

DISEÑO Y OPERACIÓN DE PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES DE FREIDO

DESIGN AND OPERATION OF PILOT PLANT PRODUCTION OF BIODIESEL FROM FRYING OILS

Nelly Morales Pedraza¹, Luis Alejandro Diaz Aldana²

Resumen

El objetivo de este artículo es presentar una innovación tecnológica a pequeña escala de una planta piloto cuyo objetivo es la producción de ésteres etílicos o metílicos a partir de aceites vegetales utilizados en la industria alimentaria para ser empleados como combustible en motores tipo Diesel y, de esta manera, generar alternativas de uso para dichos aceites reutilizados y, adicionalmente, generar nuevas opciones en biocombustibles que puedan reemplazar a los ésteres metílicos, ya que estos requieren para su obtención el uso de metanol, un producto que por lo general es de origen petroquímico y altamente tóxico.

En esta planta se pueden evaluar aceites gastados de diferentes tipos y diverso origen o estudiar aceites provenientes de industrias alimentarias que generalmente son una mezcla de oleína de palma y aceite de soya y otras veces son aceites de palma hidrogenados o también mezclas de aceite gastado con aceite de palma refinado RBD (refinado, blanqueado y desodorizado).

Los resultados obtenidos serán, la base del diseño y montaje de una planta piloto para la producción de biodiesel en lotes de 6 litros por hora aproximadamente, lo cual se evalúa bajo condiciones simuladas de carga y operación. Para tal fin, se diseñó e implementó un reactor “batch” con calentamiento y agitación mecánica, con controladores de temperatura, condensación y reflujo total del alcohol, manteniendo una relación molar de 6:1 (alcohol/aceite), que es considerada la relación óptima en la esterificación básica de acuerdo con varias publicaciones científicas. La temperatura de la reacción se fija en 60°C y presión atmosférica. La productividad de la reacción se determinó por cromatografía de gases, arrojando un porcentaje superior a 95% de ésteres obtenidos.

Palabras clave: planta piloto, esterificación, aceites de freir, éster, biodiesel.

Abstract

The objective of this article is present the pilot plant used in the research titled: Production of biodiesel from used edible oils to industrial level for the production of methyl or ethyl esters

1 Ingeniera de Alimentos, Química, Coordinadora Especialización en Procesos de Alimentos y Biomateriales, Unad. E mail: nelly.morales@unad.edu.co.

2 Ingeniero Químico, Candidato a Magister en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, E mail: ladiaza@unal.edu.co.

from vegetable oils used in the food industry that be used as a fuel in diesel engines type, in order to generate alternative use for these oils are reused, and additionally, generate new options in biofuels that can replace methyl ester; since these need of methanol, a product that usually is a derived petrochemical and highly toxic.

In this small-scale plant for the production of ethyl esters (biodiesel) can be evaluated spent oils of different kinds and diverse origin, or study oils from food industries, which are usually a blend of palm oil and soybean oil, and other times palm oils hydrogenated or mixtures of oil spent with palm oil refining RBD (refined, bleached and deodorized).

The results are the basis for the design and construction of a pilot plant to produce biodiesel by lot of 6 liter by hour approximately, which is evaluated under simulated conditions of loading and operation. It was designed and implemented a batch reactor with heating and stirring mechanics, drivers with temperature, condensation and total alcohol reflux, maintaining a molar relationship of 6:1 (alcohol/oil), which is considered the best relation for a esterification with basic catalysis several scientific publications. The temperature of the reaction is set at 60 °C and atmospheric pressure. The productivity of the reaction was determined by gas chromatography, the result was superior at 95% of ester obtained.

Keywords: *pilot plant, esterification, vegetable oil, ester, biodiesel.*

Recibido: septiembre de 2007

Aprobado: diciembre de 2007

Introducción

La transformación química de los desechos oleosos derivados de aceites vegetales constituye una propuesta interesante para un mejor aprovechamiento de los residuos provenientes del procesamiento de alimentos mediante el uso de aceites de freído, con una gran diversidad de posibilidades para el desarrollo de productos como el biodiesel con el siempre atractivo rótulo de “recurso natural renovable”. Varios estudios muestran las bondades de profundizar en esta temática ambiental, ya que no solo se favorece la materia prima con la recolección de desechos de aceites usados en frituras y golosinas, por el ahorro en el posterior tratamiento de efluentes, sino que al final de la cadena productiva, también con un porcentaje de biodiesel como combustible se reducirá el índice de emisiones gaseosas contaminantes a la atmósfera.

Ante la demanda nacional debidamente reglamentada por el marco jurídico de la Ley 939 de 2004, de incorporar los biocombustibles (bioetanol y biodiesel) obtenidos a partir de la transformación de biomasa vegetal a los combustibles derivados de petróleo, los aceites vegetales representan una alternativa por el nivel de producción anual actual y futuro. Fedepalma proyecta para el año 2010 1,35 millones de toneladas de aceite y 3,5 millones de toneladas/año para el 2020, solo a partir de palma de aceite. Sin embargo, en promedio, solo el 60% del aceite de palma producido se consumiría en el mercado interno y el 40% sería dirigido a mercados externos. En algunas de las regiones palmeras, el desarrollo del cultivo por razones sociales y políticas, necesariamente

implicará el fomento del cultivo mediante la incorporación de pequeños productores, quienes deberán ser beneficiarios directos de la favorabilidad del mercado de los aceites destinados a consumo interno, externo y transformación a biocombustibles; cabe esperar, entonces, que se puede proyectar el establecimiento de plantas a pequeña escala, productoras de biodiesel de palma de menor costo y capacidad, con un buen nivel de productividad que permita favorecer al núcleo de pequeños y medianos agricultores que requieran del Diesel para sus labores agrícolas. El reto para cualquier país o región consiste en la implementación de procesos basados en materias primas autóctonas, los cuales se deben optimizar con el fin de obtener un biodiesel con un costo de producción bajo que lo haga competitivo, pero que cumpla con las especificaciones internacionales de calidad para su uso como combustible en motores diesel (Torres y colaboradores, 2003).

Este trabajo forma parte integral del proyecto de investigación intitulado: "Producción de biodiesel a partir de aceites de frituras obtenidos industrialmente", cuyo objetivo primordial es plantear, mediante una alternativa técnica, la solución (el biodiesel) para el uso de los aceites vegetales comestibles desechados por la industria alimentaria y principalmente enfocado hacia el mercado de frituras o aceites de golosinas, que permitirá involucrar en estudios posteriores a un grupo de industrias que se encuentren interesadas en impulsar esta alternativa y así lograr mayores avances. Teniendo en cuenta que los aceites vegetales y grasas animales se constituyen en un biomaterial renovable de múltiples aplicaciones, este proyecto de investigación beneficiará el programa posgradual de Especialización en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales, ya que gracias a la cobertura nacional de la UNAD se podrá llegar con aportes tecnológicos a regiones donde precisamente se encuentra la materia prima (cultivadores de palma de aceite, industrias porcícolas y avícolas, etc.), generándoles un valor agregado y creando, por ende, más fuentes de empleo para el mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones aledañas y zonas no interconectadas.

Variables del proceso

La definición de biodiesel propuesta por las especificaciones ASTM ("American Society for Testing and Material Standard" Asociación Internacional de Normativa de Calidad) lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos renovables tales como, aceites vegetales o grasas de animales que se emplean en motores de ignición de compresión. Sin embargo, los ésteres más utilizados, son los de metanol y etanol (obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos) debido a su bajo coste y a sus ventajas químicas y físicas. En la tabla 1 se presentan las variables por tener en cuenta en el proceso de obtención del biodiesel (Narváez y colaboradores, 2004-5).

Tabla 1. Principales variables del proceso

VARIABLE	EFEECTO
Relación alcohol:aceite	Aunque estequiométricamente es de 3:1, es indispensable el aumento de esta relación para disminuir la producción de mono, di y triglicéridos e incrementar la formación de ésteres metílicos/etilícos según el alcohol que se use en la transesterificación (metanol/etanol). Según Freedman (1984) una relación de 6:1 es la adecuada para un máximo de producción, aunque relaciones superiores dificultan el proceso de separación y purificación del biodiesel.
Agua	Los reactantes deben estar libres de agua ya que esta puede conducir a la formación de jabones que emulsifican la mezcla impidiendo el desplazamiento del equilibrio de la reacción, evitando el contacto de los reactantes y dificultando la separación y purificación de los productos.
Ácidos grasos libres	Una presencia significativa de ácidos grasos libres conlleva al incremento de la viscosidad del producto y la formación de geles que interfieren en la separación del glicerol. Cvengros y Povazanec (1996) establecen que el efecto negativo es na consecuencia de la formación de jabones catalíticamente inactivos, producto de la neutralización de los triglicéridos seguida de la neutralización.
Temperatura	La temperatura juega un papel importante por cuanto puede incrementar la velocidad de reacción. Se debe tener en cuenta los puntos de ebullición de los insumos, como es el caso del alcohol utilizado, ya que el metanol es líquido a temperatura ambiente pero posee una alta volatilidad lo cual se debe tener en cuenta para el reflujo.
Agitación	Una de las variables críticas de la operación es la velocidad de agitación, que de acuerdo con los estudios de Nouredini y Zhu (1977) debe realizarse a números de Reynolds superiores a 10000,
Área de transferencia	Con el propósito de aumentar el área de contacto entre los reactantes se utiliza el mezclador mediante un agitador de aspas. Al principio se obtendrá una mezcla homogénea que luego del tiempo de reacción se separa en dos fases una rica en éster (biodiesel) y otra rica en glicerol.

Materiales y método

La diversidad de aceites y grasas empleados en la producción de biodiesel, tal como se describió previamente, ha llevado al establecimiento de la normatividad de acuerdo con las materias primas empleadas en cada una de las regiones; por tanto, no existe una única norma que defina o reglamente las propiedades para todos los ésteres empleados como biodiesel (Knothe, 1997). El aceite de fritura usado es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiesel, ya que es la materia prima más barata y con su utilización se evitan los costes de tratamiento como residuo. Por su parte, los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible. Sin embargo, su utilización presenta dificultades

logísticas, no sólo por su recogida, como se ha dicho, sino también por su control y trazabilidad debido a su carácter de residuo (Zapata, 2006).

Para el desarrollo de la investigación se realizó la estandarización de las técnicas de análisis cromatográfico y de los ensayos de caracterización física y química de aceites para la fabricación de los ésteres metílicos (Torres et al, 2005). El biodiesel no contiene azufre en proporciones significativas; el contenido de aromáticos es casi nulo y su toxicidad es muy baja. En cuanto a la utilización del biodiesel como combustible de automoción, ha de señalarse que las características de los ésteres son más parecidas a las del diesel que las del aceite vegetal sin modificar (Mittelbach, 1988). La viscosidad del éster es dos veces superior a la del diesel frente a diez veces o más de la del aceite crudo; además, el índice de cetano de los ésteres es superior, siendo los valores adecuados para su uso como combustible. ASTM ha especificado distintas pruebas que se deben realizar a los combustibles para asegurar su correcto funcionamiento. En la tabla 2 se muestran algunas propiedades especificadas en la Norma Técnica Colombiana NTC 5444 para uso en motores diesel.

Tabla 2. Requisitos del biodiesel para mezcla con combustibles diesel

PROPIEDADES DEL BIODIESEL DE ACEITE DE PALMA	VALOR	MÉTODO
Densidad a 15°C (kg/m ³)	860 - 900	ASTM D4052 ISO 3675
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	1,9 - 6	ASTM D445 ISO 3104
Contenido de metanol o etanol (%w)	0,2 máx.	ISO 14110
Punto de inflamación (°C)	120 mín.	ASTM D93 ISO 2719
Punto de fluidez (°C)	(1)	ASTM D97
Carbón residual (% w)	0.3 máx. (2)	ASTM D4530 ISO 10370
Número de cetano (cetanos)	47 mín.	ASTM D613 ISO 5165
Número ácido (mg de KOH/g)	0.5 máx.	ASTM D664 EN 14104
Contenido de agua (mg/kg)	500	ASTM E203 ISO 12937
Punto de nube °C	(1)	ASTM D2500 ISO 3015
Monoglicéridos (% w)	0.8 máx.	ASTM D 6584 ISO 14105
Diglicéridos (% w)	0.2 máx.	ASTM D 6584 ISO 14105
Triglicéridos (% w)	0.2 máx.	ASTM D 6584 ISO 14105

(1) Los valores para estos parámetros deben establecerse en las normas técnicas especificadas que se definan para cualquier mezcla biodiesel – diesel en cualquier proporción. Los valores definidos deberán ser sustentados en estudios realizados en laboratorios acreditados y avalados por autoridad competente.

(2) El carbón residual debe ser determinado sobre el 100% de la muestra.

(3) Se recomienda complementar con el método ASTM D4625, con niveles máximos de 1,5 mg/100 ml a seis semanas.

El poder calorífico inferior de referencia reportado por el método ASTM D240 debe estar alrededor de 39500 KJ/Kg. Los estándares están dados para ésteres metílicos, pero no existe diferencia apreciable con sus homólogos etílicos y se pueden adoptar por ahora como una base para establecer las propiedades que deben poseer los ésteres etílicos. En la figura 1 se presenta el esquema de los principales equipos para el procesamiento de biodiesel.

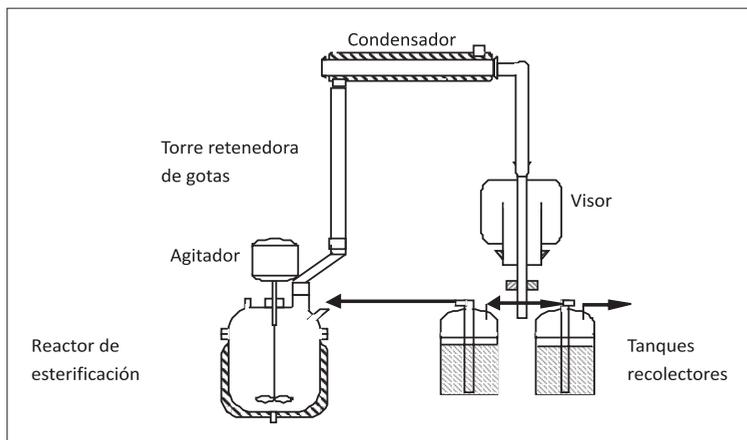


Figura 1. Esquema del equipo de esterificación

Teniendo en cuenta los tiempos de calentamiento del aceite y condensación de etanol en exceso (1 y 1.5 horas respectivamente, ya que cerca del 60 % del etanol adicionado es recuperado), así como los tiempos de carga y descarga (aproximadamente media hora), se estima que con cinco lotes de dos horas cada uno, se pueden cubrir los requerimientos de Biodiesel por día.

En la figura 1 se muestra un diagrama del equipo utilizado en la alcoholólisis de aceites vegetales usados. La alcoholólisis se lleva a cabo en un reactor “batch” con una capacidad de seis litros provisto de una chaqueta de calentamiento con aceite térmico y agitación mecánica (300 – 500 RPM); la reacción sucede por espacio de una hora, con controladores de temperatura y reflujo total del metanol, para lo cual se adaptó un condensador, manteniendo una relación molar de 6:1 (aceite/alcohol), que es considerada la relación óptima de acuerdo con el trabajo de Freedman y colaboradores (1984). La temperatura y presión de la reacción se fijan en 60°C y presión atmosférica.

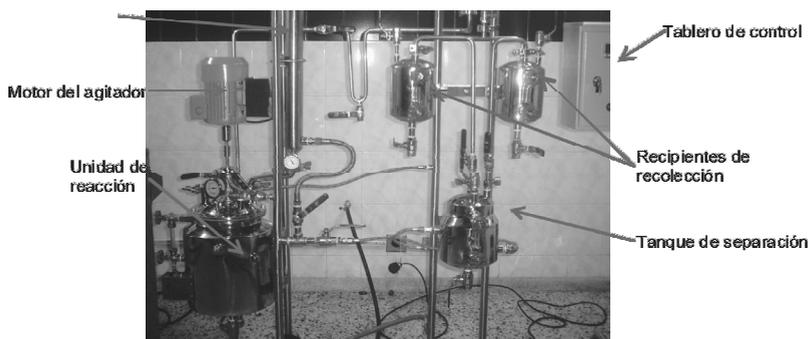
El diseño del reactor debe permitir flexibilidad en la operación y el uso de materias primas variadas, así como catalizadores ácidos o básicos (Zeolitas ácidas, KOH, NaOH, Metóxido de Sodio), en baja concentración no superior a 3 % de la masa total reactante, aceites con diferentes niveles de acidez y etanol con diferentes excesos; por esto, se consideran temperaturas de operación desde 20 a 120 °C, presiones de trabajo hasta 60 psi y un presión de diseño de 120 psi. El reactor cuenta con los sistemas de agitación y control de temperatura respectivos, con salida de vapor, reflujo de condensado, acoples para los sistemas de calentamiento y control de

temperatura, acoples para tubería de alimentación y descarga, etc., además de un intercambiador de calor que permite la recuperación de los productos volatilizados o en exceso.

Para la utilización de biocombustibles en motores diesel se puede recurrir bien sea al uso de aceites vegetales (cuya implantación es prácticamente testimonial en la industria), o bien a producir ésteres metílicos de aceites vegetales. El biodiesel se puede emplear a su vez puro (como se hace en Brasil y en EE.UU.) o en mezclas de biodiesel/Diesel, que es la más común. Para evitar introducir modificaciones en motores que se requieren para la utilización de aceites vegetales sin modificar y mejorar sus características como carburantes, se recurre a transformarlos en sus derivados ésteres metílicos o etílicos (Quiñones, 2003). De esta manera se consigue que las largas cadenas ramificadas iniciales, de elevada viscosidad y alta proporción de carbono se transformen en otras de cadena lineal, de menor viscosidad y porcentaje de carbono y de características físico-químicas y energéticas más similares al diesel de automoción. Este biodiesel se puede utilizar ya sea puro, o mezclado en distintas proporciones junto con el diesel de automoción, que es la forma más habitual de utilización.

EQUIPO

Columna retenedora de gotas



Unidad de reacción: consiste en un tanque agitado (reactor “batch”) que se diseñó para operar por lotes, teniendo en cuenta que este tipo de operación es la más económica para bajos volúmenes de producción. La selección del material que se empleará en la construcción de un equipo requiere tener en cuenta aspectos como corrosión, condiciones de operación del equipo, facilidad en su consecución y mecanizado, así como costo del material y mantenimiento del equipo. Se selecciona acero inoxidable tipo 316 para la construcción del reactor y demás equipos. En contacto con el acero 316 la corrosión estimada por año para condiciones de operación continua (pulgadas/año) es presentada en la tabla 3. Como se podrá observar en esta tabla el acero inoxidable presenta ventaja ya que la corrosión es inferior a la de otros materiales como acero al carbón.

Tabla 3. Velocidad de la corrosión sobre el acero de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel

MATERIA	CALIDAD	VALOR
Aceites vegetales	Excelente	< 0.002
Ácidos grasos	Bueno	< 0.02
Etanol anhidro	Excelente	< 0.002
Soluciones de KOH diluidas	Bueno	< 0.02
Glicerol	Buena	< 0.02
Agua (medio ambiente)	Excelente	< 0.002
Ácido cítrico	Bueno	< 0.02
Ácido fosfórico	Bueno	< 0.02

Sistema de calentamiento: el calentamiento de la mezcla reactante se efectúa con un sistema de resistencias inmersas, que minimiza la inercia térmica presentada por otro tipo de configuraciones como las chaquetas; además, su bajo costo y facilidad de control de temperatura con respecto a los otros sistemas, lo hace accesible para los propósitos requeridos. Recomendación del diseño: se fabrica con resistencia de potencia total de 2000W con tres elementos calefactores de longitud total cada uno (elementos en U), esto para disminuir la potencia disipada por unidad de longitud.

El calentamiento de la masa reactante se efectúa con un sistema de resistencias inmersas, que minimiza la inercia térmica presentada por otro tipo de configuraciones como las chaquetas; además, su bajo costo y facilidad de control de temperatura con respecto a los otros sistemas, lo hace accesible para los propósitos requeridos.

El calor de reacción se calcula a partir de la diferencia entre los calores de combustión de reactantes y productos a 25 °C y es corregido hasta la temperatura de reacción de 76 °C. El calor de combustión para el aceite se toma como el del aceite de palma reportado por la literatura:

Calor específico para el aceite: 1.93 kJ/kg.

Calor específico para el etanol: 2.62 kJ/kg.

Calor específico para el éster de etilo: 1.96 kJ/kg.

Calor específico para la glicerina: 2.51 kJ/kg.

Con esto, el calor de reacción a 76 °C es:

$$\Delta Hr = 64.1 \text{ kJ} + (-0.0137 \text{ kJ} / ^\circ\text{C} * (60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}))$$

$$\Delta Hr = 63.58 \text{ kJ}$$

El calor de reacción referido al biodiesel en relación estequiométrica es:

$$\Delta Hr_{BD} = \frac{63.58 \text{ kJ}}{3} = 21.19 \text{ kJ} / \text{mol}$$

Sistema de control de temperatura: para el sistema de control de temperatura, que se basa en controlar la disipación de energía por parte de las resistencias, se propone una estrategia de control SR1; como sensor, una termocupla tipo J (rango de temperatura 100 a 400 °C); un

controlador digital PID Shimaden autosintonizable (SR1 series) y como elemento final de control un Relay de estado sólido (que actúa como contacto).

Sistema de agitación: el material de construcción del agitador se escoge como acero inoxidable 316 por las razones ya mencionadas. Los patrones de agitación y la turbulencia en las etapas iniciales de la transesterificación deben ser tales que permitan una adecuada interacción de los reactantes; para esto, se escoge un impulsor tipo turbina abierta con cuatro aspas y ángulo de inclinación de 45°. Esta configuración es útil cuando se desea realizar mezclas de sustancias inmiscibles o sólidas que precipitan, pues favorece un flujo tanto radial como axial que garantiza turbulencia y mezclado; adicionalmente, el consumo de potencia para este tipo de agitadores es inferior al de otras configuraciones.

Consumo de potencia: es deseable que al interior del equipo de reacción el régimen de flujo dado por el agitador sea turbulento; esto se logra generalmente cuando el número de Reynolds (Re) es superior a 10.000; experimentalmente se comprobó que un buen grado de agitación y mezclado se obtiene con velocidades de agitación superiores 300 a 600 RPM.

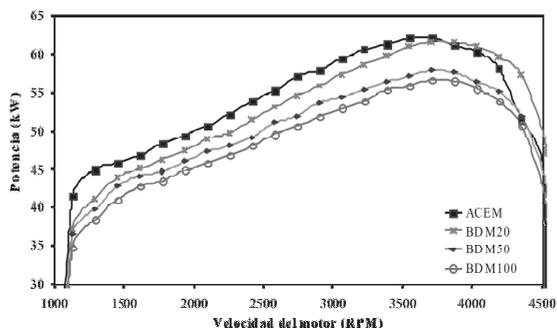


Figura 3. Potencia en función de velocidad del motor (RPM) para las mezclas BDM (González, 2006)

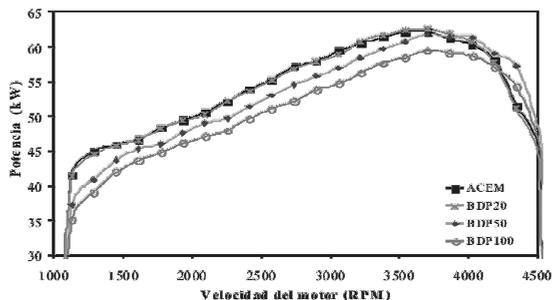


Figura 4. Potencia en función de velocidad del motor (RPM) para las mezclas BDP (González, 2006)

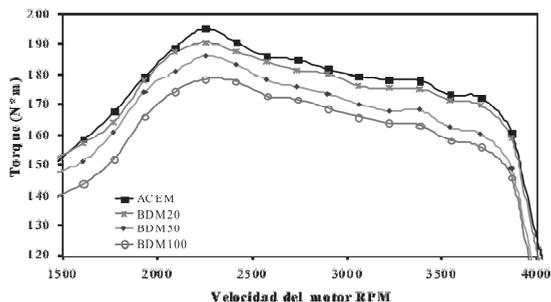


Figura 5. Torque en función de velocidad del motor (RPM) para las mezclas BDM (González, 2006)

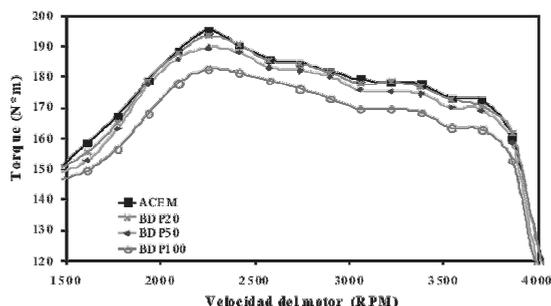
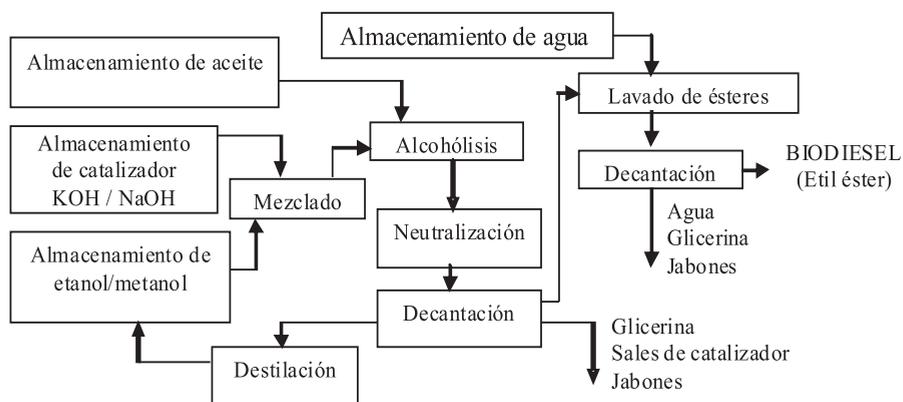


Figura 6. Torque en función de velocidad del motor (RPM) para las mezclas BDP (González, 2006)

Descripción del proceso

Adecuación de materias primas: los insumos deben tener características especiales para beneficiar la transesterificación; el aceite debe estar seco, es decir, libre de humedad, al igual que el alcohol que debe ser anhidro. La mezcla catalizadora debe prepararse previamente disolviendo la soda y el alcohol; es importante ser cuidadoso, ya que el agua puede incorporarse. El pretratamiento para eliminar los ácidos grasos libres consiste en la neutralización con NaOH, seguida de la separación de los jabones y fosfolípidos por precipitación y posterior centrifugación; posteriormente, se lava el aceite con agua para retirar los jabones residuales y, finalmente, se elimina la humedad por secado al vacío.

Transesterificación: una vez obtenida la materia prima, el proceso de fabricación de este producto resulta bastante sencillo desde el punto de vista técnico. El aceite se somete a un proceso denominado “transesterificación”, en el que se hidrolizan los enlaces éster de los triglicéridos, obteniendo nuevos ésteres con los ácidos grasos liberados en la hidrólisis y un alcohol sencillo que se utiliza como reactivo.



El proceso se realiza en presencia de un catalizador, normalmente sosa o potasa, y a una temperatura moderada de unos 60 °C. En realidad, se trata de algo muy parecido a la elaboración del jabón casero con el aceite que se reciclaba antiguamente. De hecho, durante la elaboración del biodiesel se obtiene el principal compuesto de estos jabones: la glicerina, que es un subproducto de gran valor añadido y con múltiples salidas comerciales en los sectores químico, agrario y alimentario. El rendimiento de este proceso productivo es alto: a partir de una tonelada de aceite, 156 kg de metanol y 9,2 kg de potasa se pueden obtener 956 kg de biodiesel y 178 kg de glicerina sin refinar, además de recuperar 23 kg de metanol.

Separación de los productos: los triglicéridos deben tener un valor ácido bajo y los materiales deben contener baja humedad. La adición de catalizadores de hidróxido de sodio compensa la alta acidez, pero el jabón resultante provoca un aumento de viscosidad o de formación de geles que interfieren en la reacción y en la separación del glicerol. Cuando no se dan estas condiciones los rendimientos de la reacción se reducen sustancialmente. El hidróxido y metóxido de sodio o de potasio deben mantener un grado de humedad bajo. Su contacto con el aire disminuye la efectividad del catalizador por su interacción con el dióxido de carbono y la humedad. La formación de éster etílico comparativamente es más difícil que la de éster metílico; especialmente, la formación de una emulsión estable durante la etanolólisis es un problema. El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para que haya transferencia de masa. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión. En la alcoholólisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. En cambio en la etanolólisis esta emulsión no es estable y complica mucho la separación y purificación de los ésteres etílicos.

La emulsión se debe en parte a la formación de monoglicéricos y diglicéricos intermedios, que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares.

Conclusiones

- La información generada brindó herramientas de análisis y fue importante para el diseño del sistema de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales de uso industrial y/o freído usados mediante la implementación de una planta a pequeña escala con una capacidad por lote de seis litros por hora.
- La etapa principal del proceso es la etanolisis que se desarrolla en fase líquida. Debido a las características de los compuestos, al inicio de la reacción se encuentran dos fases líquidas: el aceite y el alcohol, que con el transcurrir de la reacción se transforman en una mezcla cuasihomogénea debido al efecto emulsificante de los intermedios formados, los cuales por medio de una etanolisis catalítica básica reaccionan para obtener etil éster.
- Al final de la reacción, donde la concentración de los intermedios es baja, la mezcla nuevamente se separa en dos fases: una rica en biodiesel y otra en glicerina, jabones y sales de catalizador (KOH / NaOH).

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” – COLCIENCIAS por su apoyo a la investigación.

Referencias Bibliográficas

- FREEDMAN, B.; PRYDE, E. H.; MOUNTS, T. L. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *Journal of American Oils Chemist Society*, Vol. 61, No. 10, pág. 1638 – 1643. 1984.
- FUKUDA; KONDA y NODA. Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. En: *Journal of Bioscience and Bioengineering* Vol. 92, No. 5, 405-416. 2001.
- GONZÁLES S, Luis C. Manual de operación de la planta de biodiesel. 2006.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS -. ICONTEC NTC 5444. Biodiesel para uso en motores Diesel. 2006.
- KNOTHE, D. B. Biodiesel: The use of vegetable oils and their derivatives as alternative diesel fuels. Chapter 10: “Fuels and Chemicals from Biomass”. *Am. Chem. Ing. Soc.*, Washington, 1997.
- MITTELBACH, Martin. y TRITTHART, Peter. Diesel Fuel Derived from Vegetable oils, III. Emission Tests Using Methyl Esters of used Frying Oils. En: *Journal of the American Oil Chemists Society*. Vol. 67, No. 7; June, 1988.

- NARVÁEZ R., P. TORRES O., J. A.; SÁNCHEZ C., F. J. y PONCE DE LEÓN Q., L. F.
Influencia de la temperatura y el porcentaje del catalizador en la etanolisis del aceite de palma. *Revista Colombiana de Química*. ISSN 0120 2804, Vol. 33, pág. 109 – 115. 2005.
- NARVÁEZ R., P. TORRES O., J. A.; SÁNCHEZ C., F. J. y PONCE DE LEÓN Q., L. F.
Producción de esteres metílicos de ácidos grasos: variables asociadas al proceso de transformación. *Revista Ingeniería e Investigación*. ISSN 0120 5609, Vol. 55, pág. 41 - 50. 2004.
- NARVÁEZ R., P. TORRES O., J. A.; SÁNCHEZ C., F. J. y PONCE DE LEÓN Q., L. F.
Determinación cromatográfica de gases de alquil esteres de ácidos grasos. *Revista Ingeniería e Investigación*. ISSN 0120 5609, Vol. 57, pág. 58 - 62. 2004.
- QUIÑONES, Leonardo; MATEUS, Oscar. Dimensionamiento y Montaje de un Reactor Piloto para la Obtención de Biodiesel a partir de Aceites Vegetales Gastados. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá, Colombia, 2003.
- TORRES O., J. A.; PONCE DE LEÓN Q., L. F.; NARVÁEZ R., P. C. y SÁNCHEZ C., F. J.
Obtención de estearato de metilo derivado de estearina de palma hidrogenada. *Revista de Investigaciones*. Vol. 4, No.2, 150 – 162. 2005.
- TORRES O., J. A.; SANCHEZ C., F. J. y NARVAEZ R., P. C. Análisis del Proceso de Producción de Ésteres Metílicos. *Memorias XXII Congreso Colombiano de Ingeniería Química*. 13 – 18. ISSN 1692-925X. 2003.
- TORRES O., J. A.; RIVAS, A. I., LIZARAZO, F. y CASTAÑEDA, W. J. Oleoquímica, coyuntura de investigación y desarrollo en el área de aceites vegetales. *Memorias XXII Congreso Colombiano de Ingeniería Química*. 58 – 63. ISSN 1692-925X. 2003.
- ZAPATA, Carlos David, MARTÍNEZ, Iván Darío, ARENAS, Erika, HENAO, Carlos Andrés.
Producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma: 1. Diseño y simulación de dos procesos continuos. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia, 2006.