

Estudio técnico de la producción de biodiesel a partir del aceite de piñón empleando Aspen Plus

Giovanni Meneses-De Jesús, Eduardo Hernández Aguilar, Nayeli Gutiérrez-Casiano, Luis Alberto Sánchez Bazán, Anselmo Osorio Mirón y Luis Antonio Velázquez Herrera *

Laboratorio 112, UVER-CA-226, Universidad Veracruzana, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: luisvelazquez@uv.mx; Tel.: (+52 1 272 282 9722).

Artículo de divulgación científica

Recibido: 17 de abril de 2025 Aceptado: 4 de junio de 2025 Publicado: 20 de junio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.439>

Resumen: A fin de mitigar el cambio climático en el mundo, los biocombustibles, particularmente el biodiésel, emergen como una propuesta alternativa sustentable con el medio ambiente. El biodiesel ha presentado un resurgimiento en la investigación debido a la amplia variedad de materias primas que pueden ser utilizadas para su producción en masa con el fin de descarbonizar el transporte y el sector industrial. Una de las materias primas viables es el aceite de piñón debido a que está compuesto por ácidos grasos que pueden transesterificarse y generar un alto rendimiento de biodiesel. Por tal motivo, en la presente investigación se llevó a cabo una simulación del proceso de obtención de biodiesel a partir del aceite de piñón empleando el simulador de procesos Aspen Plus y los modelos termodinámicos UNIQUAC y NRTL para simular los componentes que intervienen en el proceso. Los resultados obtenidos al incluir una estequiometría de mayor complejidad fueron un incremento de la concentración de biodiesel en un 3.48% y reduciendo el consumo de metanol en un 48.8%.

Palabras clave: Biocombustible; biodiésel; sostenibilidad; simulación de procesos.

Introducción

Los biocombustibles desempeñan un papel crucial en la descarbonización del transporte y el sector industrial en la actualidad, al ofrecer una solución baja en carbono y amigable con el medio ambiente. Hoy en día existen tecnologías que pueden disminuir las emisiones de CO₂ en los vehículos ligeros a corto plazo y los camiones pesados, barcos y aviones con opciones limitadas a largo plazo, reduciendo en un 86% las emisiones de efecto invernadero (Xu *et al.*, 2022; OECD, 2023). Estas nuevas fuentes de energía proveniente de biomasa agroindustrial benefician la disminución de gases de efecto invernadero producido a partir de los combustibles fósiles.

Los biocombustibles se clasifican en cuatro generaciones: la primera, derivada de cultivos alimentarios como maíz o caña de azúcar; la segunda, a partir de residuos agrícolas o cultivos no alimentarios; la tercera, producida con algas o microorganismos; la cuarta, emplea tecnologías avanzadas para capturar carbono, resultando potencialmente en emisiones negativas de carbono. (Lombana Coy y Vega Jurado, 2016) El aceite de piñón emerge como segunda generación, este presenta en su índice de ácidos grasos alto, los cuales son componentes cruciales en la producción de biodiesel. En México, la planta crece de manera silvestre en diversas entidades federativas, tales como Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Sinaloa, Sonora, Puebla, Hidalgo y Morelos. Sin embargo, su uso tradicional está limitado principalmente a las comunidades de la región de Papantla en Veracruz, la Huasteca Hidalguense y la Sierra de piñón, produciendo alrededor de 182.57 toneladas en el año 2024 y las 255.75 toneladas para 2030 (Góngora *et al.*, 2018; Soto, *et al.*, 2014). En la Figura 1 se muestra la planta de piñón con su respectiva semilla de donde se extraen los aceites para la producción de biodiesel.



Figura 1. Planta de piñón

El uso de herramientas de simulación como Aspen Plus representa una estrategia eficaz para el análisis y diseño de procesos en la industria de los biocombustibles. En particular, la simulación del proceso de producción de biodiésel a partir del piñón permite modelar rigurosamente cada una de las etapas involucradas, incluyendo la extracción del aceite, la reacción de transesterificación y las operaciones de separación y purificación. Aspen Plus proporciona un entorno robusto para la integración de datos termodinámicos y cinéticos, facilitando la evaluación de parámetros operativos, el balance de materia y energía, así como la optimización del rendimiento del proceso. Esta herramienta resulta especialmente valiosa en el desarrollo de procesos sostenibles, al permitir la identificación de condiciones óptimas que minimicen el impacto ambiental y maximicen la eficiencia energética (Okullo y Tibasiima, 2017).

La presente simulación del proceso de producción de biodiésel se fundamenta en el uso del aceite derivado del piñón *curcas* como materia prima, con el propósito de predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas. Mediante el empleo del simulador Aspen Plus, se modelaron las principales etapas del proceso, lo que permitió estimar la producción de biodiésel y realizar un análisis económico preliminar a partir de las herramientas integradas en el software. Uno de los objetivos principales fue la optimización del consumo de metanol, buscando minimizar su uso sin comprometer la eficiencia del proceso. Para representar con mayor precisión la reacción de transesterificación, se amplió la estequiometría del modelo, incorporando un mayor número de especies químicas relevantes, tales como triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos, metanol, glicerol y ésteres metílicos de ácidos grasos. Esta ampliación permitió una descripción más detallada de las interacciones químicas involucradas, mejorando la fidelidad del modelo y proporcionando una base más robusta para la evaluación de la viabilidad técnica y económica del proceso a escala industrial.

Desarrollo

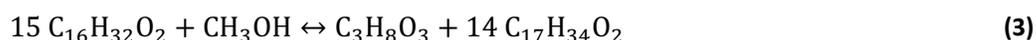
La base del presente estudio se fundamenta en la caracterización del perfil de ácidos grasos presentes en el aceite extraído de las semillas de piñón. Esta caracterización es esencial para definir la composición química del sistema a simular, ya que los ácidos grasos determinan las propiedades del aceite y su comportamiento durante la reacción de transesterificación. En la Tabla 1 se presenta la distribución de los principales ácidos grasos identificados, entre los cuales destacan el ácido oleico, linoleico y palmítico, debido a su alta concentración y relevancia en la conversión a ésteres metílicos (Serouti *et al.*, 2021). Estos compuestos fueron considerados como base para la definición de las corrientes de alimentación en el simulador Aspen Plus, permitiendo una representación más precisa del sistema real.

Tabla 1. Compuestos de la semilla de Piñón (Hamidou *et al.*, 2016).

Ácidos grasos	Formula química	Composición (%)
Ácido mirístico	$C_{14}H_{28}O_2$	0.11±0.01
Ácido pentadecanoico	$C_{15}H_{30}O_2$	0.03±0.01
Ácido palmitoleico	$C_{16}H_{30}O_2$	1.62±0.22
Ácido palmítico	$C_{16}H_{32}O_2$	15.80±0.36
Ácido hexadecanoico	$C_{17}H_{32}O_2$	0.14±0.04
Ácido heptadecanoico	$C_{17}H_{34}O_2$	0.22±0.04
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2$	39.58±4.07
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2$	30.41±4.54
Ácido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2$	10.79±0.21
Ácido eicosenoico	$C_{20}H_{38}O_2$	0.19±0.06
Ácido araquídico	$C_{20}H_{40}O_2$	0.5±0.11
Ácido behénico	$C_{22}H_{44}O_2$	0.07±0.02
Ácido lignocérico	$C_{24}H_{48}O_2$	0.07±0.03
Ácido pentacosanoico	$C_{25}H_{50}O_2$	0.02±0.01

Los ácidos grasos oleico, linoleico y palmítico constituyen los principales componentes del perfil lipídico del aceite de piñón, y son determinantes en la eficiencia del proceso de transesterificación. Estos ácidos se encuentran esterificados en forma de triglicéridos, los cuales reaccionan con un alcohol de cadena corta, comúnmente metanol,

en presencia de un catalizador homogéneo (hidróxido de sodio o potasio) o heterogéneo, dando lugar a la formación de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAMES) y glicerol como subproducto. Este proceso, conocido como transesterificación, se describe mediante una serie de reacciones consecutivas y reversibles que involucran la conversión de triglicéridos a diglicéridos, monoglicéridos y finalmente a FAMES. La cinética y termodinámica de estas reacciones dependen de múltiples factores, incluyendo la relación molar alcohol/aceite, la temperatura, el tipo y concentración del catalizador, y el tiempo de residencia. En este estudio, dichas reacciones fueron modeladas en Aspen Plus mediante la definición de reacciones estequiométricas, considerando explícitamente los principales ácidos grasos mencionados, con el fin de representar de manera precisa el comportamiento del sistema y evaluar su desempeño bajo condiciones industriales simuladas. Las ecuaciones 1-3 muestra la estequiometría del proceso.



Las condiciones de operación utilizadas en esta investigación fueron determinadas a partir de los parámetros reportados por Zhang *et al.*, (2003) quienes evaluaron el proceso de transesterificación alcalina para la producción de biodiésel a partir de aceites vegetales. En este estudio, se adoptaron las condiciones operativas del reactor, dado que es la unidad principal donde ocurre la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos. Las condiciones seleccionadas para la simulación en Aspen Plus fueron una temperatura de 60 °C, una presión de 400 kPa y una fracción de conversión del 95 %. Estos valores fueron implementados en el bloque de reacción bajo un esquema estequiométrico, con el objetivo de replicar condiciones industriales representativas. Los rangos de operación de las corrientes asociadas al reactor se presentan en la Tabla 2, lo que permitió validar la coherencia del modelo con respecto a los parámetros de diseño y operación establecidos.

Tabla 2. Rangos de operación de las corrientes 102, 105B y 106 que ingresan al reactor.

Corrientes de entrada	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Flujo de masa	Componentes (kg/h)
102	29.35	4	159.319	Agua – 9.65 Metanol – 148.66 Hidróxido de sodio – 1
105B	60.57	4	1105.26	Ácido palmítico – 142.74 Ácido linoleico – 468.35 Ácido oleico – 494.18
Corrientes de salida	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Flujo de masa	Componentes
106	60	4	1264.58	Ácido palmítico – 7.14 Ácido linoleico – 23.42 Ácido oleico – 24.71 Agua – 9.65 Metanol – 127.74 Glicerol – 33.94 Hidróxido sodio – 1 Metil palmítico – 439.70 Metil linoleico – 463.79 Metil oleico – 133.49

Con el fin de asegurar la viabilidad técnica de la reacción de transesterificación y minimizar la ocurrencia de reacciones secundarias, como la saponificación derivada de la presencia de ácidos grasos libres o humedad, se asumió en la

simulación que la materia prima fue sometida a un pretratamiento adecuado. Este pretratamiento incluye etapas de desgomado, neutralización y secado, las cuales permiten reducir la acidez y eliminar compuestos que podrían interferir con la actividad catalítica. La configuración del modelo de la simulación (SC) fue validada mediante una comparación con el caso base (SA) reportado por Zhang *et al.* (2003), lo que permitió ajustar los parámetros operativos y confirmar la viabilidad del diseño simulado con respecto a condiciones industriales previamente estudiadas. Posteriormente, se desarrolló el diagrama de flujo del proceso completo, el cual se presenta en la Figura 2, como representación esquemática de las operaciones unitarias involucradas en la producción de biodiésel a partir de piñón.

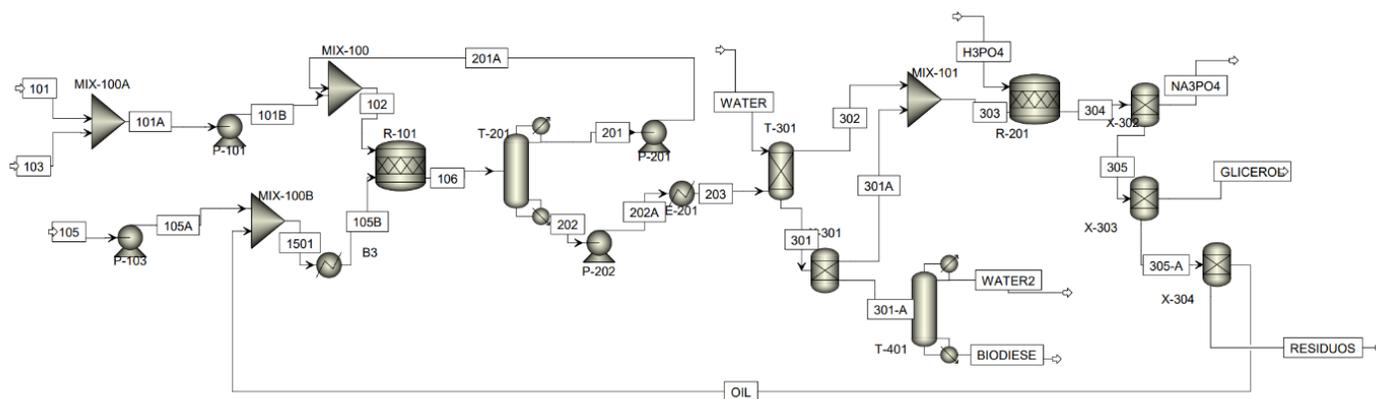


Figura 2. Diagrama del proceso de producción de biodiésel a partir de piñón.

La selección del modelo termodinámico constituye un elemento crítico en la simulación rigurosa de procesos multifásicos no ideales, como la producción de biodiésel. En este estudio, se evaluaron y aplicaron los modelos NRTL (Non-Random Two-Liquid) y UNIQUAC (UNIversal QUAsiChemical) dentro del entorno de simulación Aspen Plus, con base en su capacidad para representar con precisión el equilibrio de fases en sistemas líquidos multicomponente. El modelo NRTL fue seleccionado para las etapas de separación líquido-líquido, particularmente en la decantación de glicerol y ésteres metílicos, debido a su formulación basada en parámetros de interacción binaria no aleatoria, que permite capturar desviaciones significativas del comportamiento ideal en mezclas polares. Por su parte, el modelo UNIQUAC fue considerado para la etapa de reacción, dada su robustez en la predicción del comportamiento termodinámico en sistemas con diferencias estructurales y volumétricas entre especies, al incorporar términos combinatorios y residuales que representan tanto la entropía configuracional como las interacciones energéticas. La elección de ambos modelos se fundamentó en criterios de convergencia numérica, estabilidad del sistema y validación frente a datos experimentales reportados en la literatura, particularmente en el estudio de Baek *et al.* (2024), donde se demuestra su aplicabilidad en procesos de transesterificación catalítica. La implementación de estos modelos permitió una representación termodinámica más realista del sistema, mejorando la precisión en la predicción de composiciones de equilibrio y propiedades de transporte en cada etapa del proceso.

Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la simulación muestran una mejora significativa en la eficiencia del proceso de producción de biodiésel al comparar el caso base (SA) con el caso de investigación propuesto (SC), como se detalla en la Tabla 3. Esta mejora se atribuye a una serie de modificaciones implementadas durante el desarrollo del modelo, entre las que destacan: la redefinición de la estequiometría de la reacción, la incorporación de un sistema de recirculación de ácidos grasos no convertidos y la sustitución de una única torre de destilación por un tren de torres de separación. Estas modificaciones permitieron optimizar el consumo de

Tabla 3. Comparación entre el caso base y la simulación realizada.

Parámetros	SA	SC
Metanol	117.2 kg/h	60 kg/h
Ácidos grasos	1050 kg/h	1050 kg/h
Biodiesel	1002.04 kg/h	1036.97 kg/h
Recirculación de metanol	81.26 kg/h	88.66 kg/h

metanol, reduciéndolo de 117.2 kg/h en el caso base a 60 kg/h en el caso optimizado, lo que representa una disminución del 48.81 % en el consumo de este reactivo, sin comprometer la alimentación de ácidos grasos (1050 kg/h en ambos casos). Como resultado, la producción de biodiésel se incrementó de 1002.04 kg/h a 1036.97 kg/h, lo que representa un aumento del 3.49 % en la producción. Asimismo, se observó un aumento en la eficiencia del sistema de recuperación de metanol, con una recirculación de 88.66 kg/h en el caso SC frente a 81.26 kg/h en el caso SA. Estos resultados evidencian la viabilidad técnica de las modificaciones propuestas y su impacto positivo en el rendimiento global del proceso.

Las modificaciones implementadas en el proceso no solo mejoraron el rendimiento técnico, sino que también generaron un impacto positivo en las proyecciones de producción anual, alcanzando un volumen estimado de 9,174,232.62 litros de biodiésel, lo que representa un incremento del 3.48 % respecto al caso base. Esta mejora se atribuye a la optimización de la estequiometría, la incorporación de un sistema de recirculación de ácidos grasos y la sustitución de una torre de destilación por un tren de torres de separación. No obstante, el análisis económico del caso de simulación (SC), resumido en la Tabla 4, revela que, a pesar del aumento en la eficiencia operativa y la reducción en el consumo de materias primas, la viabilidad económica del proceso continúa siendo limitada. Aunque se obtuvo una utilidad operativa positiva de \$1,399,417.50 MXN anuales, la tasa de retorno estimada se sitúa en 20 años, lo cual está por debajo del umbral objetivo del 20 % de retorno sobre la inversión. Esto indica que, si bien el proceso es técnicamente factible y marginalmente rentable, opera con un margen económico reducido, lo que representa un desafío para su implementación a escala industrial sin incentivos adicionales o mejoras en la estructura de costos.

Tabla 4. Análisis económico de la simulación SC

Costos	(Pesos/Años)
Costo de capital total	81,039,035.00
Operación del costo	247,573,950.00
Costo del material	192,511,020.00
Ventas del producto	257,499,400.00
Utilidades	1,399,417.50
Costo del equipo	7,158,450.00
Costo de instalación	37,652,550.00
Retorno	20 años

Conclusiones

La simulación del proceso de producción de biodiésel a partir de piñón permitió evaluar el impacto de diversas modificaciones operativas sobre el rendimiento técnico y económico del sistema. La implementación de mejoras como la redefinición de la estequiometría de reacción, la recirculación de ácidos grasos no convertidos y la sustitución de una torre de destilación por un tren de torres de separación resultó en una reducción significativa del consumo de metanol (48.81 %) y un incremento en la producción de biodiésel del 3.49 %. Estas mejoras se tradujeron en una producción anual estimada de 9,174,232.62 litros, lo que evidencia la viabilidad técnica del modelo propuesto. Sin embargo, el análisis económico reveló que, a pesar de obtener una utilidad operativa positiva, la tasa de retorno del capital invertido se mantiene en 20 años, por debajo del umbral deseado para proyectos industriales de este tipo. Por tanto, aunque el proceso es técnicamente factible y marginalmente rentable, su implementación a escala industrial requeriría optimizaciones adicionales en la estructura de costos o el apoyo de incentivos económicos para mejorar su competitividad.

Bibliografía

- Baek, S. H., Seo, W. W., Kim, T. H., & Kang, J. W. (2024). Binary Isobaric Vapor–Liquid Equilibrium for Methyl Benzoate with Benzyl Alcohol and Benzaldehyde. *Revista International Journal of Thermophysics*, 45(10), 1-12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10765-024-03441-0>
- Góngora, C. C., Martínez, S. G., Vázquez, A., López, G. (2018). El cultivo de *Jatropha curcas* L. en el Sureste de México. https://www.researchgate.net/publication/328381285_El_cultivo_de_Jatropha_curcas_Len_el_Sureste_de_Mexico
- Lombana Coy, J. & Vega Jurado, J. (2016). *Análisis del sector biodiesel en Colombia y su cadena de suministro*. Universidad del Norte. <https://elibro.net/es/lc/biblioteca/titulos/69975>
- Nuttaya. (2018). *Jatropha is a plant that provides seed oil and is currently extracted*. iStock. <https://www.istockphoto.com/es/foto/jatropha-curcas-gm914078536-251600490>
- Okullo A., Tibasiima N., (2017). Process simulation of biodiesel production from *Jatropha Curcas* seed oil. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(4), 56-63. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170504.12>

- OECD. (2023). *Hacia la Resiliencia y Neutralidad Climática en América Latina y el Caribe Prioridades políticas clave: Prioridades políticas clave*. OECD Publishing. https://books.google.com.mx/books?id=89_eEAAAQBAJ&newbks=1&newbks_redir=0&dq=biocombustibles&hl=es&source=gbns_navlinks_s
- Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. D. R., & Gallardo-Rivas, N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-888X2022000100311&script=sci_arttext
- SAGARPA. (2017). *BIOENERGETICOS HIGUERILLA, JATROPHA CURCAS, SORGO DULCE MEXICANOS*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257070/Potencial-Bioenerg_ticos.pdf
- Serouti A., Korichi M, Mya O. B. (2021) Characterization and fatty acid profile analysis of jatrofa curcas L. oil cultivated in the Algerian desert. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2023), 12205-12212. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02013-8>
- Soto, I., Mathijs, E., Solano, D., & Muys, B. Capítulo 4: El cultivo de *Jatropha curcas* para la producción de bioenergía en comunidades rurales de México y Mali. *Investigación agraria para un desarrollo sostenible: análisis*, 93.
- Xu, H., Ou, L., Li, Y., Hawkins, T. R., & Wang, M. (2022). Life cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel production in the United States. *Environmental Science & Technology*, 56(12), 7512-7521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00289>