

Biodiesel, un combustible renovable

Biodiesel, a renewable fuel

Iliana Ernestina Medina Ramírez,¹ Norma Angélica Chávez Vela², Juan Jáuregui Rincón³

Revisión Científica

Medina Ramírez, I. E.; Chávez Vela, N. A.; Jáuregui Rincón, J., Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 55, 62-70, 2012.

RESUMEN

La sustitución de los combustibles denominados fósiles o tradicionales, derivados del petróleo, por otros, de origen biológico, representa uno de los grandes retos que enfrenta la humanidad actualmente. Una de las alternativas más factibles para reemplazar el diesel de petróleo es la producción de biodiesel. Éste es un combustible renovable derivado de aceites vegetales (comestibles o no comestibles; nuevos o usados) y grasas animales que posee propiedades similares a las del petróleo. Además, se ha encontrado que con el uso de biodiesel se logran reducir las emisiones de monóxido de carbono, azufre, hidrocarburos aromáticos y partículas sólidas. La manera convencional de sintetizar biodiesel es mediante la transesterificación de aceites vegetales con metanol y catálisis homogénea básica. El presente trabajo describe los fundamentos de la producción de biodiesel sintetizado a partir de aceites vegetales, grasas animales o aceites de reúso, además del análisis de la factibilidad técnica y económica de la producción del mismo.

Palabras clave: aceites vegetales, transesterificación, biodiesel, ésteres de ácidos grasos, condiciones de reacción

Key words: vegetable oils, transesterification, biodiesel, fatty acid alkyl esters, reaction conditions

Recibido: 6 de Junio de 2011, aceptado: 9 de Diciembre de 2011

¹ Departamento de Química, Centro de Ciencias Básicas, iemedina@correo.uaa.mx.

² Departamento de Ingeniería Bioquímica, Centro de Ciencias Básicas, nachavez@yahoo.es.

³ Departamento de Ingeniería Bioquímica, Centro de Ciencias Básicas, jjaureg@correo.uaa.mx.

ABSTRACT

The substitution of traditional petroleum-based diesel fuel for others of biological nature, represents nowadays one of the greatest scientific challenges. Biodiesel is a renewable fuel derived from vegetable oils (edibles or non edibles; new or used) with similar properties to petroleum-based diesel fuel. Besides, it has significantly lower emissions of carbon monoxide, sulfur, aromatic hydrocarbons and particulate matter. The most common way to produce biodiesel is by transesterification of vegetable oils with methanol and homogeneous basic catalysis. A technological and economic assessment on the fundamentals of biodiesel production from vegetable oils, animal fats or used vegetable oils is presented in this work.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, entre los principales problemas que enfrenta la humanidad, destacan el deterioro ambiental y la crisis energética. Una de las principales causas de la contaminación del aire es la quema de combustibles fósiles, ya que la combustión de los mismos produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno), óxidos de azufre, hidrocarburos no quemados y cenizas finas. Además, este recurso natural es una fuente energética no renovable y, a últimas fechas, se ha informado que las reservas mundiales tarde o temprano se agotarán. Se estima que el petróleo se acabará en 41 años, el gas natural en 63 años y el carbón en 218 años (Agarwal, 2007).

Por estas razones, hay interés en el desarrollo de fuentes de combustible alternativas y más limpias. Estudios recientes indican que existen otras fuentes energéticas, las cuales tienen emisiones extremadamente bajas y que parecen tener el potencial para convertirse en fuentes de sustitución de energía para la propulsión de automóviles, entre ellas destacan: alcoholes, gas natural, hidrógeno y biodiesel.

El biodiesel es un combustible líquido producido a partir de materias renovables, como los aceites vegetales o grasas animales, que actualmente sustituye parcial o totalmente al diesel de petróleo en los motores diesel. De acuerdo con algunas empresas en Estados Unidos, Francia, Alemania, Brasil y Argentina, que ya usan biodiesel, al incorporarlo a un motor convencional se reducen las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de azufre, hidrocarburos aromáticos y partículas sólidas (Islas *et al.*, 2007). Puede funcionar en cualquier motor diesel, y se presume que duplica la vida útil de los vehículos, no obstante, algunas de sus propiedades (alta viscosidad, baja volatilidad, menor poder calorífico, estabilidad a oxidación, etc.) deben ser mejoradas para poder lograr reemplazar a 100% el uso de combustibles fósiles.

Para lograr que el biodiesel se convierta en una alternativa energética real, se necesita que este producto no sólo presente características equivalentes a las del petrodiesel, sino también que en el conjunto de procesos de obtención, se consigan balances energéticos positivos y llegue al mercado con un costo similar al del diesel de petróleo. Actualmente, éste es el principal obstáculo para la comercialización del biodiesel. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América, el precio aproximado del biodiesel es de US\$ 0.5/l, contra US\$ 0.35/l del petrodiesel. La principal causa del elevado costo de este biocombustible radica en el empleo de aceites comestibles vírgenes para su producción; es por esto que recientemente se ha explorado la utilización de aceites reciclados o aceites no comestibles en la producción de biodiesel. Por ejemplo, en México, Chiapas es pionero en el uso de biodiesel en transporte público. Chiapas tiene establecidas 10 mil has de jatropha, con un potencial para producir hasta 12 mil litros de biodiesel al día en una planta. La planta chiapaneca de biodiesel (figura 1) cuenta con doble tecnología de punta para producir 20 mil litros de combustible al día.



Figura 1. La planta de biodiesel, ubicada en Puerto Chiapas, es la primera en el país en contar con el permiso de la Secretaría de Energía para la producción, almacenamiento y comercialización de ese biocombustible (imagen tomada de: www.huixtlaweb.com).

El biodiesel se describe químicamente como una mezcla de ésteres de alquilo (metilo y etilo, principalmente), con cadenas largas de ácidos grasos. Estas cadenas, al estar oxigenadas, le otorgan al motor una combustión mucho más limpia (Bosbaz, 2008). Este combustible puede utilizarse puro (B100, conocido como "gasol verde"), o en mezclas de diferentes concentraciones con el diesel de petróleo. La mezcla más utilizada en nuestros días es a 20%, es decir, 20 partes de biodiesel y 80 partes de petrodiesel. Cuando es utilizado como aditivo, sus concentraciones normalmente no superan 5%.

La idea de producir biocombustible a partir de aceites vegetales no es nueva. Rudolf Diesel en el año 1900 utilizó aceite de cacahuete para impulsar el motor que había construido. Sin embargo, en ese tiempo no se le dio mayor importancia a los biocombustibles, ya que se pensaba que los combustibles fósiles eran inagotables. En un discurso de 1912, Diesel dijo que "el uso de aceites vegetales como combustibles de motor puede parecer insignificante hoy, pero tales aceites pueden convertirse, en el transcurso del tiempo, tan importantes como el petróleo y los productos de alquitrán de hulla de la actualidad" (Kemp, 2006).

México, considerado como uno de los 10 mayores productores y exportadores de petróleo en el mundo, también experimenta actualmente un declive en la producción de crudo, por lo cual se debe de empezar a trabajar en el desarrollo de fuentes alternas de energía. En el año 2006 se

presentó a la Secretaría de Energía en México (SENER) un estudio sobre las posibilidades y viabilidad del uso del bioetanol y del biodiesel como combustibles para el transporte en México (Aca Aca *et al.*, 2009). Dicho reporte subraya que para lograr la producción de biodiesel a gran escala en México, se requiere de un esfuerzo importante en investigación y desarrollo. Considerando la relevancia y el interés que particularmente han cobrado los bioenergéticos en nuestro país, el 1 de febrero de 2008 fue publicado en el *Diario Oficial de la Federación* el decreto por el que se expide la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual contempla la elaboración del Programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico (SENER, 2009). Se recomienda que la producción y procesamiento de este combustible se haga con tecnología diseñada y construida localmente y evitar la importación directa de las plantas. Es importante destacar que se debe evitar la competencia por el uso de la tierra para fines de alimentación, o evitar la contaminación por el uso intensivo de fertilizantes químicos y pesticidas, enfatizar un enfoque agroecológico e impulsar los cultivos perennes (como la higuera o la jatropha) que permitan el uso de tierras de temporal y/o marginales, y aseguren una mayor cobertura del suelo para control de erosión.

Transesterificación de aceites vegetales

La manera más común de sintetizar biodiesel es mediante una reacción de transesterificación, en la cual un triglicérido reacciona con un alcohol (metanol, etanol, propanol o butanol) en presencia de un catalizador (figura 1). Debido a la naturaleza reversible de esta reacción, es recomendable emplear exceso de alcohol para con esto favorecer el equilibrio hacia la formación de biodiesel.

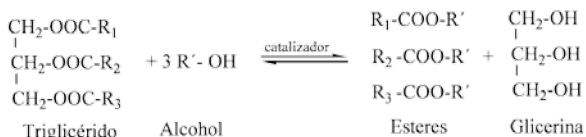


Figura 1. Reacción de transesterificación para la producción de biodiesel.

El producto recuperado se separa por reposo de dos fases para eliminar el glicerol. La mezcla restante, que es el biodiesel, se destila para quitar el excedente de alcohol para reciclado. Posteriormente, los ésteres son sometidos a procesos de purificación que consiste en el

lavado con agua, e inclusive secado al vacío y filtrado. Como resultante del proceso, se obtiene biodiesel, así como un subproducto conocido como glicerol, que tiene usos variados en la industria farmacéutica y cosmética. El proceso general para la obtención de biodiesel se encuentra esquematizado en la figura 2.

Las principales variables que afectan el rendimiento y pureza en términos de producción de biodiesel son: pureza de los reactivos empleados, tiempo de mezclado, temperatura de reacción, concentración y tipo de catalizador empleado y relación en masa de la cantidad de metanol y aceite empleados. En las siguientes secciones, discutiremos la manera en que estas variables afectan la reacción de transesterificación.

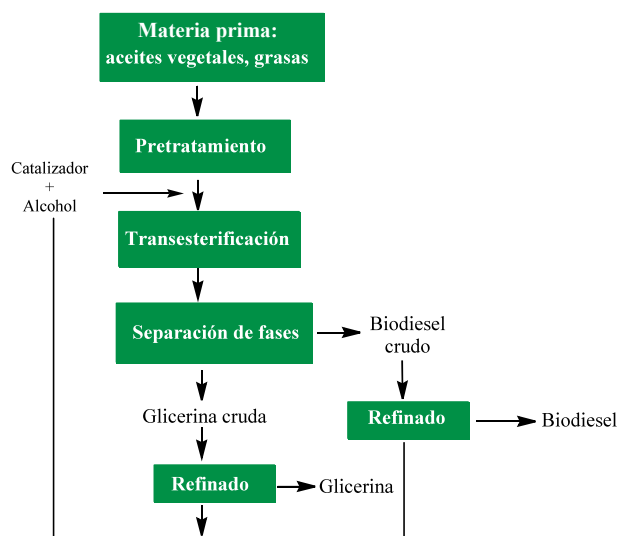


Figura 2. Representación esquemática del proceso general para la obtención de biodiesel.

Materias primas

La producción de biodiesel a partir de aceites vegetales refinados ha sido ampliamente explorada; no obstante, esta estrategia genera inquietud debido a que no se conoce el efecto que pueda producir sobre el sector agropecuario. Se estima que el crecimiento acelerado de la industria de biocombustible impondrá importantes demandas sobre los recursos de tierra y agua, al tiempo que las necesidades para la producción de alimentos también las requerirán. Adicionalmente, algunos autores han determinado que la materia prima representa aproximadamente entre 75% y 88% del costo total de producción

Tabla 1. Principales materias primas para la elaboración de biodiesel

Aceites vegetales convencionales	Aceites vegetales alternativos	Otras fuentes
Aceite de girasol Aceite de colza Aceite de soya Aceite de coco Aceite de palma	Aceite de <i>Brassica carinata</i> Aceite de <i>Cynara cardunculus</i> Aceite de <i>Camelina sativa</i> Aceite de <i>Crambe abyssinica</i> Aceite de <i>Pogianus</i> Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	Aceite de semillas modificadas genéticamente Grasas animales Aceites de fritura usados Aceites producidos por microorganismos y microcraalgas

del biodiesel, por lo que es necesario reducir estos costos para generar un producto competitivo en el mercado (Demirbas, 2008a). Para ello, se han buscado materias primas alternativas (tabla 1), las cuales produzcan biodiesel con características similares al producido de aceites vegetales refinados, pero eviten la competencia por el uso de la tierra para fines de alimentación. Cabe recalcar que entre las materias primas alternativas, destacan los *residuos* grasos animales y vegetales, los cuales son una materia prima barata, además de que con su utilización se evitan los costos de tratamiento como residuo (Sharma *et al.*, 2008). Japón, Estados Unidos de América y algunos países europeos han logrado producir cantidades importantes de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado. En algunos de estos países este combustible se utiliza en el transporte público.

Además de los aceites vegetales residuales, otras materias primas que han sido estudiadas son los aceites vegetales no comestibles y los aceites producidos por microorganismos (bacterias, levaduras y algas). Las levaduras y bacterias del grupo actinomicetos son capaces de sintetizar triglicéridos intracelulares, bajo ciertas condiciones de cultivo, hasta en 80% de su peso seco, utilizando diversas fuentes de carbono (azúcares, ácidos orgánicos, alcoholes y aceites, entre otras) (Kosa and Ragauskas, 2011). Este proceso es costoso, ya que estos microorganismos requieren un alto consumo de oxígeno. En contraste, las microalgas representan una alternativa más conveniente que cualquier otro tipo de organismo para la producción de triacilglicéridos y su conversión a biodiesel, ya que son las plantas con el crecimiento más rápido en el mundo, es posible cultivarlas durante todo el año, su cultivo no requiere ni tierras arables ni agua limpia, en ciertos casos la composición de lípidos puede ser regulada a través de la adición o restricción de ciertos componentes de la dieta y, finalmente, su rendimiento es mucho más alto que el de cualquier otro cultivo (Demirbas, 2011; Chen,

et al., 2011). La empresa GreenFuel Technologies, considerada como una de las principales en materia de cultivo de algas, estima el rendimiento en biodiesel de un cultivo de algas en más de 50,000 litros por hectárea y año. En términos comparativos, el rendimiento en biodiesel producido a partir de aceite de palma alcanza unos 5,000 litros/ha/año.

Alcohol

El alcohol es el principal insumo para la producción de biodiesel. Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiesel son metanol y etanol, aunque, se pueden utilizar otros alcoholes –propanol, isopropanol, butanol y pentanol–, pero éstos son mucho más sensibles a la contaminación con agua, la cual inhibe la reacción. Pese a su naturaleza tóxica, el metanol es el alcohol más utilizado debido a su alta reactividad y bajo costo; además, los ésteres de metilo presentan mejores propiedades (menor viscosidad, punto de nube a temperaturas más bajas, por ejemplo) de acuerdo a las necesidades de los motores, en comparación de los ésteres producidos con alcoholes superiores (Demirbas, 2008b).

Pretratamiento del aceite

Previo a la utilización de residuos grasos y/o aceites no convencionales en la producción de biodiesel, es necesario determinar sus propiedades fisicoquímicas –contenido de ácidos grasos libres (AGL) y humedad, principalmente–, a fin de evitar la presencia de impurezas que interfieren en la reacción de transesterificación. Por esto, dichas materias primas, dependiendo de sus características, deben ser sometidas a un pretratamiento, el cual puede consistir en uno o más de los siguientes procesos: desgomado (eliminación de fosfolípidos), neutralización (eliminación de AGL), esterificación ácida (formación de ésteres a partir de AGL cuando la acidez es mayor a 5%), winterización (separación en frío de estearinas, ceras y esteroides), lavado (eliminar residuos de la neu-

tralización) y secado (eliminar agua usando un evaporador al vacío). Para los aceites reciclados, los métodos de pretratamiento más usados son: sedimentación, neutralización, cromatografía en columna (constituida por partes iguales de sílica-to de magnesio y óxido de aluminio) y evaporación al vacío (Kulkarni y Dalai, 2006).

Actualmente, el pretratamiento de las materias primas se puede realizar mediante el empleo de una nueva tecnología a base de resina de intercambio iónico, AMBERSEP BD19 fabricada por Rohm and Haas, la cual permite purificar la materia prima (principalmente cuando se emplean fuentes no convencionales). El pretratamiento consiste en hacer pasar los aceites a través de una columna empacada con dicha resina; con este tratamiento se logran remover proteínas, fosfolípidos, especies iónicas, AGL, etc. Se ha reportado que el uso de esta tecnología contribuye a disminuir la complejidad y costo del proceso de pretratamiento, además de incrementar la eficiencia del mismo (Berríos y Skelton, 2008).

Variables que afectan la reacción de esterificación

Contenido de ácidos grasos libres

La composición química de un aceite vegetal es un aspecto relevante que debe de ser considerado al momento de elegir materia prima para la producción de biodiesel, ya que la composición de ésta determinará las propiedades del producto obtenido; asimismo, determinará el tipo de pretratamiento al que debe ser sometido el aceite previo a la reacción de transesterificación.

En últimas fechas ha cobrado gran interés el reciclaje de aceites quemados de cocina en la producción de biodiesel. Las propiedades físicoquímicas de los aceites frescos y los aceites quemados son muy parecidas, excepto en su contenido de agua y de ácidos grasos libres. Los aceites y grasas son susceptibles de enranciarse o descomponerse durante el proceso de freído. Dicha descomposición se debe a la ruptura del enlace glicerol-ácido graso, lo que conduce a la aparición de ácidos grasos libres y de color en el aceite. A pesar de los cambios sufridos por el aceite durante el proceso de freído, éstos aún pueden ser utilizados en la producción de biodiesel; sin embargo, el alto contenido de AGL y agua contribuyen a disminuir la eficiencia de la reacción de transesterificación.

Se estima que el contenido de AGL en un aceite debe ser $\leq 2\%$, esto con el fin de evitar la

reacción de los mismos con el catalizador básico, lo cual conduciría a la formación de jabones. Para aceites con elevado contenido de AGL se recomienda una esterificación ácida previa a la reacción de transesterificación básica (Corro *et al.*, 2011).

Contenido de agua

Se ha encontrado que en la reacción de transesterificación la humedad favorece el proceso de saponificación, disminuyendo, por tanto, el rendimiento de la reacción. Además, el jabón resultante de la saponificación provoca un aumento de viscosidad o de formación de geles que interfieren en la reacción y en la separación del glicerol. Para obtener rendimientos altos, el alcohol y catalizador deben ser anhidros (Canakci y Van Gerpen, 2001).

En la catálisis biológica, la humedad no promueve la reacción de saponificación debido a la alta especificidad de las enzimas. Tamalampudi *et al.* (2008) reportan que con humedades de 0.5 y 10% en la transesterificación de aceite de jatropha con la lipasa inmovilizada del *R. oryzae* se alcanzaron rendimientos de 80 y 60%, respectivamente. Resultados similares se reportaron cuando se transesterificó aceite de jatropha y aceite de soya con *P. cepacia*, lo cual indica que el rendimiento aumenta hasta un valor límite cuando se incrementa el contenido de agua. Este aumento se explica debido a que algunas lipasas requieren de la interfase agua-aceite para iniciar su actividad catalítica (Ranganathan *et al.*, 2008). Sin embargo, un incremento en el contenido de agua por encima del valor límite reduce la formación de ésteres debido a que las lipasas en medios muy acuosos favorecen la reacción de hidrólisis (Rojas *et al.*, 2010).

Relación molar de reactivos empleados

Una de las variables más importantes que afecta los rendimientos de los ésteres es la relación molar alcohol-triglicérido. La proporción estequiométrica requerida es de tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido para producir tres moles del éster del ácido graso y un mol de glicerol. Sin embargo, debido a la reversibilidad del proceso, se requiere un exceso de alcohol para favorecer la reacción a la producción de ésteres. Si la cantidad de alcohol no es suficiente, el producto contendrá monoglicéridos y diglicéridos (productos intermedios de la transesterificación), los cuales cristalizan muy fácilmente en el biodiesel y pueden causar taponamiento de los filtros y

otros problemas en el motor. Se ha reportado que para una conversión máxima se debe utilizar una relación molar de 6:1, ya que un valor más alto de relación molar de alcohol afecta a la separación de glicerina debido al incremento de solubilidad (Marchetti *et al.*, 2007). En el caso del etanol, algunos estudios indican que una razón molar de 9:1 es más apropiada. Estudios de la transesterificación de aceite de cynara con etanol obtienen los mejores resultados con relaciones molares entre 9:1 y 12:1 (Rojas *et al.*, 2009). La catálisis ácida requiere mayor relación molar que la catálisis básica; Veljkovic (2006) reporta una relación molar de 18:1 en la transesterificación de aceite de tabaco.

Catalizadores

Es necesario contar con catalizadores para que ocurra la reacción que produce el biodiesel y sea posible desde un punto de vista cinético. Estos catalizadores pueden ser ácidos (homogéneos o heterogéneos), básicos (homogéneos o heterogéneos) o enzimáticos, siendo los catalizadores básicos los que se utilizan a nivel industrial en la transesterificación, ya que actúan mucho más rápido y, además, permiten operar en condiciones moderadas (Sharma *et al.*, 2008). Entre los catalizadores básicos homogéneos, el NaOH y KOH son los más empleados. A pesar de que estos catalizadores son económicos y presentan elevados porcentajes de conversión, su uso conlleva a complejos procesos de purificación del producto (biodiesel), además de ser altamente corrosivos. En últimas fechas se ha observado que el empleo de alcóxidos simplifica el proceso general de producción de biodiesel, además de que incrementa la eficiencia del mismo. Los alcóxidos se producen al hacer reaccionar el hidróxido metálico (NaOH o KOH) con el alcohol previo a su mezclado con el triglicérido. A esta etapa algunos autores la denominan como fase de activación del catalizador (figura 3).

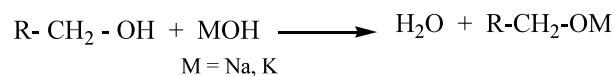


Figura 3. Reacción de formación de alcóxidos.

La catálisis ácida no ha sido ampliamente explorada debido a sus prologados tiempos de reacción. No obstante, cuando la materia prima empleada contiene alto porcentaje de ácidos

grasos libres, la catálisis ácida es la mejor opción para la producción de biodiesel. El catalizador más empleado es el ácido sulfúrico (H₂SO₄). Se ha reportado que empleando 1 mol% de H₂SO₄ se puede alcanzar una conversión de 99% en un lapso de 50 horas (Marchetti *et al.*, 2007).

Por otra parte, la catálisis enzimática se ha explorado recientemente y se ha observado que se pueden obtener resultados relevantes en sistemas tanto acuosos como no acuosos. Se menciona que las principales ventajas en el uso de catalizadores enzimáticos son las siguientes: debido a que el catalizador no es sensible a la presencia de agua y AGL pueden ser usadas materias primas de menor calidad; el glicerol se puede separar fácilmente y, también, los AGL contenidos en el aceite se pueden convertir en ésteres alquílicos. La principal desventaja de la catálisis enzimática es su elevado costo (Lam *et al.*, 2010).

Una opción que se ha explorado en últimas fechas es el empleo de catalizadores heterogéneos, tanto básicos como ácidos. Las principales ventajas de estos catalizadores son: simplificación del proceso de purificación del biodiesel, reutilización del catalizador y la posibilidad de llevar a cabo simultáneamente las reacciones de transesterificación y esterificación. También existen reportes que remarcan la eficiencia de la catálisis heterogénea en comparación con la homogénea, ya que se observó que para la producción de 8,000 toneladas de biodiesel fue necesario emplear 88 toneladas de hidróxido de sodio, mientras que sólo se requirieron 5.7 toneladas de óxido de magnesio soportado para producir 100,000 toneladas de biodiesel (Semwal *et al.*, 2011).

La principal desventaja en el uso de catálisis heterogénea es la limitada difusión de los reactivos a la superficie del catalizador. No obstante, este problema se ha resuelto en últimas fechas mediante el empleo de nano-catalizadores sólidos, o bien, usando un co-solvente que facilite la transferencia de reactivos a la superficie del catalizador. Los catalizadores heterogéneos más comúnmente empleados son: hidróxidos metálicos (calcio y bario), óxidos metálicos, zeolitas, hidrotalcitas, etc. En la tabla 2 se resumen las principales características de la catálisis homogénea y heterogénea en la producción de biodiesel.

Tabla 2. Comparación de las variables que afectan la producción de biodiesel empleando diferentes tipos de catalizadores

Variable	Catálisis Homogénea			Catálisis Heterogénea		
	Básica	Ácida	Enzimática	Básica	Ácida	Enzimática**
Temperatura (°C)	60-70	55-80	30-40	60 -70	150-200	50
Ácidos grasos libres	Producción de jabones	Producción de ésteres	Producción de ésteres	*	Producción de ésteres	Producción de ésteres
Agua	Interfiere en la reacción	Interfiere en la reacción	No afecta	*	Interfiere en la reacción	No afecta
Rendimiento	Bueno	Bueno	Muy Bueno	Bueno		Bueno
Purificación	Tediosa	Tediosa	Simple	Simple	Simple	Simple
Costo	Barato	Barato	Caro	Barato	Barato	Caro

Nota: * Algunos autores reportan inhibición de sitios activos del catalizador por adsorción de agua y/o ácidos grasos libres. ** Se ha observado inhibición enzimática por metanol.

Temperatura de reacción

La reacción de transesterificación, por lo general, se lleva a cabo a la temperatura de ebullición del metanol; aunque existen reportes a más bajas temperaturas, generalmente se observa que el realizar esta reacción a reflujo favorece la formación de ésteres de metilo (Sharma y Singh, 2009). También existen reportes en los que se señala el uso de fluidos supercríticos o reacciones a presiones elevadas para la síntesis de biodiesel; esta variación permite llevar a cabo la reacción a temperaturas elevadas (de hasta 300°C), lo que disminuye considerablemente el tiempo de reacción (15 o 20 minutos). Sin embargo, el costo de los reactores y la seguridad del operador son dos de las principales limitantes de esta metodología (Huber *et al.*, 2006).

Agitación

A nivel laboratorio, la agitación magnética es la más comúnmente empleada. No se puede hablar de una velocidad óptima de agitación para la reacción, ya que mientras algunos autores reportan velocidades óptimas de 300 rpm, otros señalan que se logran mejores resultados a velocidades de 1,100 rpm (Sharma y Singh, 2009). A nivel planta piloto, la agitación mecánica se usa con mayor frecuencia. No existen hasta el momento parámetros establecidos referentes a la velocidad de agitación; no obstante, es importante resaltar que esta variable, generalmente, se ajusta con base en las condiciones de reacción, de tal manera que se asegure un mezclado uniforme de los componentes de la reacción (Sharma *et al.*, 2008).

Purificación

Posterior a la transesterificación y la separación de las dos fases (biodiesel y glicerol), se requiere de un proceso de purificación para asegurar que el biodiesel cumpla con los estándares de calidad exigidos, pues éste aún contiene impurezas derivadas del proceso: parte del metanol en exceso, pequeñas cantidades de agua y glicerol, posiblemente jabones y trazas de catalizador.

Existen dos procesos de purificación. Generalmente, los ésteres de metilo se someten a temperatura y vacío para evaporar el metanol y recuperarlo, y luego son llevados a un proceso de lavado para separar todas las impurezas. En el caso particular de catálisis básica homogénea, el lavado se realiza con agua acidulada (con ácido fosfórico o ácido cítrico) que se mezcla con el biodiesel. El ácido neutraliza el catalizador residual presente y separa los jabones que se puedan haber formado en la reacción. Los jabones se convierten en ácidos grasos libres (que se quedan en el biodiesel) y en sales solubles en agua (Van Gerpen, 2005). De esta manera, el agua de lavado arrastra los restos de catalizador, jabón, sales, glicerina y metanol. Este lavado se realiza al menos dos veces con agua nueva cada vez, hasta que se haya eliminado todo el catalizador residual y el efluente tenga un color claro. Finalmente, los ésteres de metilo lavados se secan (con calor y vacío) para separar toda el agua restante y se filtran. El producto de este proceso es el biodiesel terminado.

En últimas fechas salió a la venta una resina de intercambio iónico llamada Amberlite BD10. Esta resina fue diseñada especialmente para simplificar y optimizar el proceso de purificación del biodiesel. El uso de esta tecnología presenta las siguientes ventajas: no requiere agua, maximiza los rendimientos, no requiere de filtros caros, 1 kg de resina puede tratar de 900 a 1,600 kg de biodiesel, de fácil mantenimiento, el sistema se puede integrar fácilmente a los procesos ya existentes (tanto batch como continuo), fácil de usar y automatizar, el biodiesel purificado de esta manera cumple fácilmente con los estándares de ASTM D-6751-06 y EN14212, se logra recuperar completamente el metanol y la purificación se lleva a cabo a temperatura ambiente.

CONCLUSIONES

La implementación de rutas sintéticas para la producción de biodiesel es un tema que ha despertado gran interés en últimas fechas, ya que este biocombustible, además de ser el óptimo candidato para reemplazar los hidrocarburos fósiles, es renovable y ambientalmente benigno.

A pesar de que en la literatura existen numerosos reportes relacionados con la síntesis de este biocombustible, la industrialización del proceso está aún limitada debido a los costos globales en la producción del mismo; es por esto que existe la necesidad de implementar un proceso a nivel industrial económicamente viable.

Los aceites vegetales usados son una buena alternativa para disminuir considerablemente los costos de producción; sin embargo, las propiedades fisicoquímicas de estos aceites demandan el uso de un catalizador que permita obtener niveles altos de conversión de la reacción de transesterificación, aún en presencia de aceites con una acidez relativamente alta. Además de altos rendimientos, se debe garantizar que el biodiesel obtenido cumpla con las especificaciones técnicas de acuerdo con las normas nacionales e internacionales. Hoy en día, la catálisis heterogénea (básica, ácida o enzimática) se sitúa como una de las mejores opciones para lograr la industrialización de este proceso, ya que su uso conlleva el reciclaje del catalizador y facilita el proceso de separación y purificación del producto.

LITERATURA CITADA

- ACA, M.G.; CAMPOS GONZÁLEZ, E.; SÁNCHEZ DAZA, O., Estimación de propiedades termodinámicas de los compuestos involucrados en la producción de biodiesel. *Superficies y vacío*, 22(3): 15-19, 2009.
- AGARWAL, A.K., Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in energy and combustion science*, 33(3): 233-271, 2007.
- BERRÍOS, M.; SKELTON, R. Comparison of purification methods for biodiesel. *Chem. Eng. J.*, 144(3): 459-465, 2008.
- BOZBAS, K., Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, 12: 542-552, 2008.
- CANAKCI, M.; VAN GERPEN, J., Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. *Trans. Am. Soc. Agricult. Eng.*, 44(6): 1429-1436, 2001.
- CORRO, G.; TELLEZ, N.; JIMÉNEZ, T.; TAPIA, A.; BAÑUELOS, F.; VÁZQUEZ CUCHILLO, O., Biodiesel from waste frying oil. Two step process using acidified SiO₂ for esterification step. *Catalysis Today*, 166(1): 116-122, 2011.
- CHEN, C.; YEH, K.; AISYAH, R.; LEE, D.; CHANG, J., Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102: 71-81, 2011.
- DEMIRBAS, A., *Biodiesel: a realistic fuel alternative for diesel engines*. Londres: Springer-Verlag, 2008a.
- DEMIRBAS, A., Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels. *Fuel*, 87: 1743-1748, 2008b.
- DEMIRBAS, M.F., Biofuels from algae for sustainable development. *Applied Energy*, In Press, 2011.
- HUBER, G.W.; IBORRA, S.; CORMA, A., Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering. *Chem. Rev.*, 106: 4044-4098, 2006.
- ISLAS, J.; MANZINI, F.; MANSERA, O., A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*, 32: 2306-2320, 2007.

- KEMP, W., *Biodiesel: basics and beyond*. Canada: Aztext press, 2006.
- KOSA, M.; RAGAUSKAS, A.J., Lipids from heterotrophic microbes: advances in metabolism research. *Trends in Biotechnology*, 29(2): 53-61, 2011.
- KULKARNI, M.G.; DALAI, A.K., Waste Cooking Oils. An Economical Source for Biodiesel: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45: 2901-2913, 2006.
- LAM, M.K.; LEE, K.T.; MOHAMED, A.R., Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A Review. *Biotechnology Advances*, 28: 500-518, 2010.
- MARCHETTI, J.M.; MIGUEL, V.U.; ERRAZU, A.F., Possible methods for biodiesel production. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11: 1300-1311, 2007.
- RANGANATHAN, S.; NORASINHAN, S.; MUTHUKUMAR, V., An overview of enzymatic production of biodiesel. *Bioresource technology*, 99: 3975-3981, 2008.
- ROJAS GONZÁLEZ, A.; GIRÓN GALLEGO, E.; CASTAÑEDA TORRES, H., Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión – catálisis enzimática. *Ingeniería e Investigación*, 30(1): 17-21, 2010.
- ROJAS GONZÁLEZ, A.; GIRÓN GALLEGO, E.; CASTAÑEDA TORRES, H., Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión – catálisis química. *Ingeniería e Investigación*, 29(3): 17-22, 2009.
- SENER, *Estrategia Intersecretarial de los bioenergéticos*. México: Gobierno Federal, 2008.
- SENER, *Programa de introducción de bioenergéticos*. México: Gobierno Federal, 2009.
- SEMWAL, S.; ARORA, A.K.; BADONI, R.P.; TULI, D.K., Biodiesel production using heterogeneous catalysts. *Bioresource Technology*, 102: 2151-2161, 2011.
- SHARMA, Y.C.; SINGH, B.; UPADHYAY, S.N., Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. *Fuel*, 87: 2355-2373, 2008.
- SHARMA, Y.C.; SINGH, B., Development of biodiesel: Current scenario. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7): 1646-1651, 2009.
- TAMALAMPUDI, S.; TALUKDER, M.; HAMA, S.; NUMATA, T.; KONDO, A.; FUKUDA, H., Enzymatic production of biodiesel from Jatropha oil: a comparative study of immobilized-whole cell and commercial lipases as a biocatalyst. *Biochem. Eng. J.*, 39(1): 185-189, 2008.
- VAN GERPEN, J., Biodiesel processing and production. *Fuel processing technology*, 86: 1097-1107, 2005.
- VELJKOVIC, V.B.; LAKICEVIC, S.H.; STAMENKOVICS, O.S.; TODOROVIC, Z.B.; LAZIC, M.L., Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seed oil with a high content of free fatty acids. *Fuel*, 85: 2671-2675, 2006.