

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE SEPARADORES DE MEMBRANA

EVALUATION OF THE BIODIESEL PRODUCTION PROCESS USING MEMBRANE SEPARATORS

Yolimar Fernández¹, Alejandro Velásquez¹, Ruber Medina¹, Jesús Ortiz²

(1) Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda", Departamento de Energética, Área de Ingeniería Química, Av. Rafael González, Sector Universitario, Punto Fijo – Venezuela

(2) Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt, Departamento de Ciencias Básicas, Coordinación de Química. Av. Rafael Gallardo, Coro – Venezuela
(e-mail: jimenezoly.10@gmail.com)

Recibido: 13/02/2021 - Evaluado: 03/03/2021 - Aceptado: 24/03/2021

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue valorar técnicamente una alternativa de producción de biodiésel a partir de aceite de tártago mediante un sistema de filtrado por membrana cerámica utilizando el simulador de procesos Aspen hysys®. Se utilizó un diseño experimental para estudiar la influencia de la relación molar alcohol/aceite, concentración en peso y temperatura del catalizador sobre el contenido de metil-ricinoleato en el biodiésel obtenido y consumo energético global. El proceso de separación por membranas en comparación con el proceso tradicional por destilación resultó ser eficiente técnicamente bajo las variables relación molar 3:1, concentración y temperatura del NaOH de 0,5% y 40°C respectivamente, en cuanto a gastos energéticos y calidad del biodiésel obtenido: densidad de 938,5Kg/m³, viscosidad cinemática de 1,365cSt, poder calorífico de 39,65Mj/kg, y número de cetano de 40,47. Los resultados muestran que el método de refinación planteado es altamente prometedor en el proceso de producción de biodiesel.

ABSTRACT

The objective of this work was to technically evaluate an alternative for the production of biodiesel from spelt oil by means of a ceramic membrane filtration system using the Aspen hysys® process simulator. An experimental design was used to study the influence of the alcohol/oil molar ratio, catalyst weight concentration and temperature over the methyl-ricinoleate content in the biodiesel obtained and overall energy consumption. The membrane separation process compared to the traditional distillation process proved to be technically efficient under the variables 3:1 molar ratio, NaOH concentration and temperature of 0.5% and 40°C respectively, in terms of energy costs and quality of the biodiesel obtained: density of 938.5 Kg/m³, kinematic viscosity of 1,365 cSt, calorific value of 39.65 Mj/kg, and cetane number of 40,47. These results show that the proposed refining method is highly promising in the biodiesel production process.

Palabras clave: simulación, aceite de tártago, producción de biodiésel, membrana cerámica

Keywords: simulation, castor oil, biodiesel production, ceramic membrane

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el tema energético se ha convertido en una de las prioridades más importantes a nivel mundial, dada la importancia estratégica de asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, a la vez que se protege el medio ambiente. Es por esto que se han desarrollado alternativas para producir energía, siendo los biocombustibles una de ellas (Correa *et al.*, 2016). Entre los combustibles renovables más comunes se encuentra el biodiésel que, por su facilidad de producción, aplicación, y relativo bajo impacto ambiental, se tiene como estándar en las áreas donde se utiliza. Por supuesto, el biodiesel tiene ciertas desventajas, especialmente los de primera generación, es decir, el biodiésel obtenido a través del aceite de plantas oleaginosas.

En este sentido, uno de los principales inconvenientes es el impacto que presenta en la seguridad alimentaria de la región donde se encuentran estos cultivos. La producción de biodiesel requiere recursos agrícolas destinados al uso alimenticio, por lo que un incremento en su producción provocará una disminución en la distribución de alimentos (Koizumi, 2015; Giraldo *et al.*, 2014). Sin embargo, el ricino o tártago (*Ricinus communis L.*) al ser una planta oleaginosa no comestible, capaz de adaptarse a distintos climas y de crecer en suelos marginales, además de que posee una alta eficiencia en la producción de aceite (80 – 90 %), otorgándole al biodiésel una alta viscosidad, alta miscibilidad, bajo contenido de iodo y bajo punto de enfriamiento, representa una alternativa viable para su producción (Osorio *et al.*, 2020).

Ahora bien, el biodiésel suele producirse mediante transesterificación de ácidos grasos con un alcohol primario o secundario, usando comúnmente metanol por ser más económico y poseer ventajas químicas como su corta cadena y su naturaleza polar, además de ser más fácil de recuperar que el etanol. En la transesterificación pueden emplearse ácidos (heterogénea), álcalis (homogénea) y enzimas como catalizadores (Keera *et al.*, 2018). La catálisis homogénea suele emplearse normalmente ya que los álcalis como NaOH y KOH son más eficientes y económicos que los ácidos. Sin embargo, pese a la eficiencia de este método para producir biodiésel, la corriente de salida del reactor contiene diversas impurezas como son trazas de alcohol y catalizador, glicerina, y dependiendo de la cantidad de ácidos grasos libres (FFA) del aceite base (Osorio *et al.*, 2020). Para eliminar estos contaminantes de la mezcla de metilésteres y así generar biodiesel que cumpla con las especificaciones ASTM/EN se necesita una sección de refinación o purificación.

Dentro de este orden de ideas, entre los métodos de purificación de biodiésel se encuentra el lavado húmedo, lavado seco (intercambio iónico), extracción por membrana, precipitación, formación de complejos y destilación (Chozhavendhan *et al.*, 2020). Al respecto, Costello (2018), señala que la forma más común para refinar el biodiesel es mediante una combinación de destilación e intercambio iónico. Gracias a la diferencia de densidades, la glicerina se separa del biodiesel por decantación, y, para retirar el metanol, se destila el biodiesel crudo en un vacío parcial para separarlo del biodiesel, el metanol al ser más volátil sale por la corriente de tope, mientras que el biodiesel es parte de la corriente de fondo; sin embargo, aún quedan las trazas de glicerina y catalizador. Para remover estas impurezas, se emplea un intercambiador iónico, el cual retiene la combinación glicerina/catalizador básico, finalmente se obtiene biodiésel refinado 99,9% en peso.

No obstante, la refinación húmeda consume grandes cantidades de agua de lavado y la humedad residual contenida en el biodiesel contribuye durante la hidrólisis de esteres aumentando su acidez. Los procesos de refinación seca generan buenos resultados gracias a la alta selectividad de los compuestos que se desean remover, pero requieren un gasto energético considerable (Osorio *et al.*, 2020). La refinación de biodiesel por membranas, por el contrario, es un área poco explorada pero muy prometedora para el campo de los biocombustibles. La extracción por membranas posee una alta eficiencia de separación, es ambientalmente benigna, requiere poco gasto energético y posee una simplicidad y flexibilidad operacional (Chozhavendhan *et al.*, 2020). Considerando lo antes expuesto, Atadashi *et al.* (2015), propusieron y elaboraron un sistema de filtración mediante membranas cerámicas multicanal de tipo tubular capaz de remover simultáneamente las trazas de glicerina, jabón, y otras impurezas del biodiesel. Las condiciones de operación del sistema y las especificaciones del filtro de cerámica se detallan en la investigación. En función de lo planteado, la presente

investigación tiene como propósito evaluar la efectividad del sistema de filtrado por membrana cerámica en el proceso de producción de biodiesel producido a partir de aceite de tártago, mediante la simulación de dicho proceso empleando el simulador Aspen Hysys®.

MATERIALES Y MÉTODOS

La simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de tártago, se llevó a cabo partiendo de los valores suministrados por la planta a escala piloto propuesta por Díaz *et al.* (2015), la cual reporta una composición simplificada del aceite de tártago, con dos componentes presentes en la mezcla; n-hexano, utilizado como solvente en el proceso, y ricinoleína, el triglicérido principal que se obtiene del ricino o tártago, como componente representativo (Tabla 1).

Tabla 1: Composición del aceite de tártago empleado en la simulación

| Componentes | Fracción molar (%) |
|-------------|--------------------|
| N-Hexano | 0,5% |
| Ricinoleína | 99,5% |

Se consideró la ricinoleína como componente único representativo del aceite de tártago ya que de los triglicéridos y otros compuestos biológicamente activos (impurezas) presentes en este, la ricinoleína es el que se encuentra en mayor concentración oscilando entre 87 y 94% dependiendo de la región geográfica. El n-hexano por otra parte, es el solvente más utilizado en el proceso de extracción del aceite ya que se obtienen mejores rendimientos que con otros solventes como etanol o dióxido de carbono supercrítico; sin embargo, parte de este queda presente en el aceite luego de la extracción (Yeboah *et al.*, 2020). Debido a esto, se utilizó el n-hexano como compuesto principal para representar las impurezas.

Ahora bien, en el desarrollo de la simulación, el producto de mayor interés fue el biodiesel conformado por el metil-ricinoleato mientras que el subproducto fue la glicerina. Por otra parte, el alcohol utilizado fue el metanol y como catalizador hidróxido de sodio (De La Rosa *et al.*, 2015). Para llevar a cabo la simulación se empleó el simulador Aspen Hysys® en su versión 3.2, por su versatilidad a la hora de crear elementos que no forman parte de su base de datos. Esta capacidad fue de utilidad debido a la necesidad de registrar tanto la ricinoleína como el metil-ricinoleato, compuestos que intervienen en la reacción de transesterificación. Se utilizó la herramienta UNIFAC incluida en el simulador para llevar a estimar las propiedades de ambos compuestos (Tabla 2), que para efectos del software, son considerados hipotéticos.

Tabla 2: Propiedades de los compuestos hipotéticos

| Ácido/ metilésteres | NBP(C) | Peso Molecular | Densidad (kg/m ³) | Tc (c) | Pc (kPa) | Vc (m ³ /kgmol) | Acentricidad |
|------------------------|--------|----------------|----------------------------------|----------|----------|-------------------------------|--------------|
| Ricinoleína | 879,20 | 933,44 | 943,25 | 16657,60 | 272,75 | 3,25 | 1,1481 |
| Ricinoleato | 515,01 | 312,49 | 938,47 | 694,19 | 1201,46 | 1,1185 | 1,0254 |

En relación a la ecuación cinética para la transesterificación de los triglicéridos a ésteres metílicos se consideró la de Ruiz *et al.* (2016), definiendo una única reacción de conversión (ecuación 1) tomando en cuenta la predominancia de la ricinoleína en el aceite, con una conversión de 95% en rendimiento.



Debido a que algunas secciones del proceso de producción de biodiesel se realizan a vacío parcial, y considerando que la transesterificación es en medio básico, usando hidróxido de sodio como catalizador, se

seleccionó la ecuación E-NRTL (Extended Non-Random Two Liquids) como modelo termodinámico, tal como lo reporta Basso *et al.* (2014), puesto que ofrece las aproximaciones más cercanas a la realidad cuando se trata de simular la producción de biodiesel.

Cabe señalar, que se realizó un diseño experimental para estudiar parámetros operativos claves para la simulación, siendo los parámetros seleccionados: relación molar del metanol/aceite, concentración y temperatura del catalizador. Las diferentes corridas se llevaron a cabo mediante un diseño factorial de 2^3 en 8 corridas. Los factores se establecieron independientes entre sí dentro de los siguientes límites: relación molar de metanol/aceite de tártago: $3:1 \leq \text{alcohol/aceite} \leq 6:1$; concentración de catalizador: $0,5\% \text{ en peso} \leq \%C \text{ NaOH} \leq 1,0\% \text{ en peso}$ y $30 \text{ }^\circ\text{C} \leq \text{Temp_NaOH} \leq 40 \text{ }^\circ\text{C}$; los niveles de cada parámetro fueron seleccionados en base a los datos disponibles en la literatura publicada (Ruiz *et al.*, 2016; Keera *et al.*, 2018, De La Rosa *et al.*, 2015).

Las principales variables respuestas son el contenido en peso de metil-ricinoleato expresado en porcentaje y el consumo energético en el proceso global. La Tabla 3 muestra los niveles de las variables evaluadas, empleándose el programa estadístico Statgraphics Centurion XV versión 15.2 para el análisis de varianza factorial (ANOVA) y en la Tabla 4 se muestran los valores de las variables empleadas en cada corrida de la simulación.

Tabla 3: Niveles de las variables evaluadas para la simulación

| Variables | Unidades | Nivel bajo | Nivel alto |
|--|----------|------------|------------|
| Relación molar (Alcohol/aceite) | Molar | 3/1 (-1) | 6/1 (+1) |
| Concentración del catalizador (%C NaOH) | %p/p | 0,5 (-1) | 1 (+1) |
| Temperatura del catalizador (Temp. NaOH) | °C | 30 (-1) | 40 (+1) |

Tabla 4: Valores de las variables empleadas en cada corrida de la simulación

| Corrida | Relación Molar Alcohol/aceite | %NaOH | Temperatura NaOH (°C) |
|---------|-------------------------------|-------|-----------------------|
| 1 | 6:1 | 0,5 | 30 |
| 2 | 3:1 | 0,5 | 30 |
| 3 | 6:1 | 1 | 30 |
| 4 | 3:1 | 1 | 40 |
| 5 | 3:1 | 1 | 30 |
| 6 | 6:1 | 1 | 40 |
| 7 | 3:1 | 0,5 | 40 |
| 8 | 6:1 | 0,5 | 40 |

Por otra parte, en la Figura 1 se muestra el esquema tecnológico para el proceso tradicional por destilación, se estableció como base de cálculo un flujo de 265,5 kg/h de aceite de tártago refinado, además de la mezcla metanol-NaOH para llevar a cabo la simulación del proceso de producción de biodiésel, las cuales se alimentan a un reactor de conversión CRV-100, el cual opera a una presión de 20kPa, por recomendación de Okullo y Tibasijima (2017). Ambas corrientes se encuentran a 50°C, para favorecer la conversión; asimismo, se define la reacción de transesterificación de acuerdo con la relación molar alcohol/aceite. En el reactor, sale la corriente hacia el vaporizador instantáneo V-101, cuya corriente de tope se usa para recuperar el metanol excedente de la reacción y éste sea circulado de nuevo al proceso, mientras que la corriente de fondo, rica en metilésteres y glicerol, se enfría de 86°C a 20°C en el intercambiador E-102, para mantener relativamente bajas las temperaturas en el proceso. La corriente es destilada mediante la torre de destilación T-100, para refinar el

biodiésel y separarlo de la glicerina. En el fondo de la torre se obtiene biodiésel refinado, el cual es llevado de 400°C a 20°C por el intercambiador E-104, para así almacenarlo en condiciones estándar.

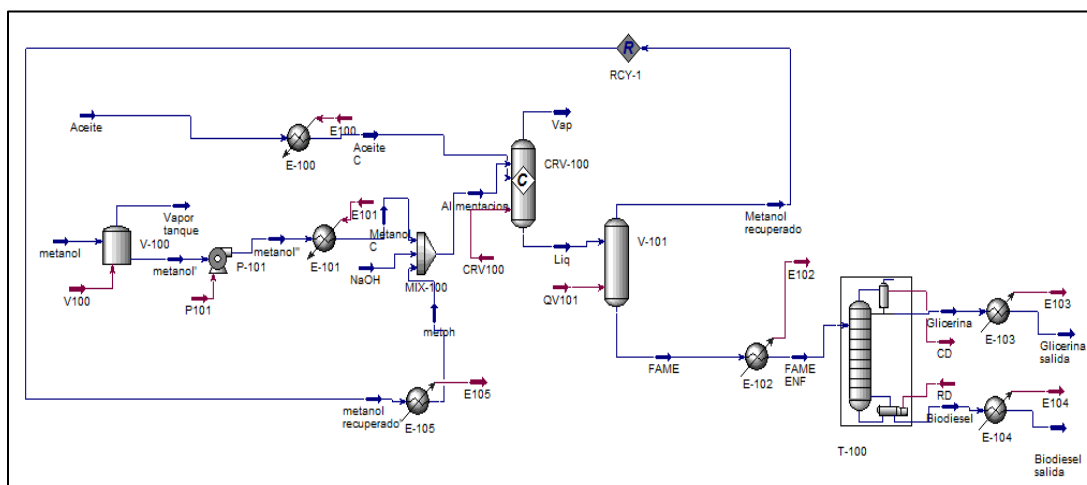


Fig. 1: Simulación del proceso tradicional de biodiésel por destilación

Una vez definido el proceso tecnológico convencional, se procedió a adaptar el sistema de refinación mediante membranas propuesto por Atadashi *et al.* (2015), el cual utiliza membranas cerámicas multicanal de tipo tubular adquiridas comercialmente. El biodiésel se mantiene a una temperatura de 50°C y se bombea hacia el módulo de membrana. La membrana tiene un tamaño de poro de 0.05µm. El biodiésel refinado permea a través del filtro y es almacenado en un tanque, donde se pesa regularmente con una balanza digital, mientras que el concentrado se recircula hacia el tanque de biodiésel crudo (Figura 2).

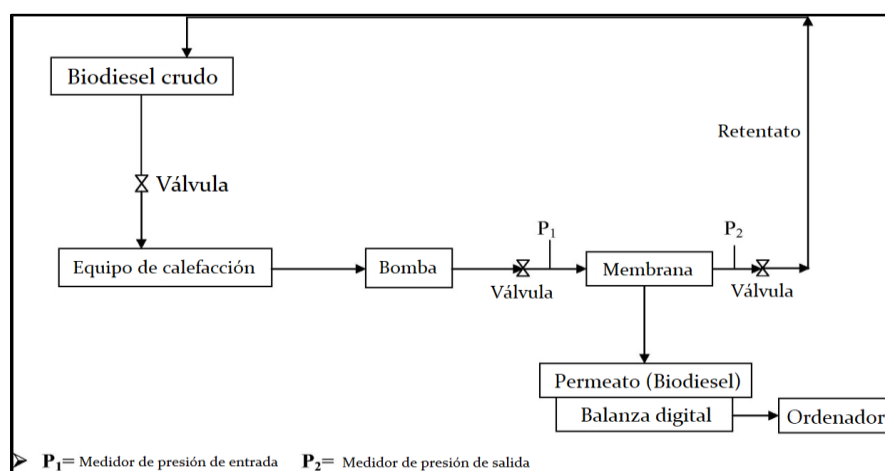


Fig. 2: Etapas del proceso de refinación mediante membrana

Es preciso destacar, que para poder adaptar el sistema de refinación por membrana en el simulador (Figura 3) se utilizó el equipo 'splitter', puesto que divide la corriente introducida mediante los datos que se le especifican. El diagrama del proceso no sufrió modificaciones considerables, aplicando sólo los cambios en el área de refinación a partir del intercambiador E-102. El separador X-100 simula el tanque de decantación para separar el biodiésel crudo del glicerol. La corriente de biodiésel crudo se lleva al separador X-101 el cual simula el filtro de cerámica. Ya que no se puede establecer en el equipo el tamaño de poro para realizar la separación, la

separación se especificó mediante los porcentajes de retención de biodiésel crudo (con impurezas) que debían salir en la corriente de tope o concentrado.

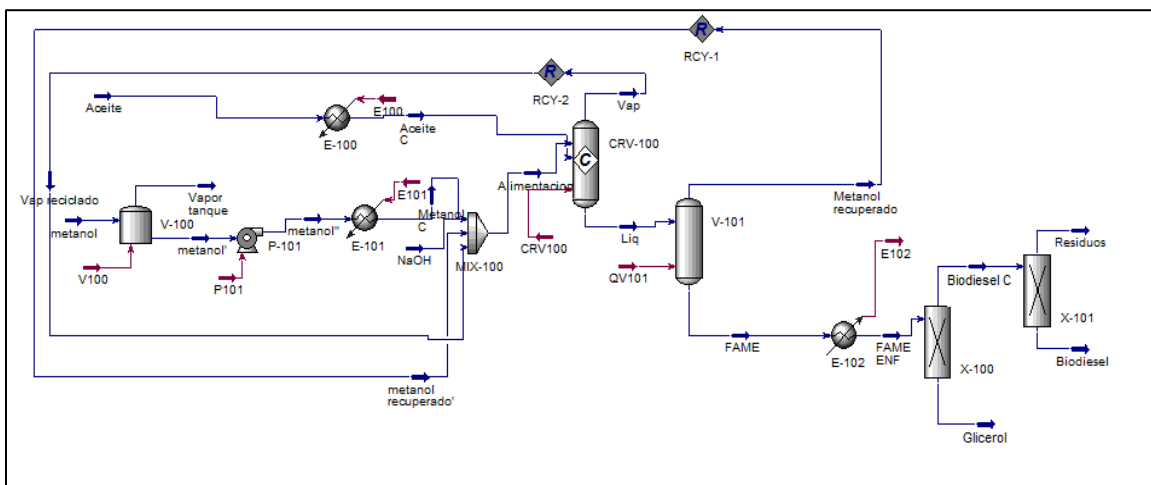


Fig. 3: Simulación del proceso de refinación de biodiésel por membrana

Finalmente, una vez obtenido el biodiésel por los dos procesos simulados, se procedió a determinar las propiedades de viscosidad cinemática, densidad, poder calorífico, y número de cetano para conocer la calidad obtenida comparándose con los valores reportados por Fernández *et al.* (2014), Keera *et al.* (2018) y Osorio *et al.* (2020) y los establecidos en la normativa ASTM D6751-11a (2011). Los cálculos se obtuvieron gracias al uso de las correlaciones reportadas por Giakoumis y Sarakatsanis (2019) (ecuaciones 2, 3, 4 y 5); teniendo en cuenta para dichas ecuaciones la masa molecular (M_i) y grado de insaturación (N) de los metilésteres presentes en el biodiésel.

$$\ln(\eta_{biodiesel}) = -12,503 + 2,496 \cdot \ln(M_i) - 0,178 \cdot N(3) \quad (2)$$

$$\rho_{biodiesel} = 0,8463 + \frac{4,9}{M_i} + 0,0118 \cdot N \quad (3)$$

$$\delta_{biodiesel} = 46,19 - \frac{1794}{M_i} - 0,21 \cdot N \quad (4)$$

$$\phi_{biodiesel} = 62,32 - 6,13 \cdot N \quad (5)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez simulados los procesos de refinación en estudio (destilación y por membrana) se obtuvo la información correspondiente a la corriente de salida de biodiésel refinado a partir del aceite de tártago (porcentaje en peso de metil-ricinoleato) a través de un diseño de experimento bajo la influencia de la relación molar metanol/aceite, concentración y temperatura del catalizador. La Figura 4 muestra para el proceso de refinación tradicional por destilación que la relación molar alcohol/aceite y la temperatura del NaOH fueron significativas, porque estos efectos se muestran a la derecha del valor p , con un nivel de confianza del 95%.

Se observa que la relación molar alcohol/aceite es la variable más significativa que afecta el contenido del metil-ricinoleato en la corriente de biodiésel purificado. Esto se debe a que el uso excesivo de metanol promueve la formación de glicerol; esta tendencia de los reactivos a producir este glicerol resulta en reducción de

metilésteres que deberían formarse de los triglicéridos (Coniwanti *et al.*, 2019); mientras que la temperatura del catalizador afecta en menor medida generando ligeras variaciones en los rendimientos, debido a que a mayor temperatura se incrementa la solubilidad entre el aceite y el alcohol (Osorio *et al.*, 2020).

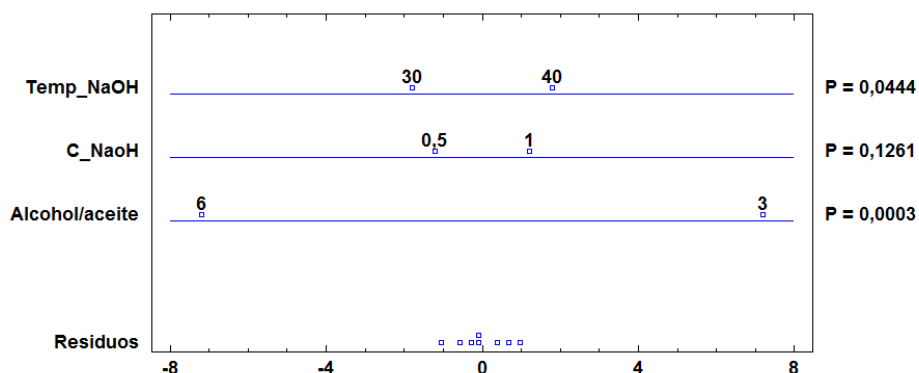


Fig. 4: Los efectos de las variables significativas en el porcentaje metil-ricinoleato del biodiésel obtenido para el proceso de refinación tradicional por destilación

Por otra parte, la Figura 5 muestra para el proceso de refinación por membrana el efecto y la interacción de las variables independientes sobre el porcentaje de biodiésel obtenido (metil-ricinoleato). Entre los tres parámetros estudiados, la relación molar alcohol/aceite es la variable más importante, ya que aumenta el contenido de metil-ricinoleato, al tener influencia positiva en la misma.

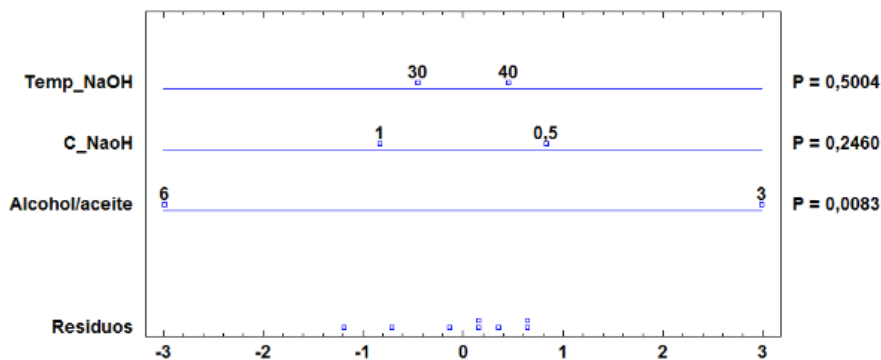


Fig. 5: Efectos de la relación molar metanol/aceite metil-ricinoleato en el biodiésel obtenido para el proceso de refinación por membrana

En la Figura 6 se puede observar cómo los tratamientos que dan mayores porcentaje en peso de metil-ricinoleato en la corriente de salida de biodiésel refinado (4 y 7) son los que emplean una relación molar de alcohol/aceite de 3:1, el cual es el nivel más bajo empleado en esta variable independiente; este resultado concuerda con De La Rosa *et al.* (2015), para quienes la máxima refinación de aceite a biodiésel se obtiene con ese nivel. De igual manera, sucede con la temperatura del NaOH a 40°C donde reportan máximo rendimiento para la relación molar establecida. Además, los resultados de la Figura 6 muestran también como los valores más bajos del contenido en peso de metil-ricinoleato en el biodiésel refinado se obtuvieron a partir del mayor nivel de concentración del NaOH (1.0%) esto se debe a que, al agregar más catalizador al proceso, se favorece la reacción de saponificación en lugar de la transesterificación, lo que contribuye a pérdidas en las etapas de purificación del biodiésel obtenido (López *et al.*, 2015).

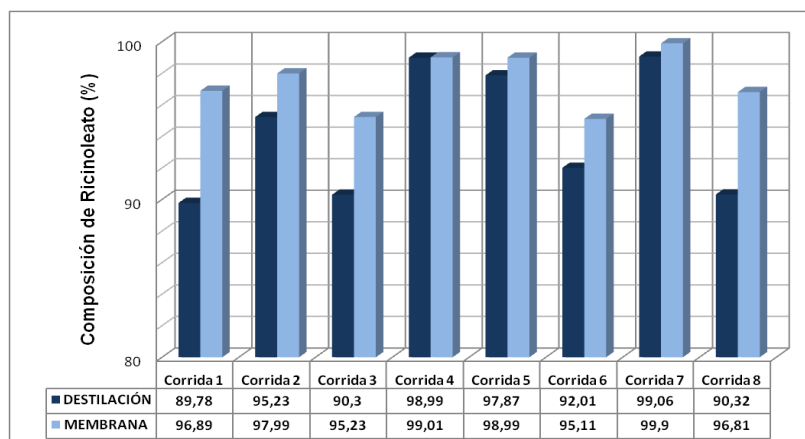


Fig. 6: Resultados del diseño experimental con respecto al porcentaje en peso de metil-ricinoleato para los dos procesos estudiados

En general, se aprecia que bajo las variables relación molar alcohol/aceite de 3:1, concentración del NaOH a 0,5% y temperatura del NaOH de 40°C (corrida 7), el sistema de refinado mediante destilación genera un biodiesel con 99,06% p/p de metil-ricinoleato, con una mezcla de impurezas que completa el 0,94% restante, mientras que la refinación por membrana produce un biodiésel al 99,90% p/p de metil-ricinoleato, con una cantidad prácticamente despreciable de trazas de glicerol y NaOH, observándose de esta manera, una mejora en la composición del 0,84% en comparación con la obtenida por el método tradicional.

En relación al consumo energético de cada uno de los procesos de refinación de biodiésel en estudio (destilación y por membrana), se observa que la relación alcohol/aceite es la variable estadísticamente más significativa ($p < 0,05$) para ambos (Figura 7). Esto se debe a que a medida que la proporción de alcohol requerido disminuya, menor será la energía requerida para su precalentamiento, bombeo y recuperación (Sakdasri *et al.*, 2017).

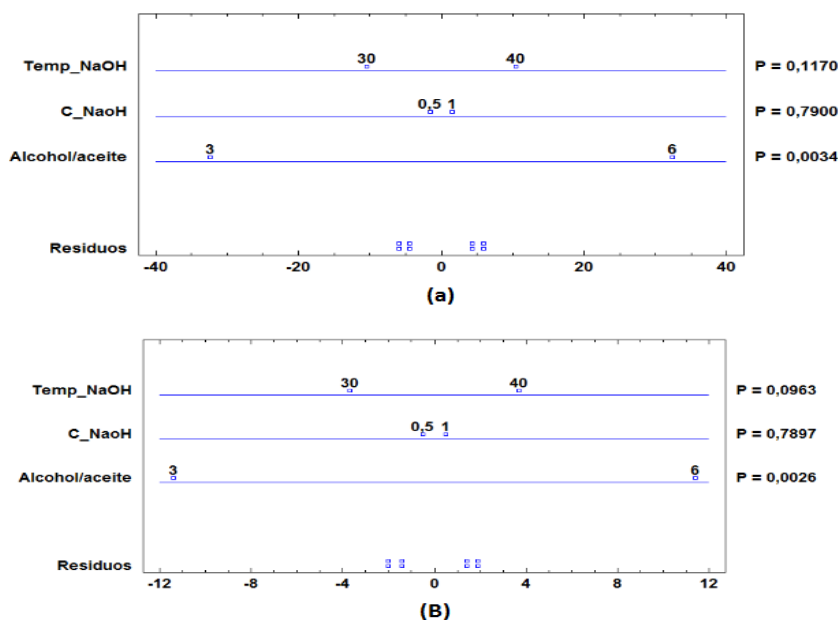


Fig. 7: Los efectos de las variables independientes sobre el consumo energético en los procesos de refinación de biodiésel: (a) Destilación y (b) Membrana

De igual forma, el proceso de refinación por membranas presenta una mejora considerable en relación al consumo energético, cuando se compara el proceso de refinación por destilación. Al observar el consumo energético de cada uno de los procesos (Figura 8), se aprecia que el proceso de refinación por membranas consume en su totalidad 68,43 kW/h mientras que el proceso de refinación por destilación consume 222,78 kW/h con una relación molar de 3:1, 0.5% en peso de NaOH y una temperatura del catalizador de 40°C (corrida 7), lo que representa una disminución de más de 300% en cuanto al consumo de energía, situación favorable que permite reducir los costos de operación del proceso. Esto se debe principalmente a que la mayor parte del consumo de energía se produce en la columna de destilación y los intercambiadores de calor, equipos involucrados en el área de refinación del proceso de obtención de biodiésel, siendo este de 165kW/h (Tabla 5). La refinación por membranas, por el contrario, sólo requiere del uso de una bomba para mantener el flujo constante y un intercambiador de calor para regular la temperatura, lo que reduce significativamente el consumo energético.

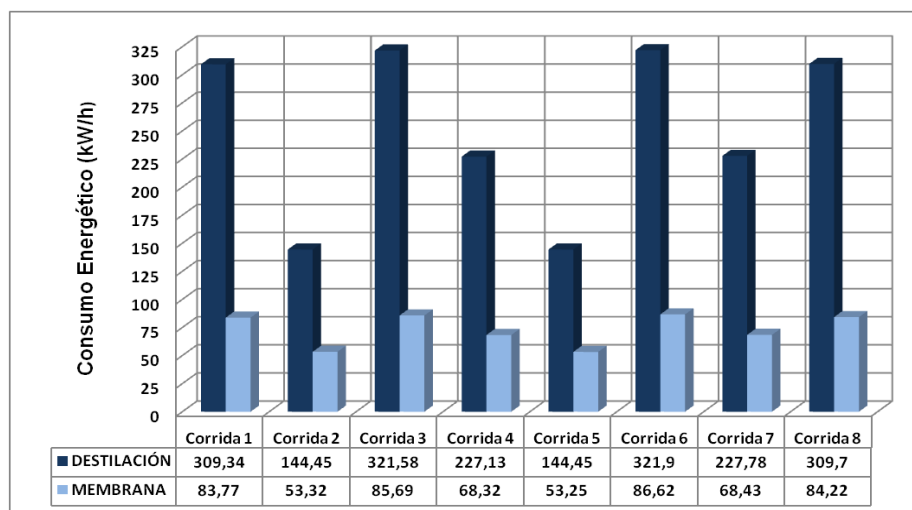


Fig. 8: Resultados del diseño experimental con respecto al consumo energético para los dos procesos estudiados.

Tabla 5: Consumo energético por equipo de cada método de refinación.

| Consumo energético por equipo (kW/h) | | |
|--------------------------------------|----------------------|---------------------|
| Proceso \ Equipo | Destilación | Membranas Cerámicas |
| E-100 | 5 | 5 |
| P-101 | $6,9 \times 10^{-5}$ | 7×10^{-5} |
| E-101 | 2,78 | 2,78 |
| CRV-100 | 30 | 30 |
| V-101 | 10 | 15 |
| E-102 | 10 | 15,65 |
| T-100 | 99 | - |
| E-103 | 1 | - |
| E-104 | 65 | - |
| TOTAL | 222,78 | 68,43 |

Una vez establecidas las condiciones de operación, determinada la composición del biodiésel obtenido y el consumo energético requerido, se compararon las propiedades del biodiésel obtenido en las simulaciones de ambos procesos con los valores registrados por Fernández *et al.* (2014), Keera *et al.* (2018) y Osorio *et al.* (2020), los obtenidos por las correlaciones de Giakoumis y Sarakatsanis (2019) y los establecidos por la norma ASTM D-6751-11a (2011) (Tabla 6).

Tabla 6: Comparación de las propiedades del biodiesel obtenido.

| Propiedad | Unidad | Refinación por Destilación | Refinación por membrana | Correlación | Fernández <i>et al.</i> (2014) | Keera <i>et al.</i> (2018) | Osorio <i>et al.</i> (2020) | ASTM D-6751-11a |
|-----------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Viscosidad cinemática | cSt | 1,37 | 1,365 | 3,76 | 4,31 | 15,4 | 14 | 1,9 – 6 |
| Densidad | Kg/m ³ | 943,2 | 938,5 | 898,98 | 894 | 946 | 923 | 900 (máx) |
| Poder Calorífico | Mj/kg | - | - | 39,65 | 38,54 | 38,34 | 37,34 | - |
| Número de cetano | - | - | - | 50,06 | 37 | 43,7 | 50 | 47 (min) |

La viscosidad cinemática obtenida en la simulación de ambos procesos está por debajo de los establecido por la normativa ASTM D-6751-11a (2011) y de los valores reportados por Fernández *et al.* (2014), Keera *et al.* (2018) y Osorio *et al.* (2020). Esto se debe a que Aspen Hysys[®] suele calcular valores relativamente bajos de viscosidad cinemática de compuestos hipotéticos (De La Rosa *et al.*, 2015). Sin embargo, el valor obtenido por la correlación de Giakoumis y Sarakatsanis (2019), se acerca al obtenido en escala de laboratorio por Fernández *et al.* (2014) y está dentro de los estándares ASTM para biodiesel. La diferencia en comparación con los valores de Keera *et al.* (2018) y Osorio *et al.* (2020), puede inferirse a que las propiedades del aceite de tártago pueden variar dependiendo de la región geográfica. Esta propiedad es importante debido a que afecta la inyección de combustibles, formación de mezclas y procesos de combustión. La alta viscosidad interfiere con el proceso de inyección e induce a una insuficiente atomización del combustible (García *et al.*, 2018), lo que provoca una combustión incompleta y formación de depósitos de carbono en los inyectores. Por otra parte, una baja viscosidad puede producir fugas de combustible entre los inyectores disminuyendo la eficiencia (Castillo, 2018).

Dentro de ese mismo orden de ideas, la densidad es otra importante propiedad del biodiesel ya que influye en la atomización del combustible, suele tener efectos en la desintegración del combustible inyectado dentro del cilindro. A medida que aumenta la densidad se debe inyectar más combustible (García *et al.*, 2018). Por esta razón, la norma ASTM establece que la densidad del biodiesel no puede exceder los 900 kg/m³. Si se comparan los valores obtenidos en las simulaciones de ambos procesos con el establecido por la norma, los mismos están por encima de lo permitido y son similares a los obtenidos por Keera *et al.* (2018) y Osorio *et al.* (2020). Esto se debe a que el metil-ricinoleato, el cual es el componente principal del biodiesel, no se encuentra en la base del simulador y sus propiedades debieron ser estimadas, lo que genera ciertas divergencias en los valores obtenidos. Sin embargo, el valor obtenido por la correlación se asemeja a lo reportado por Fernández *et al.* (2014) y se encuentra dentro de los parámetros permitidos por la norma ASTM.

En relación al poder calorífico, es importante mencionar que el simulador no determina esta propiedad y la norma ASTM no establece valores mínimos de poder calorífico. No obstante, Arias *et al.* (2011), señalan que en los biocombustibles el poder calorífico es en promedio 8% a 13% menor que el diesel producido a partir de petróleo con un valor de 45,091 MJ/kg. Si se compara el valor del poder calorífico obtenido por la correlación (39,65 MJ/kg) se observa que el mismo es 8,79% menor al del valor del diesel mineral, lo cual se encuentra dentro del parámetro. Adicionalmente, el valor de la correlación se acerca al obtenido por Fernández *et al.* (2014), Keera *et al.* (2018) y Osorio *et al.* (2020). En consecuencia, el biodiesel obtenido es adecuado para su utilización en motores.

Finalmente, el número de cetano es importante para determinar la calidad del combustible ya que un bajo valor significa una baja calidad de ignición, lo que disminuye el rendimiento del vehículo e incrementa la fatiga del motor, provocando la emisión de humo blanco en climas fríos siendo por ello necesario el empleo de aditivos para mejorar su calidad (Fernández *et al.*, 2014). Este valor no puede ser determinado por el simulador por lo que solamente se emplea la correlación de Giakoumis y Sarakatsanis (2019) con un valor de 50,06, el cual es igual al obtenido por Osorio *et al.* (2020) y está por encima del registrado por Fernández *et al.* (2014) y

Keera *et al.* (2018), pero cumple con lo establecido por la norma ASTM D-6751-11a (2011), garantizando la calidad del biodiesel obtenido.

CONCLUSIONES

Se determinó con el diseño de experimentos que de los tres parámetros estudiados (relación molar alcohol/aceite, temperatura y concentración del catalizador), la relación molar alcohol/aceite es la que impacta significativamente en la composición final de biodiésel y el consumo energético global de ambos procesos.

Las condiciones de operación que reflejan mejores resultados para los procesos de refinación de biodiésel estudiados son relación alcohol/aceite de 3:1, concentración NaOH de 0,5% en peso y temperatura del catalizador de 40°C.

Se demostró a través de la simulación que el proceso de producción de biodiésel mediante membrana cerámica permite obtener un producto de mayor pureza y con mayor eficiencia energética en comparación con el proceso tradicional o por destilación, lo que representa una excelente alternativa para la producción de biodiésel, no sólo de tártago, sino de cualquier otra planta oleaginosa.

El biodiésel obtenido del aceite de tártago empleando el proceso de refinación con membrana cerámica cumple con las especificaciones establecidas en la normativa ASTM D-6751-11a (2011), garantizando su calidad como combustible.

REFERENCIAS

Arias, D., Teuta, C. & Parra, J. (2011). Caracterización de las propiedades del biodiesel de girasol bajo la norma NTC de 100/04 y medición del poder calorífico. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 8(1), 73-80.

Atadashi, I.M., Aroua, M.K., Aziz, A.R. & Sulaiman, N.M. (2015). Crude biodiesel refining using membrane ultra-filtration process: An environmentally benign process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 24(4), 383-396.

ASTM D6751-11a (2011). *Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. ASTM International, West Conshohocken.

Basso, R., Meirelles, A. & Batista, E. (2017). Experimental data, thermodynamic modeling, and sensitivity analyses for the purification steps of ethyl biodiesel from fodder radish oil production. *Brazilian Journal Of Chemical Engineering*, 34(1), 341-353.

Castillo, K. (2018). *Caracterización teórica de parámetros del biodiesel y estudio de algunas de sus emisiones*. Trabajo de fin de grado para la obtención del título de Graduado de Ingeniería Química. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, España. http://oa.upm.es/53357/1/TFG_KEVIN_CASTILLO_FERNANDEZ.pdf

Chozhavendhan, S., Vijay, M., Fransila, B., Praveen, R. & Karthiga, G. (2020). A review on influencing parameters of biodiesel production and purification process. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 1-2(2020), 1-6

Coniwanti, P., Surliadji, L. & Triandini, D. (2019). The effects of catalyst type, molar ratio and transesterification time in producing biodiesel from beef tallow. *IOP Conf. Series: Materials, Science and Engineering*, 620(012019).

Correa, P., González, D. & Pacheco, J. (2016). Energías renovables y medio ambiente. Su regulación jurídica en Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 8(3), 179-183.

Costello, R. (2018). *Biodiesel Purification*. Costello Consulting & Services. Recuperado, septiembre 23, 2020, de rccostello: <https://rccostello.com/wordpress/biodiesel/biodiesel-purification-final-part-5/>

De La Rosa, L., Montero, E. & Ojeda, K. (2015). Diseño y simulación de una planta para la producción de biodiesel a partir de *Jathropa curcas L.* en el departamento de Bolívar. *Revista Ion*, 28 (1) 73-85.

Díaz, J., Meza, L. & Fernández, Y. (2015). *Diseño de una planta de producción de biodiesel a partir de la semilla de tártago*. Tesis de Grado. Departamento de Energética, Área de Ingeniería Química, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Venezuela.

Fernández, Y., García, A., Gutierrez, M. & Villalobos, M. (2014). *Obtención de biodiesel a partir de aceite de tártago (Ricinus communis L) a escala de laboratorio*. Maestría. Tesis, Departamento de Energética, Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Venezuela.

García, S., Lafargue, F., Labrada, B., Díaz, M. & Sánchez, A. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas L.* en la provincia de Manabi, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30 (1), 142-158.

Giakoumis, E.G. & Sarakatsanis, C.K. (2019). A Comparative Assessment of Biodiesel Cetane Number Predictive Correlations Based on Fatty Acid Composition. *Energies*, 12 (3), 422. Bajado octubre 12, 2020, desde <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/3/422>.

Giraldo, D., Arango, S. & Martinez, J. (2014). Efectos de los biocombustibles en la seguridad alimentaria en Colombia: Una Aproximación Sistémica. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(2), 7375-7385.

Keera, S., El Sabath, S. & Taman, A. (2018). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian Journal Petroleum*, 27, 979-984.

Koizumi, T. (2015). Biofuels and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 829-841.

López, L., Bocanegra, J. & Malagón, D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. *Revista Tecnología Química*, 19 (1), 155-172.

Okullo, A. & Tibasiima, N. (2017). Process Simulation of Biodiesel Production from *Jatropha Curcas* Seed Oil. *American Journal of Chemical Engineering*, 5 (4), 56-63.

Osorio, C., Gómez, N., Sandoval, F., Saini, R. Brar, S. & Avalos, A. (2020). Production of biodiesel from castor oil: a review. *Energies* 2020, 13 (10), 2467.

Ruiz, J., Sandoval, F. & Angel, J. (2016). Evaluación del efecto de cantidad de catalizador y relación metanol/aceite para la producción de biodiesel a partir del *Cocos nucifera L.* *Revista de energía de química y física*, 3 (9), 46-55.

Sakdasri, W., Sawangkeaw, R. & Ngamprasertsith, S. (2017). An entirely renewable biofuel production from palm oil with supercritical ethanol at low molar ratio. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34 (4), 1023-1034.

Yeboah, A., Ying, C., Lu, J., Xie, Y., Amoanimaa-Dede, H., Boateng, K. *et al.* (2020). Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the chemical composition and psychochemical properties. *Food Science and Technology*. s/v ahead of print 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/fst.19620>