizar un estudio sobre el consumo específico de combustible y los efectos sobre los costos de mantenimiento y la vida útil de los elementos y sistemas de los motores Diesel que utilicen biodiesel. Además, es necesario llamar la atención, acerca que la producción industrial puede generar más problemas que beneficios, como por ejemplo: monocultivos, excesivo uso de fertilizantes, contaminación de las aguas subterráneas, pérdidas de ecosistemas completos, problemas sociales, políticos y económicos.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo y al intercambio de información y experiencias entre el grupo de investigación en Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía GASURE de la Universidad de Antioquia y al grupo de investigación en Energía y Medio Ambiente de la Universidad Industrial de Santander.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LAPUERTA M. y AGUDELO J. *Utilización de combustibles alternativos en motores térmicos. Módulo*

III. España: Sección de publicaciones de la Universidad de Castilla-la Mancha. Ciudad Real. 2005. 220 p

[2] AGUDELO J. y BENJUMEA, P. N. *Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: aspectos de su obtención y utilización*. Colombia: Imprenta Universidad de Antioquia. Medellín. 2004. 60 p.

[3] ASTM. *Annual Book of ASTM Standards, Section 5: Petroleum Products, Lubricants and Fossil Fuels*. 2001.

[4] ONANONG, Chomsiri y CHIRAPORN, Mathaworn. *Methyl Esters from Palm Oil: Optimization of transesterification via Hydroxide Base- Catalyzed Reaction*. Tesis pregrado. King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Department of Industrial Chemistry. 2001.

[5] U.S. Department of Energy. *Biodiesel Handling and Uses Guidelines*. Segunda edición. Office of Scientific and Technical Information. 2004. 68 p.

[6] D. Darnoko y CHERYAN Munir. Kinetics of Palm oil Transesterification in a Batch Reactor. Artículo. University of Illinois, Department of Food Sciences and Human Nutrition, Agricultural Bioprocess Laboratory, Urbana, Illinois. 2000.

[7] TRAMBOUZE, P. *Chemical Reactors. Design / engineering / operation*, primera edición. Francia: Editions Technip, Paris. 1988. 608 p.

[8] WENZEL, Leonard A. *Principles of Unit Operations*, segunda edición. Japon: Toppan Printing Company LTDA. 1975. 578 p.

[9] MEGYESY, E. F. *Pressure Vessel Handbook*, cuarta edición. USA: Publishing Inc. Tulsa OK. 1977. 415 p.

[10] BURMEISTER, L.C. *Elements of Thermal-Fluid System Design*. USA: Prentice Hall. New Jersey. 1998. 593 p.

[11] KALTSCHMITT, M; REINHARD, G.A.; STELZER, T. *Life cycle Analysis of Biofuels Under Different Environmental Aspects*. Biomass & Bioenergy Volu 12 # 2 pp. 121-134. 1997.

[12] MARTIR ANTHONY, PLINT MICHEL. "Engine Testing Theory and Practice." OXFORD. Butterworth Heinemann. UK, 1996.

[13] RIZZONI G. Estimation of instantaneous indicated torque in multicylinder engines. U.S Patent 5.771.482, June 23, 1998.

[14] CHACON V. JORGE L et al. *Diseño y desarrollo de un prototipo para el monitoreo y diagnóstico de motores Diesel mediante técnicas no intrusivas fase I*. Proyecto de investigación CINTEL COLCIENCIAS, CDMB – UIS . Ingeniería Mecánica UIS 2005. HOLMAN P. J. *Métodos experimentales para ingenieros*. Ed Mc Graw Hill, 4a edición, México, 1986.

[15] CHACÓN, J. L.; MACIÁN, V; TORMOS, B. y OLMEDA, P. *Diagnóstico de motores de combustión interna alternativos mediante el análisis de las oscilaciones del bloque*. En: Revista de Ingenierías Físico mecánicas. UIS Bucaramanga Colombia año 2002.

[16] CHACON, J.L., BARRERO, J., HIGUERA, J., CASTILLO, E. "Design and implementation of automatic system for fault detection and diagnosis of Diesel engines". Proceedings on Congress CCCT04 IEEE. University Texas, Austin, USA. August 14 –17, Volume IV 2004, pp-20-22

8. CURRICULUM

CARLOS ALIRIO DÍAZ GONZÁLEZ

Ingeniero Mecánico UIS. Candidato a Magíster en Ingeniería. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía, GASURE Universidad de Antioquia. E-mail: carlosdiaz_13@yahoo.com

NÉSTOR A. LÓPEZ

Ingeniero Mecánico UIS. Seriautos S.A.Suramericana de seguros S.A. E-mail: lopbar@yahoo.es

OMAR A. GÉLVEZ AROCHA

Ingeniero Mecánico y Magíster en Informática, UIS. Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica. Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente, GIEMA. Universidad Industrial de Santander. E-mail: ogelvez@uis.edu.co

JORGE LUIS CHACÓN VELASCO

Ingeniero Mecánico, Especialista en Automóviles y Tractores del IPB, Minks, Bielorusia. DEA en Automática e Informática Industrial. Doctor en Ingeniería, UPV, España. Profesor Escuela de Ingeniería Mecánica.

Director del Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente, GIEMA. Universidad Industrial de Santander E-mail: jchacon@uis.edu.co; jchaconvelasco@gmail.com