



Ecuador – diciembre 2017 - ISSN: 1696-8352

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES DE COCINA USADOS

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE PROCESS OF TRANSESTERIFICATION AT THE PRODUCTION OF BIODIESEL FROM USED KITCHEN OILS

Sayuri Monserrath Bonilla Novillo

Docente. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
Riobamba - Ecuador

Ingeniera Mecánica, Magister en Gestión Industrial y Sistemas Productivos
smbonilla@esPOCH.edu.ec / sayitomonse@hotmail.com

Jaime Iván Acosta Velarde

Docente. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
Riobamba - Ecuador

Ingeniera Industrial, Magister en Ingeniería Industrial y Producción
Ivan74acosta@yahoo.es

Gloria Elizabeth Miño Cascante

Vicerrectora Académica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba - Ecuador

Phd. en Ciencias Económicas, Magíster en Dirección de Empresas Mención Proyectos, Magister en Docencia
Universitaria e Investigación Educativa
gmino@esPOCH.edu.ec / gloriamino@yahoo.es

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Sayuri Monserrath Bonilla Novillo, Jaime Iván Acosta Velarde y Gloria Elizabeth Miño Cascante (2017): "Análisis de los factores que influyen en el proceso de transesterificación para la producción de biodiesel a partir de aceites de cocina usados.", Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, Ecuador, (diciembre 2017). En línea:

<http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/ec/2017/produccion-biodiesel.html>

RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis de cada uno de los factores que intervienen en el proceso de transesterificación de aceites de cocina usados para la producción de biodiesel, siendo los más importantes: el contenido de aceite, contenido de ácidos grasos libres (AGL), tipo de alcohol, relación molar alcohol-aceite, tipo y concentración de catalizador, temperatura, tiempo de reacción e intensidad de mezclado; llegando a obtener que para una transesterificación con catalizadores básicos se pueden alcanzar rendimientos de 98 % utilizando: un porcentaje de AGL o índice de acidez menor al 1%, aplicando metanol con una relación molar alcohol aceite de 12:1, utilizando KOH como catalizador, a una concentración del 1% con una temperatura de 60°C y un tiempo de reacción de 120 minutos. Se determinó que el factor que más efectos tiene en el proceso de transesterificación es el índice de acidez puesto que los aceites han sido reutilizados con varias bases tienen un alto contenido de AGL, para

dicho proceso resulta necesario realizar una pre-fase llamada esterificación, mediante la cual se logra reducir el nivel de acidez y así obtener un biodiesel de alto rendimiento, que además contribuye al cuidado del medio ambiente. El proceso de producción mediante transesterificación resulta el más económico por los equipos y elementos utilizados, con lo cual se garantiza una producción más efectiva y eficaz.

Palabras Clave: producción – biodiesel - aceite de cocina usado - transesterificación - catalizador

ABSTRACT

This work presents the analysis of each of the factors involved in the transesterification process of cooking oils used for the production of biodiesel, the most important being oil content, free fatty acid content (FFA), alcohol type, alcohol-oil molar ratio, catalyst type and concentration, temperature, reaction time and mixing intensity; To have a percentage of acidity less than 1%, applying methanol with an alcohol ratio of 12: 1, using KOH as catalyst, obtaining a parameter for transesterification with basic catalysts. a concentration of 1% with a temperature of 60 ° C and a reaction time of 120 minutes. It was determined that the factor that has the most effects in the transesterification process is the acidity index that the oils have been reused with several bases have a high content of FFA, to say the resulting process it is necessary to carry out a previous phase esterification of the call, by which it was possible to reduce the level of acidity and thus obtain a biodiesel of high performance, which also contributes to the care of the environment. The production process through transesterification is the most economical for the equipment and elements used, which ensures a more effective and efficient production.

Keywords: production – biodiesel - wased cooking oil – transesterification – catalyst.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el petróleo es la fuente de energía más importante en la mayoría de los países. Gracias a su múltiple aplicación en los combustibles, actividad industrial, agrícola, farmacéutica, transporte, entre otros; se ha convertido en el motor del desarrollo económico de muchos países.

En los últimos años ha sido cuestionado el gran porcentaje de contaminación ambiental que ha generado, contribuyendo al calentamiento global. Esta es una de las principales razones por las que se han venido desarrollando procesos de obtención de combustible biodegradable, conocido biodiesel, a partir de recursos de la biomasa tales como aceites vegetales y grasas animales. (Angulo, Cardoso, & Castellar, 2014).

Un alto porcentaje de los vehículos que circulan en nuestro país utilizan en un cien por ciento, como fuente de energía, la combustión de elementos de origen orgánico (combustibles fósiles), este sistema de obtención de energía tiene como principal dificultad dos aspectos resaltables, estos compuestos provienen de fuentes finitas y no renovables, y la contaminación que produce el proceso químico de inflamación.

La velocidad de consumo de las reservas de petróleo y gas natural es acelerada debido al aumento del parque automotor a nivel mundial, y en el ámbito local este fenómeno no deja de ser igualmente importante, pues la ciudad de Riobamba presenta un número elevado de vehículos que circulan en sus calles, existiendo gases contaminantes como Dióxido de Carbono (CO₂), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), y Dióxido de Azufre(SO₂), que afectan considerablemente al ambiente. (Chamarravi, O & Saavedra, G., 2013)

Tomando en cuenta que es factible la obtención de nuevos combustibles a partir de desechos orgánicos, como es el aceite vegetal, y que adicionalmente en nuestra ciudad no existe un proceso adecuado de tratamiento o desecho de estos residuos, se puede considerar necesario el estudio de factibilidad de transformar, los restos de aceite vegetal provenientes en primer lugar provenientes de restaurantes o sitios de comida rápida, en biocombustibles, en este caso específico biodiesel, aplicable a maquinaria pesada.

“El biodiesel es un combustible líquido similar al diésel derivado del petróleo en propiedades de combustión, pero esencialmente libre de azufre, por lo que es un combustible más limpio” (Cantrell, Gillie, Lee, & Wilson, 2005). Este biocombustible no es tóxico y aporta el triple de la energía que necesita para su producción.

“Las propiedades del biodiesel se determinan por la cantidad de cada ácido graso presente en la molécula del triglicérido (longitud de cadena y el número de dobles enlaces), y estos tienen una implicación directa en las propiedades físicas del biodiesel” (Moreira, 2012). La reacción que se utiliza para obtener biodiesel es la transesterificación de aceites vegetales que consiste en transformar triglicéridos en alquil-ésteres en presencia de un alcohol de bajo peso molecular como metanol o etanol, utilizando un catalizador que puede ser homogéneo (NaOH, KOH, H_2SO_4) o en presencia de catalizadores heterogéneos como enzimas, óxidos metálicos o carbonatos (Rojas, Gallegos, & Torres, 2010), obteniéndose glicerina como subproducto. La glicerina puede utilizarse en otras industrias como la farmacéutica, de detergentes, etcétera. (García, 2012).

En cuanto a las materias primas, en Austria, Alemania y algunos países de Europa principalmente las semillas girasol y colza. En Estados Unidos y Argentina se utiliza la soja. En Malasia, Indonesia y Algunos países de América Latina se utilizan el aceite de palma. Otra materia prima que en los últimos años ha estado sujeta a numerosas investigaciones por su bajo precio es el aceite de frituras usado. El aceite de cocina usado está siendo considerado el biocombustible del futuro, ya que permite reducir costos y a su vez disminuir la contaminación en las zonas donde son desechados este tipo de aceites.

En los restaurantes, hoteles, cafeterías incluso en los mismos hogares se utiliza dos, tres hasta cinco veces el aceite de cocina y después sólo se lo desecha, el objetivo es crear conciencia en la sociedad y que empiecen a reciclar los aceites usados ya que esta alternativa de generar biodiesel es un beneficio para todos.

El objetivo de la investigación es determinar las variables que tienen mayor influencia en el proceso de transesterificación de aceites de cocina usados y su relación con el rendimiento del biodiesel obtenido. Se realiza una comparación entre los estudios recolectados llegando a determinar los valores de cada una de las variables que generan el mayor rendimiento del biodiesel.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los métodos utilizados en este trabajo son: deductivo, análisis y síntesis.

. Método deductivo, pues a partir de la información general del proceso de transesterificación obtenida de investigaciones con resultados válidos, se llegó a conclusiones particulares con respecto a cada una de los factores que intervienen en dicho proceso.

. Método de análisis, se estudió de forma individual cada uno de los factores que intervienen en el proceso de transesterificación, así como las relaciones que existen entre ellos.

. Método de Síntesis, analizados cada uno de los factores de forma individual, se los unió para conformar un todo y obtener un resultado total.

La metodología desarrollada se describe a continuación:

1. Recolección de la información

a. Se realizó una búsqueda de información en bases de datos científicas como Scopus, Scielo, en revistas científicas y tesis de postgrado.

b. Como estrategia para la búsqueda de información se utilizó las palabras claves tales como: biodiesel, transesterificación, catalizadores, aceite de cocina usado que sirvieron para encontrar la información exacta para realizar el estudio.

2. Muestreo

Con las palabras claves se encontraron en las bases de datos un total de 85 artículos científicos y 5 tesis de postgrado, de los cuales se seleccionaron 25 artículos, los cuales tenían la información más relevante con relación al tema a analizar

3. Análisis de la Información

Se procedió a realizar un análisis de cada una de las referencias bibliográficas, extrayendo la información más relevante en relación a los procesos de obtención de biodiesel a partir de aceite de palma, soya y aceite de frituras usados; en dónde se consideró algunos aspectos tales como: características de las materias primas, los procesos de transesterificación, los factores que afectan al proceso tales como: contenido de aceite, cantidad de ácidos grasos libres.

4. Evaluación comparativa

Se realizó una evaluación comparativa de los resultados obtenidos al aplicar transesterificación y cómo influyen los factores del proceso en el porcentaje de rendimiento del biodiesel.

3. DESARROLLO

3.1. BIODIESEL.CONTEXTO GENERAL

El biodiesel es un combustible muy similar al aceite diésel en propiedades pero con la gran diferencia de que es renovable ya que se obtiene a partir de aceites vegetales como: soja, maní, palma, colza, canola, entre los principales; al igual que de grasas animales. Actualmente la mayor producción de biodiesel se obtiene a partir de aceites de origen vegetal; principalmente de: soja, colza y palma. De estos tres cultivos proviene el 76% de la oferta mundial de aceites. Mientras que el 24% restante se obtiene de: maní, algodón, oliva y girasol. (Barón, Huertas, & Orejuela, 2013)

El uso de aceites vegetales en la producción de biodiesel tiene grandes ventajas. Las plantas oleaginosas pueden cultivarse en la mayoría de países en el mundo. Otra ventaja es que son renovables ya que pueden cosecharse durante todo el año y el biodiesel que se obtiene es "verde" ya que no contiene azufre o si lo contiene es en menor porcentaje que el diésel de petróleo. (Angulo, Cardoso, & Castellar, 2014)

Algunos inconvenientes que presenta se encuentran: la alta viscosidad del biodiesel obtenido, la baja volatilidad y reactividad de las cadenas de hidrocarburos insaturados y para el crecimiento de las plantas se requiere de la explotación de grandes extensiones de tierra, esto puede provocar el aumento de los precios de algunos alimentos debido a la demanda de biodiesel. (Angulo, Cardoso, & Castellar, 2014)

"El biodiesel es un líquido de color amarillo-ámbar, con una viscosidad similar a la del diésel de petróleo, no es inflamable, no es explosivo, con un punto de inflamación superior comparado con el diésel de petróleo, es biodegradable, disminuye significativamente las emisiones de gases tóxicos y de otras sustancias volátiles cuando se quema como combustible" (Angulo, Cardoso, & Castellar, 2014)

3.2. OBTENCIÓN DE BIODIESEL

El biodiesel es una mezcla de ésteres de alquilo (metilo, etilo), los cuales contienen largas cadenas de ácidos grasos obtenidos típicamente a partir de recursos biológicos no tóxicos,

tales como los aceites vegetales, las grasas animales e incluso aceite de cocina usado en la producción de biodiesel y sus propiedades fisicoquímicas. Hay cuatro formas principales de transformación: dilución, pirolisis (craqueo térmico), micro-emulsiones y transesterificación. (Niraj, Varun & SantRam, 2013)

3.2.1. Dilución

En este método de obtención se utiliza el aceite mezclado con gasóleo mineral, lo cual tiene como ventajas su naturaleza líquida y portable, se lo encuentra fácilmente disponible; los inconvenientes que presenta son: mayor viscosidad, baja volatilidad y reactividad de las cadenas de hidrocarburos insaturadas.

Al diluir los aceites vegetales con solventes se logra disminuir su viscosidad así como también se resuelve algunos problemas de rendimiento de los motores de combustión interna como la formación de coque de inyección y depósitos de carbón. La viscosidad del aceite se puede reducir mediante la mezcla con etanol puro.

Problemas de utilización en motores:

- Formación de coque
- Depósitos de carbono
- Formación de un anillo de lubricación adherente en el cilindro de los motores
- Espesantes y gelificantes del aceite lubricante

3.2.2. Pirolisis

El proceso de pirolisis consiste en la descomposición térmica de una sustancia en otra u otras, en presencia o no de carboxílicos, aromáticos y cantidades pequeñas de productos gaseosos. Dentro del proceso se tiene el calentamiento en ausencia de aire u oxígeno y la rotura de enlaces químicos para producir moléculas más pequeñas. Las materias primas más adecuadas para la pirolisis son los aceites vegetales, grasas animales, ácidos grasos naturales y ésteres metílicos de ácidos grasos. El craqueo catalítico de aceites vegetales para producir biocombustibles ha sido estudiado. El aceite de copra y el aceite de palma fueran craqueados para producir gases, líquidos y sólidos con menores pesos moleculares. La fase orgánica condensada fue fraccionada para producir combustibles (biogasolina y biodiesel). El combustible líquido producido a partir de la pirolisis tiene componentes químicos similares a los combustibles diésel convencionales.

Ventaja:

- Químicamente similar a los derivados de petróleo, gasolina y diésel.

Desventaja:

- Uso intensivo de energía durante el craqueo, por lo tanto mayores costos.

3.2.3. Microemulsión

El método de microemulsión consiste en una dispersión coloidal de equilibrio de microestructuras fluido ópticamente isotrópicas con dimensiones generalmente en el rango de 1-150 nm formadas de manera espontánea a partir de dos líquidos inmiscibles y normalmente uno o más anfífilos iónicos o no iónicos. Se pueden mejorar las características de pulverización por vaporización explosiva de los constituyentes de bajo punto de ebullición en micelas.

Ventajas:

- Buena pulverización durante la combustión
- Viscosidades de combustible más bajas

Desventajas:

- Menor número de cetano
- Bajo contenido de energía

Problemas de utilización en motores:

- Combustión incompleta
- Formación de depósitos de carbón pesados
- Aumento de la lubricación del aceite

3.2.4. Transesterificación

La transesterificación consiste en la reacción de las grasas y aceites con alcohol etílico en un ambiente básico, una molécula de triglicéridos la cual es el componente mayoritario en una grasa, reacciona con un alcohol primario, bajo la acción de un catalizador para así producir una mezcla de ésteres de ácidos grasos y glicerina; esta consta de tres etapas consecutivas en las que el triglicérido es convertido en diglicéridos, monoglicéridos y glicerina.

Los catalizadores que se pueden utilizar son: soda cáustica o metilato sódico, ambos en solución metanólica. La tecnología básica de producción consta de un reactor en el cual se lleva a cabo la transesterificación. Por un lado, en un tanque auxiliar, se prepara la solución de metóxido de sodio, a partir de alcohol –usualmente metílico– de alta pureza (el agua interfiere en la reacción) e hidróxido de sodio. No se utiliza alcóxido anhidro pues la reacción de dicha sustancia en agua es muy violenta y tiende a la autoignición. Esta mezcla fuertemente cáustica es vertida en el reactor principal que contiene los lípidos fundidos.

La reacción a menudo se realiza a unos 50°C para agilizar la misma. En los procesos industriales más complejos, se procede a separar el biodiesel y la glicerina formada mediante el uso de centrifugas que permiten remover constantemente los productos de reacción. Sin embargo, aún son comunes los procesos por lotes, en los que se procede a una decantación de la glicerina. Luego de separar la misma, el éster es lavado para eliminar jabones y otros subproductos de reacción indeseados.

Ventajas:

- Renovable
- Mayor número de cetano
- Menos emisiones
- Alta eficiencia de combustión

Desventaja:

- Eliminación de subproductos (glicerina y aguas residuales)

3.3. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BODIESEL

Para la producción de biodiesel el procedimiento a seguir es el siguiente:

3.3.1. Obtención de aceite crudo

El aceite de cocina usado se coloca en un molino de aceite, con el objetivo de obtener aceite vegetal crudo y desperdicios.

3.3.2. Filtrado

Mediante el proceso de filtrado y remoción ya sea catalítica o por destilación de ácidos grasos, se obtiene aceite vegetal refinado libre de ácidos.

3.3.3. Transesterificación

El aceite se transforma catalíticamente en metil o etiléster y glicerol, mediante el uso de metanol o etanol mezclado con el catalizador.

3.3.4. Purificación y concentración de glicerol

Mediante un proceso de filtrado se consigue purificar químicamente el aceite, obteniéndose una concentración de glicerol que luego es almacenado.

3.4. ANÁLISIS DE LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE EL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN

El biodiesel es una mezcla de alquilo que contienen largas cadenas de ácidos grasos obtenidos a partir de biológicos tales como aceites vegetales, aceite de cocina usado e incluso grasas animales. (Angulo, Cardoso, & Castellar, 2014), que desde el punto de vista químico son considerados triglicéridos.

Para la obtención de biodiesel es necesario realizar los procesos que se detallan a continuación:

3.4.1. Filtración

Debido a que el aceite utilizado en el proceso es el resultado de una frituración, éste contiene partículas de comida, las cuales almacenan agua. Al existir agua en la reacción, se obtiene jabón (saponificación), lo que dificulta la separación del biodiesel de la glicerina ($C_3H_8O_3$). Con el fin de evitar esto, el aceite debe ser calentado a $35^{\circ}C$ aproximadamente para otorgarle una mayor fluidez a través del filtro y luego se debe secarlo, calentándolo a $60^{\circ}C$ con el fin de quitarle los restos de agua.

3.4.2. Valoración

Mientras más veces sea utilizado el aceite se descompone más rápidamente, comenzando a formar ácidos grasos, los cuales interfieren en la obtención de biodiesel, bajando la eficiencia de la reacción. Es por esto, que al aceite sufre un proceso de desacidificación, mediante el cual se neutralizan los ácidos grasos, por medio del catalizador básico (soda cáustica).

Para saber la cantidad exacta de hidróxido de sodio (NaOH) necesario para agregar al aceite, hay que determinar la acidez de éste. Primero se lo debe calentar y agitar una pequeña muestra de aceite, paralelamente se diluye la soda cáustica en agua destilada. Es importante que la soda cáustica no se mantenga mucho tiempo en contacto con el aire, ya que puede absorber vapor de agua y/o dióxido de carbono (CO_2), lo que perjudica la formación de biodiesel. Luego se mezcla la muestra de aceite con el alcohol isopropílico, y se le añade la fenolftaleína. Posteriormente se agrega con un cuentagotas el hidróxido de sodio (NaOH) a la solución previamente mencionada. Finalmente la fenolftaleína indicará la cantidad de catalizador necesario para neutralizar los ácidos grasos del aceite.

3.4.3. Formación de Metóxido de Sodio (CH₃ONa)

Luego del proceso de valoración o titulación, se procede a disolver el catalizador básico (soda cáustica) en el metanol, por medio de agitación.

3.4.4. Transesterificación

La transesterificación es el proceso más estudiado y que mejores resultados entrega, además que los compuestos, herramientas y equipos de laboratorio a usar son de bajo costo y de fácil adquisición. Esta reacción consiste en el desplazamiento de un alcohol de un éster por otro. Es un proceso reversible, en el cual se utiliza exceso de alcohol para desplazar el equilibrio hacia la formación de ésteres. El alcohol a utilizar es el metanol (CH₃OH), debido a que a lo largo de la reacción se da la formación de emulsiones las que son disueltas fácilmente, formando una capa rica en glicerol y otra de ésteres metílicos. Sin embargo el metanol no es miscible en los triglicéridos, por lo que se hace necesaria una agitación mecánica para favorecer la transferencia de masa.

Al proceso de transesterificación también se lo llama alcoholisis de aceites vegetales ya que se mezcla de un triéster de glicerilo (triglicérido) con un alcohol, convirtiéndolo sucesivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerol. Obteniéndose como productos finales, alquilésteres de los ácidos grasos del aceite y glicerol. Se recomienda utilizar una relación molar 3:1, aunque en la práctica se utiliza relaciones molares mayores dependiendo del tipo de aceite que se utilice y para mejorar el rendimiento del biodiesel. "Debido a que la reacción es reversible, se utiliza alcohol en exceso para desplazar el equilibrio hacia el lado de los productos" (Angulo, Cardoso, & Castellar, 2014).

Químicamente, la transesterificación consiste en tres reacciones consecutivas, el triglicérido es convertido sucesivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerol. Obteniéndose como productos finales, alquilésteres de los ácidos grasos del aceite y glicerol. En la figura 1 se representa la ecuación general de la reacción de transesterificación.

En la reacción de transesterificación se utiliza un catalizador para mejorar su velocidad y el rendimiento final. Los catalizadores escogidos para este proceso son los homogéneos básicos, (específicamente el hidróxido de sodio, por su bajo costo) debido a su velocidad de reacción elevada, condiciones moderadas de presión y temperatura y utilización de la mayoría de las moléculas del catalizador, alcanzándose un rendimiento de un 98%. Sin embargo, los catalizadores básicos poseen una desventaja: la formación de jabón, esto se debe a que el aceite posea una alta cantidad de ácidos grasos y/o agua, por lo que es necesario la cantidad justa de base para neutralizar los ácidos grasos libres, ya que un exceso o un déficit genera jabones. Debido a esto es la importancia de la valoración.

3.4.5. Decantación

Al finalizar la reacción de transesterificación, se obtienen como productos glicerina y alquilésteres (biodiesel), las cuales se separan en dos capas (la glicerina se deposita en el fondo debido a su densidad) por medio de la decantación, proceso que tarda varias horas.

3.4.6. Lavado

La fase de lavado se la realiza con el fin de eliminar todos los posibles compuestos que hayan quedado en el biocombustible, ya sea alcohol, glicerina, soda cáustica o jabones. Como todos estos compuestos presentan buena solubilidad en agua y mala en biodiesel, este proceso consiste en agregar agua al biocombustible y agitarlo por unos minutos, el agua con las impurezas se irá al fondo del tanque y el biodiesel se quedara en la parte superior. Cuando se vea el agua pura, es posible seguir con el proceso de secado.

3.4.7. Secado

Una vez lavado el biodiesel, es necesaria una etapa de secado para eliminar los remanentes de agua. Este proceso consiste en conectar un compresor de aire a un tubo de cobre con orificios. La idea es crear burbujas que se transmitan a través de todo el biodiesel, para dar lugar a una interface que separe fácilmente al biocombustible del agua, y que ésta se evapore de forma eficiente.

3.5. VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITES COMESTIBLES

El proceso de transesterificación o alcoholisis de aceites vegetales, como lo han denominado algunos autores, depende de algunas variables para producir un biodiesel con un alto rendimiento. En este estudio se consideran: contenido de aceite de las materias primas, contenido de ácidos grasos libres (AGL) tipo de alcohol, relación molar alcohol, tipo y concentración de catalizador, temperatura, tiempo de reacción e intensidad de mezclado. Sin embargo, según (Rojas, Gallegos, & Torres, 2010) si en la transesterificación de aceites vegetales utilizamos catalizadores heterogéneos de tipo enzimático hay que considerar otras variables como: tipo de solvente, pH del medio reactante, microorganismo que genera la enzima y estado libre o inmovilizado de la enzima. En nuestra investigación no se mencionarán éstas variables puesto que en la mayoría de artículos analizados se utilizan catalizadores heterogéneos de tipo básico o ácido para la producción de biodiesel.

3.5.1. Contenido de aceite

El contenido de aceite es un aspecto muy importante a la hora de considerar para la elección de la materia prima para la producción de biodiesel. Las materias primas con altos contenidos de aceite en su grano son: maní, girasol, colza, jatrofa y el ricino, con una variación entre 40 y 64%. La soja, palma y algodón tienen los niveles más bajos comprendidos entre 15 y 25% (Moreira, 2012).

La soja a pesar de presentar un bajo contenido de aceite en su grano es la que más se utiliza para la producción de biodiesel ya que es ampliamente cultivada en varios países como: Estados Unidos (33%), Brasil (27%), Argentina (21%) y China (7%) ya que es una gran fuente de proteína y aceite vegetal para los seres humanos y los animales (Moreira, 2012)

En los aceites de cocina el contenido de aceite dependerá de las veces en las que se ha utilizado el aceite, en todos los estudios no se especifica el origen del aceite.

3.5.2. Contenido de ácidos grasos libres (AGL)

El contenido de ácidos grasos influye en la eficiencia y conversión de las propiedades del Biodiesel. (Sanchez, 2014)

“El cálculo de la acidez implica asumir el peso molecular del ácido graso libre que, para la mayoría de los aceites, se expresa como ácido oleico (peso molecular 282) en 100 gramos de muestra” (Pisallero, 2010). (Bautista, García, Cabrera, & Torres, 2016) reportó que con un porcentaje de 0,6 de índice de ácido o AGL obtuvo un biodiesel con un rendimiento del 95%. (Charoenchatrakool & Thienmethangkoon, 2011) Utilizó aceite de cocina usado en un proceso de esterificación de dos etapas con un contenido de ácido del 0,52% y reportó un rendimiento de biodiesel del 90,56%.

(Felizardo, Correira, Raposo, & Mendes, 2006) por su parte obtuvo un biodiesel con un rendimiento del 92,7 % al utilizar el aceite de cocina usado con un porcentaje de acidez del 0,47.

(García, 2012) en su estudio no se conocía el porcentaje de ácido del aceite de cocina usado por lo que procedió a realizar una valoración del aceite, del mismo modo procedió (Barros, 2015) que realizó una prueba de valoración para determinar el índice de acidez comprendido entre el 0,1 y 1 %. Del mismo modo procedió (Hugo, 2013) (Cervantes, Leyte, Lugo, Torres, & Salazar, 2012) y (Cervantes, Leyte, Lugo, Torres, & Salazar, 2012)

(Guerrero, Parra, & Sierra, 2013) reportó que con un porcentaje de 1,87 de ácidos grasos se obtuvo un rendimiento de 81%. (Herrera, 2008) Reporto que con un porcentaje de ácido del 2,4 por lo que se procedió a realizar una esterificación del aceite ya que su alto índice de ácido ayuda a la generación de jabones.

(Bocanegra, López, & Malagón, 2015) Utilizó un aceite de cocina usado con un índice de ácido menor al 1 % y obtuvo un rendimiento del 98%. (Manuale, 2011) realizó una técnica de valoración volumétrica con una solución normalizada de NaOH para lograr obtener un índice de ácido menor al 1 % y obtuvo un rendimiento del 96%. Cuando el contenido de ácidos grasos libres o índice de acidez es mayor al 1% se realiza el proceso de obtención de biodiesel en dos etapas: esterificación y transesterificación. (Bocanegra, López, & Malagón, 2015). Mientras mayor sea el índice de acidez mayor será el rendimiento del biodiesel. En el caso de los aceites de cocina usados el nivel de ácidos grasos libres o índice de acidez será mayor, dependiendo del tiempo y la temperatura a la que haya estado sometido el aceite.

3.5.3. Tipo de alcohol

Los alcoholes más utilizados para este proceso son: el metanol y etanol. También se utiliza el propanol, isopropanol y el butanol pero si existe presencia de agua en los aceites va a impedir su reacción ya que son muy sensibles al agua en contaminación. (Bautista, García, Cabrera, & Torres, 2016).

Si se usa metanol se obtendrán ésteres metílicos y si se utiliza etanol se obtendrán ésteres etílicos. (Bocanegra, López, & Malagón, 2015)

Casi todos los autores trabajaron con metanol ya que es un alcohol de cadena corta y su precio es económico frente a otros alcoholes como el etanol. "El metanol es el alcohol preferido en la producción de biodiesel por razones técnicas y económicas" (Aguledo, 2004)

Se ha encontrado que (Abreu, 2006) utilizó etanol en la reacción de transesterificación ya que como objetivo de su experimento era caracterizar los ésteres-etílico utilizando espectros de infrarrojo.

3.5.4. Relación alcohol-aceite

La relación estequiometría ideal es 3:1 para producir tres moles de ésteres y un mol de glicerol. "La transesterificación es una reacción de equilibrio que necesita un exceso de alcohol para conducir la reacción al lado derecho. Para una conversión máxima se debe utilizar una relación molar de 6:1." (Herrera, 2008)

(Barros, 2015) utilizó una relación 7:1 para realizar la reacción de transesterificación. (Encinar, González, & Rodríguez, 2005) comparó varias relaciones desde 3:1 hasta 9:1, obteniendo como resultado que la relación 6:1 es la que mejor propiedades proporciona al biodiesel.

(Abreu, 2006) Confirmó que las relaciones molares más adecuadas son (3,6-9:1). (Bocanegra, López, & Malagón, 2015) evaluó tres relaciones molares (6,9,12:1), llegando a determinar que 12:1 es la relación que mayor rendimiento de biodiesel genera, con un 98%. (Charoenchatrakool & Thienmethangkoon, 2011) y (Felizardo, Correira, Raposo, & Mendes, 2006) trabajaron con una relación molar 9:1 en la transesterificación del aceite de cocina usado. (Guerrero, Parra, & Sierra, 2013) comparó dos relaciones molares (6:1 y 9:1) llegando a determinar que la relación 9:1 es la que mayor rendimiento de diésel se obtiene.

3.5.5. Tipo del catalizador

En la transesterificación de aceites vegetales se pueden utilizar catalizadores de tipo homogéneo como NaOH, KOH o en presencia de catalizadores heterogéneos como los óxidos metálicos, carbonatos o enzimas. Para (Rojas, Gallegos, & Torres, 2010) la catálisis enzimática tiene la ventaja que hay ser usada en la reacción no conduce a la formación de jabón, y no se utilizan componentes químicos que afectan al medio ambiente, se evita la neutralización ácida. Lastimosamente en la investigación realizada no se han encontrado

investigaciones en las que se utilicen catalizadores enzimáticos para la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado. Debería tomarse muy en cuenta ya que los aceites de cocina usados tienen un alto índice de acidez y tienden a formar jabón, por lo que al utilizar un catalizador enzimático se podría eliminar una etapa previa de esterificación. Siendo los catalizadores básicos los de mayor demanda a nivel mundial ya que se permiten utilizar en condiciones moderadas y actúan mucho más rápido que los otros catalizadores (Herrera, 2008).

Según (Herrera, 2008): “El único problema de estos catalizadores es que deben ser anhídros para evitar que se produzcan reacciones secundarias, como la de saponificación, que reducirían el rendimiento del proceso”.

El uso de los catalizadores presentan algunos inconvenientes, entre ellos: la dificultad en la eliminación de los catalizadores básicos, la producción de una gran cantidad de aguas residuales y la formación de jabón. (Felizardo, Correira, Raposo, & Mendes, 2006) , (Charoenchatrakool & Thienmethangkoon, 2011) y (Barros, 2015). Utilizaron un catalizador de tipo básico (KOH) en sus reacciones obteniendo un rendimiento del 90,56% y 92,7 % respectivamente, no reportaron que hicieron con las aguas residuales generadas en la reacción.

(Bocanegra, López, & Malagón, 2015) Evaluó dos catalizadores KOH y NaOH, se obtuvo como resultado que el catalizador KOH generó un mayor rendimiento (98%). De igual forma (Bautista, García, Cabrera, & Torres, 2016) utiliza NaOH como catalizador obteniendo buenos resultados. Las bases como el NaOH y el KOH son las más utilizadas para la obtención de biodiesel ya que requieren menos tiempos de reacción y requieren pequeños volúmenes de alcohol.

(Manuale, 2011) Utiliza un catalizador heterogéneo, en este caso fue ZnO/Al₂O₃ elevado a altas temperaturas y utilizado en una reacción en condiciones normales obtuvo un buen resultado, no se menciona el rendimiento del 96%.

La mayoría de autores que utilizó KOH y NaOH en sus reacciones, prefirió el KOH ya que la glicerina que se obtiene como subproducto es mucho menos tóxica que cuando se utiliza NaOH y puede ser tratada para ser utilizada en la industria farmacéutica.

El exceso como la deficiencia de los catalizadores puede producir la formación de jabón lo que tiene una relación directa con el rendimiento de biodiesel.

3.5.6. Concentración del catalizador

La concentración del catalizador es un variable que afecta directamente a la transesterificación de aceites de cocina usados y depende del índice de acidez del aceite.

(Barros, 2015) ha reportado 0,5 % de KOH en su reacción. Mientras que (Charoenchatrakool & Thienmethangkoon, 2011) utilizó un porcentaje de 1, (Felizardo, Correira, Raposo, & Mendes, 2006) 0,63 % de KOH en sus reacciones, obteniendo un rendimiento del 90,56 % y 92,7 % respectivamente.

(Bautista, García, Cabrera, & Torres, 2016) trabajaron con el 1% de concentración de NaOH obteniendo un 95 % del rendimiento. En la mayoría de los estudios los catalizadores ya pasaron por un proceso de valoración y esterificación para reducir sus ácidos grasos libres por lo que no se requirió de que los catalizadores presenten una alta concentración, los límites estuvieron entre 0,5 y 2 % en peso.

3.5.7. Temperatura de operación

Es la temperatura requerida para realizar la transesterificación. La mayoría de autores fueron variando la temperatura hasta encontrar la que produzca un biodiesel con un alto porcentaje de rendimiento. (Encinar, González, & Rodríguez, 2005) Reporta un rango de temperatura de 25 a 65 °C obteniendo como resultado que la temperatura de 65 °C es genera un biodiesel con mayor rendimiento.

Así mismo (Charoenthrakool & Thienmethangkoon, 2011), (Felizardo, Correira, Raposo, & Mendes, 2006) y (Guerrero, Parra, & Sierra, 2013) utilizaron temperaturas dentro de ese rango: 55, 60 y 58 % obteniendo buenos resultados. De igual forma (Bautista, García, Cabrera, & Torres, 2016) trabajó con una temperatura de 65 °C. (Bocanegra, López, & Malagón, 2015) Compara algunas variables como: relación alcohol/aceite, los catalizadores y sus concentraciones, pero mantuvo la temperatura en 60°C obteniendo biodiesel con alto rendimiento. (Abreu, 2006) Utiliza la misma técnica pero con una temperatura de 77 °C. (Barros, 2015) Evalúa un rango de temperaturas de 30 a 40°C llegando a obtener como resultado que todas llegan hasta 45 °C.

3.5.8. Tiempo de reacción

El tiempo de reacción tiene una estrecha relación al tipo, concentración de catalizador y la temperatura. Los autores que utilizaron KOH como catalizador (Charoenthrakool & Thienmethangkoon, 2011) y (Felizardo, Correira, Raposo, & Mendes, 2006) utilizaron un tiempo de reacción de 60 minutos.

Por su parte, (Guerrero, Parra, & Sierra, 2013) empleó un tiempo de 58 minutos para la transesterificación de aceite de cocina usado. (Bocanegra, López, & Malagón, 2015) y (Abreu, 2006) que utilizaron la técnica de ir comparando ciertas variables, mantuvieron constante la temperatura y el tiempo de reacción que fue de 120 y 60 minutos respectivamente.

Esta ventaja es la que presentan los catalizadores básicos frente a los catalizadores enzimáticos que su tiempo de reacción es corto. Para realizar una catálisis enzimática es necesario como mínimo una 1 hora y puede llevar hasta 60 horas la reacción para poder obtener un biodiesel con altos porcentajes de rendimiento. (Rojas, Gallegos, & Torres, 2010)

3.5.9. Intensidad de mezclado

En una reacción de transesterificación se mezclan alcohol con aceite en presencia de un catalizador por lo que la intensidad de mezclado es muy importante para obtener un buen producto. Se reportó una intensidad de 200 rpm (Bocanegra, López, & Malagón, 2015) obteniendo buenos resultados. También se reportaron intensidades de 200-600 rpm. (Charoenthrakool & Thienmethangkoon, 2011), (Felizardo, Correira, Raposo, & Mendes, 2006) y (Guerrero, Parra, & Sierra, 2013). No todos los estudios reportaron la velocidad de mezclado.

Todos los procesos analizados utilizaron catalizadores químicos en sus procesos de transesterificación. Se plantea que se realicen investigaciones futuras con catalizadores enzimáticos biológicos ya que la reacción se lleva a menor temperatura, con menor energía y es amigable con el ambiente ya que no utiliza químicos. El objetivo principal de la producción de biodiesel con aceites de cocina usados es disminuir la contaminación ambiental.

4. CONCLUSIONES

- Como variables relevantes en el proceso de esterificación para la obtención de biodiesel a partir de aceite de cocina usado se consideraron: contenido de aceite, contenido de AGL o índice de acidez, tipo de alcohol, relación molar alcohol/aceite, tipo y concentración del catalizador, temperatura, tiempo de reacción y velocidad o intensidad de mezclado. Se encontró que la variable que afecta directamente al rendimiento del biodiesel es el índice de acidez, es por eso que en la mayoría de estudios los aceites de cocina usados fueron sometidos a un pre-fase de esterificación para reducir su nivel de acidez a menos de 1 %.
- Con base en la metodología se compararon todos los estudios recolectados en la búsqueda y se logró determinar que para que el biodiesel llegue a obtener un rendimiento del 98 % utilizando: un porcentaje de AGL o índice de acidez menor al 1%, utilizando metanol con una relación molar alcohol aceite de 12:1, utilizando KOH como catalizador, a una concentración del 1% con una temperatura de 60°C y un tiempo de reacción de 120 minutos.

- En el estudio no se compararon las técnicas o modelos utilizados ya que en la mayoría no se especificó, ya que no tiene una relación directa con el proceso de transesterificación analizado, pero al comparar ciertos rango de algunas variables y mantener otras fijas, en este caso la temperatura y el tiempo de reacción fue ventajosa para aumentar el rendimiento del biodiesel.
- En todas las experimentaciones no se conoció el origen de los aceites de cocina usados por lo que no fue posible llegar a determinar las cantidades de alcohol y ácido fueron utilizadas para llegar a obtener índices de acidez menores al 1 %.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, L. R. (2006). Obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales usados. *19*(1).
- Agüedo, J. &. (2004). Estudio experimental de las viarables que afectan la reacción de transesterificación de aceite crudo de palma para la producción de biodiesel. *Scientia et Technica Año X*(24).
- Angulo, E., Cardoso, B., & Castellar, G. (6 de Octubre de 2014). *Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos*. Barranquilla.
- Barón, M., Huertas, L., & Orejuela, J. (2013). Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiesel:Revisión de la literatura. *Ingeniería*, 84-117.
- Barros, X. (2015). Obtención de biodiesel a partir de aceite de cocina usado de la ENM. España.
- Bautista, M., García, J., Cabrera, R., & Torres, R. (2016). Proceso Sustentable de Obtención de biodiesel. *Revista de Sistemas Experimentales*, 3(8), 27-35.
- Benítez, D., Bravo, C., & Cortés, E. (2011). *Diseño de Procesos de Producción de Combustibles a Partir de Biomasa*. Chile.
- Bocanegra, J., López, L., & Malagón, D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. *Ing.Univ*, 19(1), 155-172.
- Castro, J. Coello, y L. Castillo, *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Lima, Perú: Soluciones Prácticas (ITDG), 2007.
- Cantrell, D., Gillie, A., Lee, A., & Wilson, K. (2005). *Structure- reactivity correlations in Mg-Al hidrotalcite catalysts for biodiesel synthesis*.
- Cervantes, J., Leyte, R., Lugo, B., Torres, A., & Salazar, M. (2012). Síntesis de Biodiesel a partir de aceite residual comestible. México.
- Charoenchatrakool, M., & Thienmethangkoon, J. (2011). Statical optimization for biodiesel production from waste frying oil trough from two step catalized process. *Fuel processing Technology*, 12(1), 112-118.
- Chamarravi, O & Saavedra, G. (2013). Evaluación del impacto ambiental generado por la emisión de gases en motores que utilizan complementos Lubricantes, en la ciudad de Bogotá D.C. Universidad de Manizales - Centro de Investigaciones en Medio Mmbiente y Desarrollo –Cimad. Colombia.
- Encinar, M., González, J., & Rodríguez, A. (2005). Biodiesel from Used Frying Oil. Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel. *Ind. Eng. Chem. Res*, 5491–5499.
- Felizardo, P., Correira, M., Raposo, I., & Mendes, J. (2006). Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste management*, 26(5), 487-494.
- García, M. G. (2012). *Estudio de la obtención de biodiesel a partir de aceite comestible usado*.

- Guerrero, C., Parra, J., & Sierra, F. (2013). *Optimization of Biodiesel Production for homogeneous catalysis from waste cooking oil*.
- Herrera, J. (2008). Caracterización y aprovechamiento del aceite residual para obtención de un biocombustible. Pereira, Colombia.
- Hugo, B. (2013). Optimización de la producción de biodiesel a partir de la optimización de aceite vegetal usado . México.
- Manuale, D. (2011). Obtención de biodiesel en condiciones supercríticas.
- Moreira, E. (2012). Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel. *INGENIUM*, 53-61.
- Niraj Kumar, Varun, SantRamChauhan, “Performance and emission characteristics of biodiesel from different origins: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, p. 633 – 658, 2013.
- Ochoa, E. (2011). Evaluación de la combustión de mezclas de Biodiesel a partir del aceite de cocina usado a condiciones ambientales de la capital del valle de Cauca. Santiago de Chile, Chile.
- Pisallero, L. (2010). *Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes*. Santa Fé, Colombia.
- Rojas, A., Gallegos, E., & Torres, H. (2010). Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis enzimática. *Ingeniería e Investigación*, 17-21.
- Sanchez, J. (2014). *Determinación de la Relación entre parámetros y proceso de rendimiento de obtención de Biodiesel a partir de aceites de cocina usados*. Cundinamarca, Colombia.
- Zabaleta L., S. J. (2016). Obtención de Biodiesel por Transesterificación Alcalina a partir de Aceites Vegetales Residual en Lima. *Revista Científica Técnica*, 26(1), 107-114.