



SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE PURIFICACIÓN Y SEPARACIÓN DE ACEITE DE COCINA USADO Y ACEITE DE *Jatropha curcas*

Karla Estefanía Mares-Molina^a, José Julio Tovar-Negrete^a, Miguel Ángel Guerrero-Muñoz^a

Fabricio Omar Barroso-Muñoz^{a*}

^a Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Noria Alta S/N,
Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México. faobamu@ugto.mx.

Resumen

En el presente trabajo se empleó el software Aspen PlusTM, para realizar la simulación de dos procesos para la producción de biodiésel empleando materias primas diferentes. Para el primer caso de estudio, se empleó aceite de cocina usado mientras que para el segundo se empleó aceite de *Jatropha curcas*. Para el caso donde se usó aceite de cocina usado, se simuló el proceso considerando las composiciones de los aceites más usados en la ciudad de León, Guanajuato. Para el caso de la simulación de la obtención el aceite de *Jatropha curcas* se simuló el proceso de manera integral, considerando desde la entrada de la semilla al proceso, la extracción del aceite, su posterior purificación y la obtención del subproducto conocido como torta. Como resultado, para el caso de la *Jatropha curcas*, en la extracción del aceite se emplearon dos solventes, el n-hexano y etanol, en la obteniéndose un rendimiento de 57.79% y 58.6%, respectivamente, que está dentro del rango reportado para la extracción por solventes, mientras que el rendimiento del aceite de cocina usado fue de 89.5%. La pureza de ambos aceites obtenidos en la simulación es mayor al 99%. Finalmente, el aceite purificado contiene, en ambos casos, menos del 1% en peso de ácido grasos libres, lo que lo hace ideal para producir biodiésel por transesterificación básica o cualquier otra ruta.

Palabras clave: Biodiésel; Simulación, Aceite de cocina usado; Jatropha curcas; Esterificación.



SIMULATION OF THE PURIFICATION AND SEPARATION PROCESSES OF WASTE COOKING OIL AND *Jatropha curcas* OIL

Abstract

In the present work, the Aspen PlusTM software was used to simulate two processes to produce biodiesel using different raw materials. For the first case study, waste cooking oil was used while for the second one, *Jatropha curcas* oil was used. For the case where waste cooking oil was used, the process was simulated considering the compositions of the most common waste oils in the city of Leon, Guanajuato. For the second case study, the process was simulated in an integral manner, considering since the extraction of oil from *Jatropha curcas* seeds, its subsequent oil purification and the obtaining of the residual by-product known as cake. As a result, in the case of *Jatropha curcas*, n-hexane and ethanol were used as solvents in the oil extraction, in which a yield of 57.79% and 58.6% respectively was obtained. These results are congruent with those reported previously for solvent extraction. The yield of waste cooking oil was 89.5%. The purity of both oils obtained in the simulation is greater than 99%, with less than 1% by weight of free fatty acids, which makes it ideal for producing biodiesel by basic transesterification or any other route.

Keywords: Waste cooking oil; Jatropha curcas; biofuel; esterification; solid-liquid extraction.

1. Introducción

1.1 Consumo mundial de energía y panorama en México.

Actualmente, los combustibles fósiles cubren en un 82% las necesidades energéticas de la población mundial. Además, las emisiones de gases de efecto invernadero se incrementaron en un 5.7% en el 2021. Mantener este modelo energético causará en algunos años el agotamiento de las pocas reservas que se disponen.

Por ello, se han propuesto diversas alternativas, entre ellas los biocombustibles, los cuales en el año 2021 tuvieron un aumento en la producción a nivel global de 4.1% y su consumo aumentó un 7.6% (British Petroleum, 2022), convirtiéndolos en una fuente prometedora para la sustitución de los combustibles fósiles. Sin embargo, la producción de biocombustibles en México no ha superado los 500 BEP/d y su



consumo ha crecido de 2000 a 4000 BEP/d en los últimos 10 años (British Petroleum, 2022).

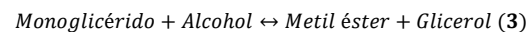
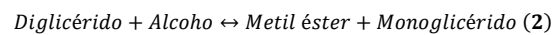
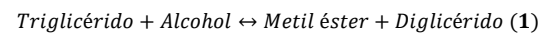
1.2 Biocombustibles

Los biocombustibles se obtienen a partir de biomasa, es decir, cualquier tipo de materia orgánica con origen biológico de organismos recientemente vivos o desechos metabólicos. Se clasifican como de primera generación, donde la materia prima es de origen agrícola y de consumo humano; de segunda generación con una producción a partir de residuos agrícolas y forestales y de tercera generación conformada por vegetales no alimenticios con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, como las algas (Maciel, 2009).

1.3 Biodiésel

El biodiésel se define como una mezcla de ésteres monoalquílicos de cadena larga de ácidos grasos a partir de una transesterificación catalítica con alcoholes de cadena corta, como el metanol y etanol. Es considerado como un sustituto potencial del diésel convencional (Osorio y col., 2019). El método más utilizado para producir biodiésel es la transesterificación, que puede ser básica, ácida o enzimática.

Consiste en la reacción de los triglicéridos presentes en el aceite con un alcohol de bajo peso molecular y un catalizador. Como productos se tienen alquil ésteres de ácidos grasos y glicerol. Durante este proceso se tienen las tres reacciones consecutivas reversibles (Ecuaciones 1 a 3).



De manera general, para la producción de biodiésel, el aceite se mezcla con alcohol en una relación determinada y se agrega el catalizador dentro de un reactor CSRT a cierta temperatura. Posteriormente se recupera el alcohol y se recircula en el proceso. Al final de la reacción, la mezcla pasa por una extracción líquido-líquido con glicerol, para así separar el biodiésel.

Este biocombustible presenta varias ventajas como su capacidad de renovación, biodegradabilidad, no toxicidad y reducciones netas de CO_2 de 100%, de SO_2 cercanas al 100%, de hollín entre 46-60%; de CO entre 10-50%; HC entre 10-50%; y de aldehídos y compuestos



poliaromáticos en torno a 13% (Osorio y col., 2019).

1.4 Jatropha curcas

La semilla *Jatropha curcas* (JC) proviene de un arbusto de la familia *Euphorbiaceae*. Es una planta nativa de México y América Central, pero se puede encontrar en otras áreas de Latinoamérica, África, India y el sureste de Asia. El contenido de aceite reportado varía con la zona geográfica, pero está entre el 63.16% y 66.40%, el cual es mayor que en otras semillas como de soya (18.35%), linaza (33.33%) y de palma (44.6%) (Yusuff, 2021). Dentro de su composición química del aceite, los triglicéridos conforman más de un 80%. En cuanto a los ácidos grasos que están en mayor cantidad son el oleico, linoleico, palmítico y esteárico (Córdova-Albores y col., 2014).

Es importante mencionar que la semilla contiene ésteres de forbol (PE) que, al ser ingeridos pueden causar una severa inflamación en los tejidos e incluso promover el crecimiento de tumores. En México se han localizado variedades nativas en Veracruz, Hidalgo, Puebla, Yucatán, Quintana Roo y Morelos (Pérez y col., 2022).

1.5 Extracción de aceite de Jatropha curcas

Existen dos alternativas para la extracción del aceite; medios mecánicos y mediante el uso de solventes. Con el método mecánico la recuperación es menor que la que emplea solvente, es menos costosa y más segura. Además, no se requiere una separación posterior del solvente y se evita el uso de compuestos tóxicos (Yate y col., 2020). Una desventaja de la extracción mecánica, es que se obtiene una torta residual la cual puede contener todavía una considerable cantidad de aceite que podría ser extraído con un solvente.

Por otra parte, con la extracción con solvente se obtiene una recuperación de aceite de hasta 70-90% y a gran escala es más económica y rentable. Se ha reportado que el n-hexano es el solvente que presenta mejor rendimiento (Yusuff, 2021). No obstante, es corrosivo, inflamable y genera emisiones tóxicas. Por lo anterior, el etanol, podría reemplazarlo, ya que es un solvente biodegradable y no tóxico.

1.6 Aceite de cocina usado (ACU)

El 75-85% del costo de la producción de biodiésel corresponde a la materia prima (Osorio y col., 2019). De acuerdo con



varios estudios, el rendimiento al emplear ACU es similar al obtenido con aceite virgen (superior al 90%) pero con una reducción de costos entre el 60 y 90% (Villamarín y Albán, 2015). En México no hay un sistema especial para el manejo del ACU, por lo que es arrojado por los desagües, lo que genera daños ambientales graves. Al darle un uso en la producción de biodiésel se evitaría lo anterior.

1.7 Catalizadores

Utilizar un catalizador en la reacción de transesterificación ayuda a que el alcohol pueda disolverse de mejor forma con la fase oleosa (Vasić y col., 2020). Además, el aceite (en especial si es residual), para ser empleado en la producción de biodiesel, debe tener un contenido de ácidos grasos libres (FFA) por debajo del 1% en peso para evitar la saponificación al usar un catalizador alcalino para lograr un alto rendimiento y pureza (Jansri y col., 2011).

El proceso catalítico ácido evita la saponificación a pesar de que el aceite empleado contenga una gran cantidad de FFA. No obstante, se requiere una etapa de separación y purificación, el tiempo de reacción es mayor y la temperatura requerida es más alta.

Una alternativa es tener una etapa de pretratamiento (esterificación) usando un catalizador ácido que convierta los FFA en ésteres. De esta manera, se puede llevar a cabo la transesterificación utilizando una base para convertir los triglicéridos en ésteres, sin el riesgo de formar jabón en el proceso. La desventaja es que puede ser costosa ya que se requiere separar el catalizador, purificar los metil ésteres, hay corrosión y el consumo alto de energía (Elias y col., 2020).

1.8 Alcohol

Se ha reportado en varios estudios que el metanol es el que más se utiliza al ser menos costoso. Es importante mencionar que la relación aceite-alcohol varía dependiendo del tipo de catalizador. Si es ácido, la relación es mayor, llegando a 1:15 aceite-metanol, en cambio con un catalizador alcalino sería 1:6. Es un factor importante ya que si no hay metanol en exceso habría una reducción en la producción de biodiésel (Suzihaque y col., 2022).

2. Estado del arte

Después de realizar un análisis de las investigaciones que se han realizado sobre la purificación del aceite para la



producción de biodiésel, es evidente que en los últimos años se han generado múltiples avances en el uso del aceite de *JC* y *ACU* como materia prima, desde la optimización de los métodos convencionales como el mecánico y el químico, como el desarrollo de técnicas más sofisticadas, por ejemplo, el enzimático o usar CO_2 supercrítico. Sin embargo, su investigación aún no se encuentra ampliamente desarrollada considerando la semilla de *JC* de México ni su producción a nivel industrial. En este sentido, el presente proyecto de investigación se explora de manera detallada tanto la semilla de *JC*, realizando la simulación del proceso desde la extracción del aceite a partir de la semilla. Así como la simulación del proceso del proceso desde su fase inicial empleando *ACU* como materia prima para la producción de biodiésel a nivel industrial, como parte de esta búsqueda colectiva de desarrollar alternativas sustentables ante la crisis ambiental actual.

3. Metodología

3.1. Caracterización del aceite de *JC*

Córdova-Albores y col. (2014), determinaron que el aceite contenido en la

semilla proveniente del estado de Chiapas en México corresponde al 60% en peso. De igual forma Guerrero (2021) reporta los compuestos presentes en el aceite de *JC* (Tabla 1).

3.2 Caracterización de la semilla de *JC*

La mayoría de los artículos que hablan sobre la extracción de aceite de *JC* no caracterizan en su totalidad la materia prima. Muchas veces solo mencionan la cantidad de materia orgánica empleada y la torta después de la extracción. Sobre la semilla su composición reportada es de lignina, celulosa y cenizas con una fracción másica de 0.3568, 0.5172 y 0.126 respectivamente (Kethobile y col., 2020).

3.3 Simulación de obtención de aceite de *JC* empleando *n*-hexano como extractante

Para la simulación en Aspen Plus™. El modelo termodinámico usado fue UNIFAC-Dortmund, debido a su capacidad de representar apropiadamente la mezcla de lípidos, los equilibrios ELV y ELL de las mezclas de metanol-biodiesel y metanol-glicerol, además de predecir la solubilidad del agua en el biodiesel (Zhang et al., 2003).



Tabla 1. Composición de FFA en aceite de JC

Componente	Fracción másica
Ácido oleico	0.4984
Ácido linoleico	0.2237
Ácido palmítico	0.1672
Ácido esteárico	0.1108

El proceso se dividió en cuatro etapas, la primera corresponde a la extracción del aceite a partir de la semilla de *JC* y recirculación del n-hexano (Figura 1), seguida de la esterificación (Figura 2), después está la purificación del aceite y la neutralización de la corriente ácida (Figura 3) y, por último, está la recuperación del metanol el cual se recircula a la etapa de

esterificación (Figura 4). En la extracción del aceite, en el mezclador M-1, se ingresaron tanto la semilla como el aceite. Se consideró que la *JC* se conforma de 60% en peso de aceite y 40% de material sólido. Fue necesario importar una base de datos externa debido a que Aspen PlusTM no cuenta con los datos de la lignina y celulosa.

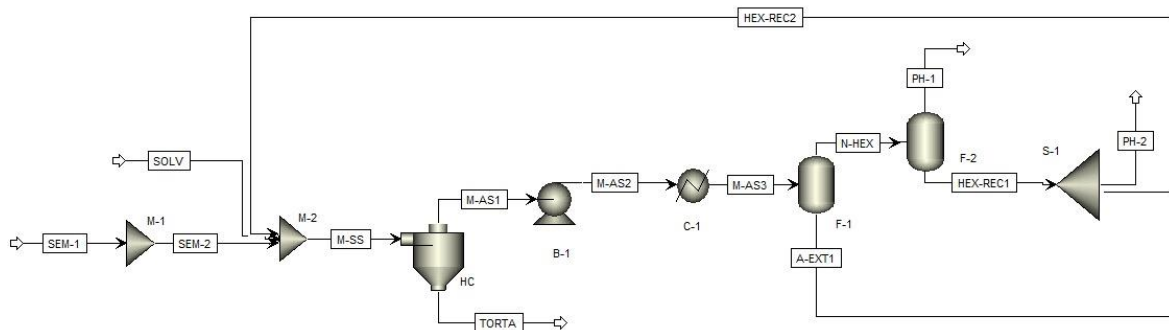


Figura 1. Extracción del aceite de JC

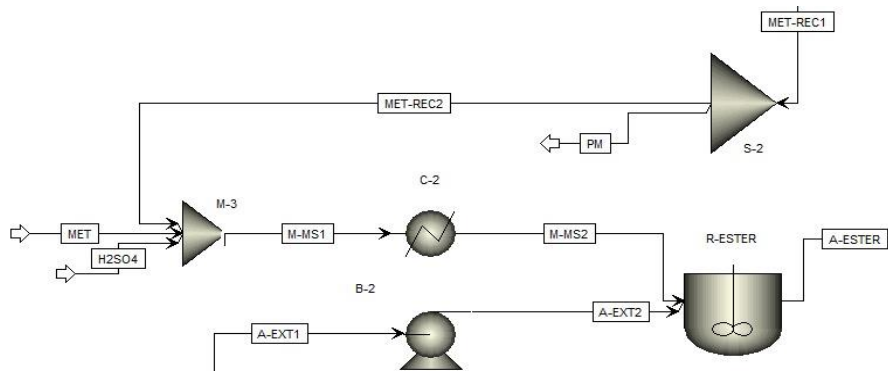


Figura 2. Esterificación del aceite

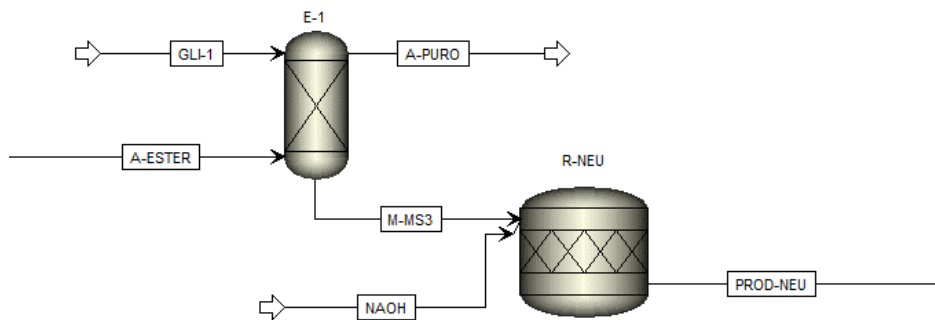


Figura 3. Purificación del aceite de *JC* y neutralización n-hexano

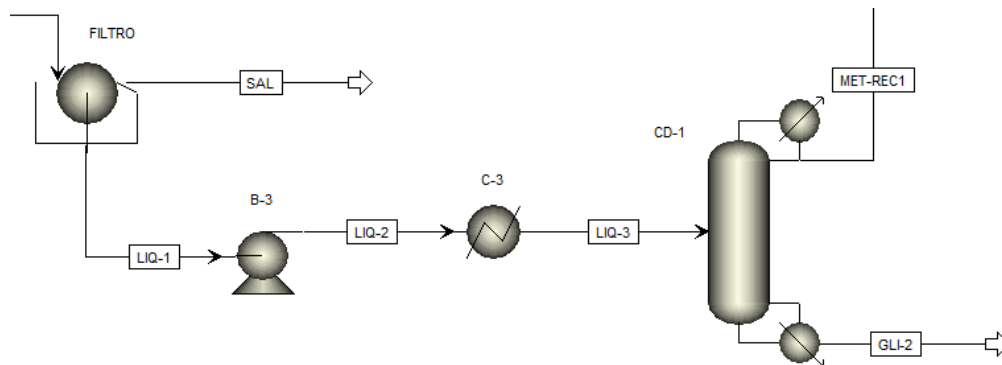


Figura 4. Recuperación del metanol

Se ingresaron al proceso simulado 666.66 kg/h de semilla. El segundo mezclador (M-2) se incorporó el solvente con la semilla

triturada, en este caso la relación solvente/sólido (semilla) para la extracción del aceite la reportó Yusuff A.



(2021), la cual es 8:1 mL/g y el tamaño de partícula de 0.94 mm. Se emplearon 8810 kg/h de solvente, la cual después se ajustó con la recirculación.

Después esta mezcla entra a un hidrociclón (HC) para el proceso de extracción sólido-líquido, por la corriente inferior sale la torta de *JC*, que sería el material sólido (cenizas, lignina y celulosa, que forman la torta residual), y por la corriente superior sale el solvente, en este caso el n-hexano, junto con el aceite.

Posteriormente esta corriente (M-AS3) entra a un separador (flash) que representa un roto-evaporador para retirar la mayor cantidad del solvente del aceite, y con ayuda de otro flash se condensa este último para su recirculación y ser nuevamente empleado en la extracción.

El aceite extraído de las semillas M_o respecto al peso de la semilla M_s usualmente llamado rendimiento de aceite (%Y), se calculó con la Ecuación 4.

$$\%Y = \frac{M_o}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Por otro lado, la eficiencia de la extracción del aceite η se calculó dividiendo el aceite extraído (M_o) con el contenido de aceite

presente en la semilla S_o , de acuerdo con la Ecuación 5.

$$\eta = \frac{M_o}{S_o} \times 100 \quad (5)$$

Para que el contenido de FFA en el aceite sea menor al 1% en peso, se usó un reactor de esterificación (R_EST) a 60°C y 1 atm. Se ingresaron 1.2752 kmol/h de metanol con 0.0361 kmol/h de ácido sulfúrico que actúa como catalizador.

El modelo y los parámetros cinéticos (Tabla 2) fueron reportados por Jansri S. y col. (2011). A continuación, se muestra la reacción de esterificación y neutralización. La cantidad de NaOH necesaria para llevar a cabo la reacción fue $1H_2SO_4:2 NaOH$

3.4. Simulación de obtención de aceite de JC empleando etanol como extractante.

De manera similar el proceso empleando etanol, es similar a los mostrados en la Figuras 2, 3, 4 y 5, solamente sustituyendo hexano por etanol. Se ingresaron 11520 kg/h de etanol. Los procesos de esterificación, purificación del aceite-neutralización y recuperación de metanol se llevaron a cabo a las mismas condiciones.



Tabla 2. Parámetros cinéticos para la esterificación (Jansri y col. 2011).

Reacción	k (L/mol min)	Ea (cal/mol)
Directa	1.34	17997
Reversible	0.682	129

3.5 Simulación del proceso de purificación de ACU.

La Figura 5 se muestra la eliminación de cenizas y agua y la esterificación del ACU. El resto del proceso es igual al de JC. De acuerdo con RAFRINOR S.L. (2020), un litro de ACU tiene 85% de aceite, 10% de agua y 5% de materia orgánica. La caracterización del ACU (Tabla 3) fue reportada por Grosmann (2022). Se ingresaron 1000 kg/h de ACU a un decantador (D-1) para eliminar el agua y cenizas del aceite. La corriente del aceite libre de estos dos componentes (A-ACID) se llevó a un reactor de esterificación (R-ESTER) que opera a 60 °C y 1 atm. Después la corriente PRO-

NEU ingresó a una columna de extracción líquido-líquido (E-1) de 6 etapas operando 45°C y 5 atm, donde se usó glicerol como extractante con un flujo de 120 kg/h. Por el domo sale el aceite purificado (PURE-OIL), mientras que la corriente del fondo (M-MS3) pasa por un reactor de neutralización (R-NEU) que se configuró igual que en el proceso usando n-hexano. La corriente que sale del reactor (PRO-NEU) se introduce en un filtro (FILTRO) para eliminar la sal producida en la neutralización y luego se introduce la corriente líquida (LIQ-1) a una columna de destilación que opera con 25 etapas y se recircula al reactor de esterificación.

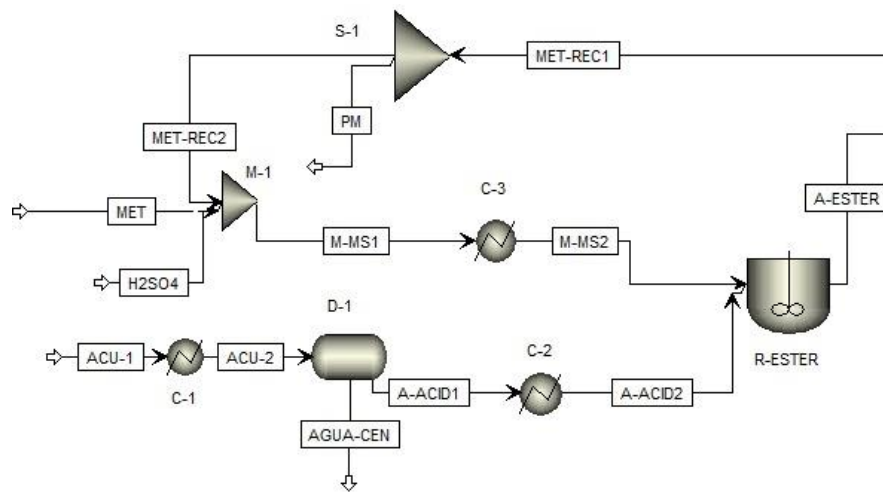


Figura 5. Eliminación de cenizas y agua del ACU y la esterificación

Tabla 3. Caracterización del CU (Grossmann y col., 2022)

Componente	Fracción másica
Trioleina	0.7184
Dioleina	0.0309
Monoleina	0.0063
Ácido oleico	0.0801
Ácido linoleico	0.0325
Ácido palmítico	0.0119
Ácido estérico	0.009
Agua	0.11
Ceniza	0.0009

4. Resultados

4.1 JC usando *n*-hexano como solvente

Después del proceso de extracción, se obtuvieron 963.15 kg/h de aceite con 3.5%

en peso de FFA. La torta residual tiene un 3.87% en peso de aceite. Tras la esterificación, el aceite tiene un contenido de 0.24% en peso de FFA y un 4.73% en peso de impurezas (agua, H_2SO_4 , metanol



y n-hexano). No obstante, este porcentaje fue reducido al llevar a cabo la purificación, donde el aceite tiene una pureza del 99.5% en peso. El rendimiento y la eficiencia del proceso fue de 57.79% y 96.31% respectivamente.

4.2 *JC usando etanol como solvente*

Se obtuvieron 976.63 kg/h de aceite con 3.05% en peso de FFA después del proceso de extracción. La torta residual tiene 3.65% en peso de aceite. Con la esterificación, el aceite tiene un contenido de 0.23% en peso de FFA y un 4.17% en peso de impurezas (agua, H_2SO_4 , metanol y n-hexano). Sin embargo, este porcentaje fue reducido al llevar a cabo la purificación, donde el aceite tiene una pureza del 99.99% en peso. El rendimiento y la eficiencia del proceso fue de 58.60% y 97.66% respectivamente.

4.1 *Aceite de cocina usado*

Como resultado de la eliminación de cenizas y agua, el *ACU* tiene un 0.19% en peso agua y 15% en peso de FFA. Tras la esterificación, el aceite tiene un contenido de 0.85% en peso de FFA y un 14.83% en peso de impurezas (agua, H_2SO_4 y metanol). No obstante, este porcentaje fue reducido al llevar a cabo la purificación,

donde el aceite tiene una pureza del 99.99% en peso. El rendimiento del proceso fue de 89.5%.

5. **Discusión de resultados**

En el presente trabajo se simularon los procesos para la obtención de aceite de *JC* empleando n-hexano y etanol como extractantes. Destacando que para el primero, se simuló el proceso desde la extracción del aceite a partir de la semilla directamente. Para la simulación de ambos procesos, fue necesario ingresar los parámetros termodinámicos requeridos en Aspen PlusTM para considerar la lignina, la celulosa y las cenizas presentes en el proceso real. De acuerdo con la simulación para la extracción de aceite de *JCU* en el que se usó n-hexano, el rendimiento de extracción fue del 57.79% que es muy parecido al reportado en la literatura. Para el segundo caso donde se empleó etanol, se el rendimiento fue de 58.60% que está dentro del rango reportado en la literatura (44.27% al 60.3%). Por otra parte, la eficiencia para ambos casos fue mayor al 95%, 96.31% y 97.66%, respectivamente, por lo que cerca del 3-4% del aceite no pudo ser retirado y se quedó en la torta junto con 4.2% del solvente alimentado.



El contenido inicial de FFA en el aceite extraído con n-hexano era del 3.5% y después de la esterificación de 0.24%, el cual es menor al 1% requerido para producir biodiesel por catálisis básica. El contenido de FFA en el aceite extraído con etanol también fue menor al 1%. Por lo anterior, para ambos casos, sería posible emplear el aceite para producir biodiesel por transesterificación básica. El aceite purificado que sale de la columna de extracción contiene 0.5% en peso de n-hexano y 0.17% de etanol, pero que no contiene nada de agua, ni H_2SO_4 y su pureza del aceite es mayor al 99%. Para ambos casos, el H_2SO_4 se eliminó completamente de la corriente que sale por el fondo de la columna de extracción lo cual ya no supondrá un problema para los equipos posteriores al evitar la corrosión. En el caso del proceso de n-hexano se recuperó 92.63% del metanol con una pureza del 99.99%. En el proceso con etanol, se recuperó el 92.51% con la misma pureza.

Respecto a la simulación del proceso en el que se consideró *ACU*, se logró eliminar por completo la materia orgánica presente después de su uso, resultando una composición de 0.19 % en peso de agua.

El contenido inicial de FFA en el aceite es del 15% el cual es muy alto, pero se redujo al 0.85% por lo que está dentro del límite. El aceite que sale de la columna de extracción tiene una pureza del 99.99%, mayor que la de *JC*, debido a que en este último tenía trazas de solvente, pero son aceptables. También se eliminó todo el H_2SO_4 de la corriente de fondo de la columna de extracción.

El rendimiento del *ACU* fue de 89.5%, el cual es mayor con respecto al de *JC*. Esto se debe a que el contenido del *ACU* es prácticamente aceite; en cambio la *JC* un 40% se compone de sólidos, por lo que la cantidad de aceite disponible es menor. Por último, en este proceso se recuperó el 99.38% del metanol. Cabe mencionar que los procesos simulados en una fase posterior podrían ser optimizados empleando técnicas de optimización rigurosas, con la finalidad de obtener el mejor en proceso en términos del diseño de los equipos, flujos de solventes, consumo de energía, etc.

6. Conclusiones

Se lograron simular el proceso para la obtención de aceite de *JC*, considerando desde la extracción del aceite de la semilla



hasta la eliminación de los FFA, empleando dos solventes. El rendimiento de extracción fue del 57.79% al usar n-hexano y del 58.6% al emplear etanol. Ambos valores se están dentro del rango que se menciona en la literatura. Para el caso del ACU, el proceso simulado muestra resultados congruentes con los reportados por otros autores. Lo anterior evidenciando que el modelo termodinámico empleado y parámetros ingresados fueron los adecuados para al realizar la simulación. La pureza de ambos aceites obtenidos en la simulación es mayor al 99%. Al tener menos del 1% de FFA, se puede producir biodiésel por medio de la ruta básica, la cual es la más empleada en comparación con la ruta ácida. Además, se propuso un proceso para el reuso de ACU que puede tener un impacto directo en el cuidado del medio ambiente.

Referencias bibliográficas

British Petroleum. (2022). Statistical Review of World Energy 2022 <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>

Córdova-Albores, L. C., Rios, M. Y., Barrera-Necha, L. L., & Bautista-Baños, S. (2014). Chemical compounds of a native *Jatropha curcas* seed oil from Mexico and their antifungal effect on *Fusarium oxysporum* f. sp. *gladioli*. *Industrial Crops and Products*, 62, 166–172.

Elias, S., Rabiou, A. M., Okeleye, B. I., Okudoh, V., & Oyekola, O. (2020). Bifunctional heterogeneous catalyst for biodiesel production from waste vegetable oil. *Applied Sciences*, 10(9), 1-13.

Grosmann, M. T., Andrade, T. A., Bitonto, L. di, Pastore, C., Corazza, M. L., Tronci, S., & Errico, M. (2022). Hydrated metal salt pretreatment and alkali catalyzed reactive distillation: A two-step production of waste cooking oil biodiesel. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 176, 108980.

Guerrero, M. A. (2021). Simulación de un proceso intensificado para la producción de biodiésel a partir de aceite de *jatropha curcas*. Tesis de maestría. Universidad de Guanajuato.

Jansri, S., Ratanawilai, S. B., Allen, M. L., & Prateepchaikul, G. (2011). Kinetics of methyl ester production from mixed crude



palm oil by using acid-alkali catalyst. *Fuel Processing Technology*, 92(8),1543–1548.

Kethobile, E., Ketlogetswe, C., & Gandure, J. (2020). Torrefaction of non - oil *Jatropha curcas* L. (*Jatropha*) biomass for solid fuel. *Heliyon*, 6(12), e05657.

Monika, Banga, S., & Pathak, V. V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Energy Nexus*, 10, 100209.

Osorio Canul, M., García Magallanes, G., Herrera Lugo, A., & Novelo Moo, T. (2019). Propuesta de producción de biodiésel mediante aceite vegetal usado. *Revista de Energías Renovables*, 23–28.

Pérez, G., Islas-Samperio, J. M., Manzini, F., Suárez, R., Barahona-Pérez, L. F., & Aguillón, J. E. (2022). Huella ambiental de la producción de biodiésel utilizando *Jatropha curcas mexicana* en suelos marginales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 22-33

Santos, S. B. Dos, Martins, M. A., Caneschi, A. L., Aguilar, P. R. M., & Coimbra, J. S. D. R. (2015). Kinetics and Thermodynamics of Oil Extraction from *Jatropha curcas* L. Using Ethanol as a

Solvent. *International Journal of Chemical Engineering*, 2015, 871236.

Suzihaque, M. U. H., Alwi, H., Kalthum Ibrahim, U., Abdullah, S., & Haron, N. (2022). Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 63(1), S490–S495.

Vasić, K., Podrepšek, G. H., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2020). Biodiesel production using solid acid catalysts based on metal oxides. *Catalysts*, 10(2), 237-257.

Yate, A. V., Narváez, P. C., Orjuela, A., Hernández, A., & Acevedo, H. (2020). A systematic evaluation of the mechanical extraction of *Jatropha curcas* L. oil for biofuels production. *Food and Bioproducts Processing*, 122, 72–81.

Yusuff, A. S. (2021). Parametric optimization of solvent extraction of *Jatropha curcas* seed oil using design of experiment and its quality characterization. *South African Journal of Chemical Engineering*, 35, 60–68

Zhang, Y., M.A., McLean, D., & Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, 1-16