

# Diseño de una planta de producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*

*Design of a biodiesel production plant from *Jatropha curcas* oil*

**José Ángel Sarmiento Martínez**

Universidad Rafael Urdaneta, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.

Email: [smjoseangel@hotmail.com](mailto:smjoseangel@hotmail.com)

**Luis Eduardo Vega Urdaneta**

Universidad Rafael Urdaneta, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.

Email: [lvegacle@gmail.com](mailto:lvegacle@gmail.com)

**Charles Albert Gutiérrez Mendoza**

Universidad Rafael Urdaneta, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo, Venezuela.

Email: [Charles.agm@gmail.com](mailto:Charles.agm@gmail.com)

Recibido: 14-06-2021

Aceptado: 13-09-2021

## Resumen

Durante la última década, el método de producción de biodiésel mediante aceites vegetales ha sido estudiado y propuesto como alternativas para la sustitución de combustibles fósiles, un aspecto importante para desistir de la dependencia de los mismos. El objetivo principal de la investigación es diseñar una planta de producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*, con el propósito que las propiedades del combustible sean similares a los datos reportados según las normas internacionales. Se usó el programa Aspen plus V8.8 para la simulación del proceso de producción de biodiésel bajo condiciones estándar, previamente se hizo una investigación bibliográfica de las propiedades que afectan su proceso. La reacción se llevó a cabo en un proceso continuo de dos etapas, donde la relación molar metanol: triglicéridos utilizada fue 9:1, empleando catalizadores homogéneos. En general, el modelo simulado presenta valores muy cercanos al establecido por las especificaciones de la norma ASTM D6751.

**Palabras Clave:** Biodiesel, simulación, *Jatropha curcas*, aceite vegetal, triglicéridos

## Abstract

*During the last decade, the biodiesel production method using vegetable oils was subject of multiples investigation, propose as an alternative for the substitution of fossil fuels. The objective of the study was to realize a design a biodiesel production plant from *Jatropha curcas* oil, with the sheer proposes of biodiesel properties stay within the range of the international establish normative. The tool used to simulate the production process of biodiesel under standard conditions, was Aspen plus software, in order to run the simulation, it was necessary the necessary an investigation of the properties who had a pivotal role during the process. The reaction reactor was under the specification of a molar relation was 9:1 methanol: triglycerides, with the presences of homogeneous catalysts. In conclusion the simulated process shows have great affinity with the specifications of the ASTM D6751 standard.*

**Keywords:** Biodiesel, simulation, *Jatropha curcas*, vegetable oil, triglycerides

## Introducción

La producción y explotación de biocombustibles como una alternativa energética para la sustitución paulatina y el alargamiento del tiempo de vida de los combustibles fósiles tradicionales, es, hoy, un tema de primer orden en el desarrollo tecnológico, Rodríguez [1]. Así mismo, la creciente preocupación acerca del impacto ambiental, especialmente en cuanto a lo relacionado con las consideraciones relacionadas con el

asunto de salud y seguridad, han impulsado la búsqueda de nuevas fuentes de energía, así como de maneras alternativas de energizar los vehículos de motor, Dincer [2] De la misma forma, las emisiones al carbón producen tan elevadas emisiones que los combustibles alternativos son más atractivos para las empresas. Franco [3].

El biodiésel está definido por la ASTM como un combustible formado por ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de aceites vegetales o grasas animales (ASTM, [4]. El método más extendido para producirlo es la transesterificación, que consiste en hacer reaccionar los triglicéridos de las grasas y aceites naturales con un alcohol para producir ésteres. Chen *et al.* [5] En algunos casos es necesario de un proceso previo para llevar el aceite vegetal a las condiciones óptimas de la etapa de transesterificación, este proceso es llamado esterificación.

En los últimos años, muchos estudios han investigado el impacto económico y ambiental de los combustibles, especialmente del bioetanol, biogás y biocombustible. Para Om et al [6] el uso de aceites combustibles como combustible no es muy habitual, debido a que la industria alimenticia sería incapaz de aumentar el precio de estos aceites debido a la competencia en cuanto al uso comercial, por ello los autores Sonntag [7] e Pabón y Hernández [8] recomiendan emplear especies de aceites vegetales no comestibles por dos características muy importantes: sus bajos costos de producción y capacidad de producción a gran escala, además autores como García *et al.* [9], recomiendan su implementación porque el biodiésel puede reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub> en base a estos. La especie seleccionada es la *Jatropha curcas*, nativa de América Central, reconocida por ser un excelente cultivo debido a que su adaptabilidad, potencial considerable y prosperidad en zonas áridas de baja fertilidad

La viabilidad técnica, económica y medioambiental de diferentes procesos de producción de biodiésel, ha sido evaluada por diferentes investigadores a través de la simulación de los procesos de producción a escala industrial. Asimismo, varios autores emplean esta herramienta para el empleo de diseños de una planta de producción de biodiésel, empleando un aceite de bajo peso económico como el de la *Jatropha curcas*, para satisfacer los parámetros de calidad dictados por la ASTM, en función de un proceso lo suficientemente económico para ser implementado en países con escasa materia prima, Sarmiento y Vega [10].

Este artículo científico deriva del Trabajo Especial de Grado, titulado diseño de una planta de producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*, presentado por los autores Sarmiento y Vega [10], dicha investigación consta de presentar mediante el proceso de simulación, la viabilidad del aceite proveniente de *Jatropha curcas* como materia prima para la producción de un biocombustible avalado por las normativas internacionales, para así obtener un producto de calidad suficiente para ser puesto en el mercado, se caracteriza por usar un proceso de dos etapas, transesterificación y esterificación, con la finalidad de que el producto sea económica y técnicamente factible.

De igual manera, como objetivos precedentes a la simulación, se encuentra el estudio de las propiedades fisicoquímicas de los componentes que intervienen durante el proceso de producción, esta información es necesaria para el conocimiento esencial del estudio en cuestión. La comparación de diferentes esquemas de producción mediante criterios técnicos y económicos para observar la fiabilidad del proceso diseñado, seleccionar y proponer el esquema que mejor se adapte a las condiciones de un biodiésel acorde a las normativas estandarizadas. Tomando en cuenta la metodología de la investigación, la ejecución del modelo simulado de producción hace factible profundizar aprendizaje en relación con las áreas de técnicas de simulación e ingeniería de las reacciones, así mismo, la simulación instaura una serie de parámetros que servirán como apoyo para futuras investigaciones que se interesen por la producción de combustible alternativo.

## Métodos y Materiales

En esta investigación se empleó el aceite de *Jatropha curcas* y el biodiésel como unidades de análisis, ya que fue requerido observar el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas de los sujetos ante variables de operación, para obtener así la información necesaria para su aceptación en la producción de este combustible. Se hace uso de un simulador comercial Aspen Plus para detallar de manera más precisa las

propiedades del biodiésel como una fuente de combustible ambientalmente aceptable. Con el propósito de cumplir los objetivos planteados, se organizaron en fases los procedimientos a realizar de acuerdo a un orden sistemático, favoreciendo el curso de la investigación. A continuación, se describen las mismas:

### **Fase I. Determinación de las propiedades físicas y químicas que caracterizan los componentes de la producción de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas***

Para dar inicio a un cálculo referente al modelo simulado, fue necesario conocer las propiedades de la mezcla que permitan en sí misma resaltar las diferentes características de los biocombustibles sintetizados. Aquellas propiedades que depende del proceso de producción, serán parámetros que permitirán optimizar cada etapa del mismo; para esto, se tomó como base el antecedente teórico y la bibliografía consultada. A través de una búsqueda exhaustiva de los diferentes tipos de biodiésel, se analizaron los casos y se consiguió un patrón, indicador que permitió observar las propiedades que serán tomadas en cuenta para la aplicación de la simulación.

### **Fase II. Comparación de esquemas de procesamiento para la obtención de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* mediante criterios técnicos y económicos.**

Una vez finiquitado la determinación de los parámetros fisicoquímicos del biodiésel y del aceite, en función de dichas propiedades, se procedió a realizar una revisión de documentos como libros de procesos y artículos científicos para seleccionar, con base en ellos, un método de producción de biodiésel óptimo, esto debido a las múltiples conjugaciones que pueden presentar los equipos en función de las características del aceite.

Se estudió la posibilidad de la operación recopilando información de autores que evaluaron el potencial del aceite de *Jatropha curcas* como materia prima para la producción de biodiésel y las complicaciones que este trae, considerando factores tales como facilidad de obtención, cantidad de residuos de desecho durante la producción, cantidad de materia prima aparte necesaria para el proceso y sus características más relevantes.

Por otro lado, desde el punto de vista económico se evaluó la viabilidad de los esquemas en función del costo de la materia prima, preparación y transporte; el capital necesario para la manufacturación del esquema seleccionado para la producción de biodiésel, y por último otros costos tales como mano de obra, servicios públicos, mantenimiento y seguros.

### **Fase III. Selección de un esquema de producción para biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* empleando programas comerciales de simulación.**

Tras realizar la comparación de los diferentes esquemas de procesamiento y su posterior elección con base en las características y similitud con el caso de estudio, se procede a hacer uso de un programa de simulación comercial, Aspen Plus V8.8 ingresando la data y el esquema de diseño pertinente con el fin de visualizar y evaluar el comportamiento del proceso, para así, definir la viabilidad como posible propuesta que cumpla normativas internacionales.

Inicialmente, se introdujo en el simulador los componentes que forman parte del proceso de producción de biodiésel, y a su vez se seleccionó un modelo termodinámico acorde a la naturaleza de la mezcla de componentes presentes en el proceso. Tras la selección del esquema de producción para biodiésel, se identificó los equipos presentes y se especificaron las variables pertinentes para los cálculos que efectúa el simulador, partiendo de la presión y temperatura de operación de los equipos respectivos, así como las especificaciones de las propiedades de las corrientes de alimentación, haciendo consideración de todas las especificaciones para la producción eficiente de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*.

Tras detallar todo lo necesario en el simulador, se procedió a correr la simulación para obtener los datos (mediante el uso de tablas que proporciona la simulación) de las corrientes que llevan consigo el producto de biodiésel, para así poder comparar de forma apropiada la similitud de dicho producto con la data experimental

obtenida de autores previos, y así concluir de forma certera el potencial del aceite de *Jatropha curcas* como materia prima para la producción de biodiésel.

#### **Fase IV. Propuesta de una planta para la producción de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* que cumpla con normativas internacionales.**

En esta fase se procedió a utilizar el simulador para realizar un diseño de una planta de producción de biodiésel, en función de todos los datos recogidos en las diferentes fases anteriores. En el diagrama de flujo (flowsheet) se representó el sistema a analizar, incluyendo las corrientes identificadas, los modelos termodinámicos y los modelos de los equipos presentes, asimismo las características propias como las composiciones de corriente, temperatura, presión y demás especificaciones propias de los equipos. En este punto, los resultados arrojados fueron expuestos en tablas, facilitando su análisis y comparación con las normativas internacionales EN 14214 y ASTM D6751. [4].

Una vez, definido todas las fases de la investigación, es necesario plantear de manera concisa los resultados de las fases presentadas con anterioridad, es por ello que a continuación se presentara de manera ordenada todos los resultados acordes con las fases presentadas, en forma que sea expresado de manera entendible.

#### ***Determinación de las propiedades físicas y químicas que caracterizan los componentes de la producción de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas****

Para dar inicio a un diseño de una planta de producción de biodiésel es necesario conocer las propiedades fisicoquímicas de las variables operacionales como lo son agua, alcohol, la mezcla del aceite de *Jatropha curcas* y el biodiésel obtenido, en este orden ideas se observó el comportamiento e influencia de las propiedades durante el proceso de transesterificación.

#### ***Aceite de *Jatropha curcas****

Se procedió a realizar una investigación exhaustiva a partir de la información proporcionada por diferentes autores para obtener los valores de parámetros como viscosidad, densidad, humedad, índice de yodo, porcentaje de ácido grasos libres, en los principales ácidos grasos que constituyen el aceite de *Jatropha curcas*, siendo el ácido esteárico, palmítico, linoleico y oleico. A continuación, se presenta la Tabla 1, donde se definen las propiedades fisicoquímicas del aceite de *Jatropha*. Mediante la tabulación de algunas de estas propiedades según autores, se puede analizar los valores de operación de estas variables.

**Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del aceite de *Jatropha curcas***

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
% de ácidos grasos libres como ácido oleico	2.23±0.02
Valor de saponificación	193.55±0.61
Porcentaje de contenido de aceite (kernel)	63.16±0.35
Densidad a 20°C (g/ml)	0.90317
Valor de peróxido	1.93±0.012
Valor de yodo	103.62±0.07
Viscosidad a temperatura ambiente	42.88
Estado físico a temperatura ambiente	Líquido

Nota: Akbar[22]

En la Tabla 1 se observó los parámetros fisicoquímicos del aceite de *Jatropha curcas* que causan gran impacto durante el proceso de sintetizar el biocombustible, estas propiedades son tan sensibles que son causantes de varios problemas durante la etapa de transesterificación, en primera instancia el valor de acidez que maneja el aceite, es un indicativo de los ácidos grasos libres. El aceite de *Jatropha curcas* maneja un bajo porcentaje de ellos, que, en conjunto con la presencia de elevados niveles de humedad, favorecerían la

precipitación de jabones en el reactor, reduciendo las etapas de purificación, rendimiento general del proceso, y consumo parcial del catalizador.

La primera de estas propiedades influyentes, la densidad del aceite de *Jatropha*, se encuentra en un valor que favorece los procesos de separación al encontrarse en menor valor que los del agua, pero uno de los inconvenientes que se presentan al trabajar con este aceite es que, al presentar una densidad elevada, ocurre problemas al implementar el biodiésel en motores ya sea por un retraso en la combustión o bajo rendimiento del mismo. La viscosidad es otra propiedad sensible que afectan de manera determinante el producto final, un bajo valor de esta propiedad tiene una influencia importante durante el proceso de combustión y atomización del combustible durante la inyección en el motor de diésel, ya que ocasiona la formación de depósitos en el motor Maucher [11].

### **Metanol**

El proceso de síntesis de biodiésel mediante la transesterificación necesita de la presencia de un alcohol de bajo peso molecular, para que al momento de reaccionar con triglicéridos sinteticen ésteres, normalmente el alcohol se usa en exceso para aumentar la eficiencia de la reacción, al desplazar el equilibrio de la reacción a los productos. Para que esta reacción sea completa, el autor García *et al.* [12]. Se recomienda el uso del metanol, ya que como se puede evidenciar en la investigación de Sarmiento y Vega [10], este alcohol no solo es el más económico y de bajo peso molecular, sino además cumple con la facilidad de recuperación, una virtud que es requerida para mantener este proceso económicamente viable.

Según lo establecido por Castillo [13] el metanol presenta tres ventajas con respecto a otros alcoholes para su implementación en procesos de transesterificación, primero al de ser el más corto de los alcoholes, genera una reacción rápida con los triglicéridos, segundo la presencia del grupo hidroxilo facilita la disolución de catalizadores alcalinos como el KOH y finalmente al no presentar azeotropo puede utilizarse en altos niveles de pureza, reduciendo así la formación de jabones en la corriente de biodiésel.

### **Agua**

Se comenzó a realizar una investigación exhaustiva a partir de la información proporcionada por diferentes autores para obtener los valores de parámetros como pH, densidad, punto de fusión, punto de ebullición, calor latente del agua. Para más detalles se puede consultar la investigación efectuada por Sarmiento y Vega [10] para apreciar la recopilación de las propiedades. Los parámetros más relevantes del agua durante el proceso de esterificación-transesterificación evidenciamos el pH, puntos de fusión y ebullición, ya que el primero consta de un valor neutro, idóneo para no ejecutar un tratamiento previo para introducirse en el sistema de lavado, además presenta miscibilidad con el metanol lo cual brinda facilidad al remover los remanentes de contaminantes, los puntos de fusión y ebullición son valores suficientemente bajos para no perturbar a los componentes de biodiésel, como metil-ésteres durante el proceso de purificación. Romano y Sorichetti [14]

### **Biodiésel**

El método más comúnmente empleado para la producción de biodiésel a partir de un aceite vegetal o grasa animal es la transesterificación. Sin embargo, algunas de las características físicas y químicas de un biodiésel están directamente ligadas al proceso de producción (glicerina total y libre, ésteres totales, metanol, agua, acidez, entre otras), mientras que otras están relacionadas con la materia prima de la cual se parte. Por último, se pueden distinguir algunas propiedades que dependen tanto de la calidad del proceso como del tipo de materia prima (estabilidad a la oxidación, acidez, viscosidad, entre otras). A continuación, se presentó la Tabla 2, donde se definen las propiedades fisicoquímicas del biodiésel, en esta, se resaltan las propiedades más relevantes durante la producción y uso de este.

**Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel.**

Parámetro	Valor
Agua y sedimentos (%v/v)	1E-04
Rendimiento de la reacción min (%)	99.38
Punto de inflamación (°C)	189
Densidad a 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	897
Numero de ácido (mg KOH/mg)	0.25
Estabilidad de oxidación a 110°C (h), min	6.25
Glicerina total (%m/m), máx.	0.1657
Mono glicéridos (%m/m), máx.	0.53
Diglicéridos (%m/m), máx.	0.1710
Triglicéridos (%m/m), máx.	2E-03

Nota: Rodríguez *et al.* [1]

Si la cantidad de metanol presente en el biodiésel es significativa, no conseguirá alcanzar el mínimo del punto de inflamación, esto ocurre normalmente por una purificación insuficiente del biodiésel tras la reacción de transesterificación, el contenido de metanol va ligado de la determinación del punto flash, como se observó en la Tabla 2 el biodiésel tiene un punto de inflamación de 180 °C, esta propiedad en presencia de metanol puede verse reducida, otra propiedad que es sensible a la pureza del biodiésel es la cantidad de glicerina total, en caso de presencia de este puede ocasionar depósitos durante la combustión.

### **Comparación de esquemas de procesamiento para la obtención de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* mediante criterios técnicos y económicos**

Se realizó un estudio de múltiples propuestas de producción de biodiésel, con la finalidad de alcanzar la mayor precisión al momento de realizar los análisis mediante los criterios técnicos y económicos (ya que parte de la información necesaria para hacer un análisis riguroso no es accesible).

#### ***Proceso de producción de biodiésel de una etapa usando catalizador homogéneo***

El contenido de FFA o el valor de ácido disponible en la materia prima del aceite influye en la selección del tipo de catalizador (ácido o base) utilizado en el proceso, como el caso del aceite de *Jatropha* con tendencia a sintetizar jabones y glicerina. La acidez del aceite se ve afectada, principalmente, por el manejo inadecuado de este, causando un aumento en el contenido de agua, por lo tanto, la concentración de ácidos grasos libres variará y dependerá de la calidad de la materia prima Berchmans e Hirata [15]. Por lo que, se prefiere el catalizador de base para las materias primas con un contenido de FFA inferior al 1% Demirbas [16].

Sin embargo, cuando la materia prima contiene más del 1% de FFA, se recomienda el catalizador ácido debido a su baja susceptibilidad al FFA, ya que puede catalizar simultáneamente reacciones de esterificación y transesterificación del FFA, Abbaszaadeh *et al.* [17]. No obstante, los impedimentos del catalizador ácido para su aplicación en procesos de transesterificación de un solo un paso, tal y como lo definen Koh y Ghazi [18], son un tiempo de reacción lento y un largo periodo de espera para alcanzar un alto rendimiento de biodiésel. Los agentes más comunes durante la reacción de transesterificación son los hidróxidos (KOH y NaOH), el ácido sulfúrico y un alcohol de cadena corta como metanol o etanol.

El uso de catalizadores homogéneos también conlleva muchos inconvenientes, como el efecto peligroso de bases y la necesidad de una gran cantidad de agua para las etapas de purificación, si se espera cumplir con la calidad específica del producto que lo convierte en aguas residuales. Estas aguas residuales requieren un tratamiento adecuado que aumenta el costo general del proceso.

#### ***Proceso de producción de biodiésel de dos etapas usando catalizadores homogéneos***

Este proceso por lo regular es la opción más recomendable por autores como Tyagi [19] en presencia de materia prima con una concentración mayor al 1% de FFA, ya que consta de dos etapas catalizadas, primero

una esterificación de los FFA catalizada por un ácido, y otra etapa de transesterificación catalizada por una base, con el objetivo de obtener mayor rendimiento de ésteres en un tiempo de reacción corto.

El tipo de alimentación, la selección del alcohol, la relación molar alcohol: aceite, la adición del catalizador, el tiempo de reacción y la temperatura son las variables importantes que afectan la acidez en la primera etapa y el rendimiento de biodiésel en la segunda. El aceite desodorizado crudo de *Jatropha* contiene 15% de contenido de FFA, lo cual no cae en el límite aceptable para la transesterificación catalizada por bases. Por lo tanto, un proceso de dos pasos se utiliza para este aceite. Tyagi, [19].

Berchmans y Hirata [15] determinaron que se obtiene un mayor rendimiento (90.1%) en el proceso de producción de biodiésel de dos etapas usando catalizadores homogéneos que al usar el método de producción de biodiésel de una etapa catalizado por una base (55%). Igualmente, Deng *et al.* [20] reportaron que el uso de aceite de *Jatropha* con un contenido de 10.45% de FFA reduce el rendimiento de ésteres en 47.2% en el proceso de producción de biodiésel de una etapa catalizado por una base, sin embargo, se alcanzó un rendimiento de ésteres de 96.4% en el proceso de dos etapas.

Finalmente, las diferencias son claras, durante las fases de producción de biodiésel de una sola etapa podemos definir este proceso con la distinción de emplear un catalizador básico, mientras que el de dos etapas hace uso de uno ácido, el primer proceso hace uso de la neutralización después de realizada el proceso de producción, y, el segundo lo realiza previo a las etapas de transesterificación, ya que esta reacción es catalizada por una base, de no ser así puede haber precipitaciones que disminuyan el efecto del catalizador en la reacción.

#### ***Proceso de producción de biodiésel de una etapa por catalizador heterogéneo***

Los procesos de producción de biodiésel que utilizan catalizadores heterogéneos son una alternativa amigable con el ambiente, ya que permiten una separación y purificación más sencilla del producto, generando una reducción en la generación de desechos. Por otro lado, tienen la cualidad de ser reusables y regenerables, haciendo la producción de biodiésel más económica. Estos catalizadores pueden ser preparados por lavado, secado o calcinación bajo altas condiciones de temperatura, Tyagi, [19]. Sin embargo, al usar catalizadores heterogéneos, las condiciones de la reacción siguen teniendo gran influencia en el rendimiento de ésteres, ya que, por lo regular, este proceso requiere una relación metanol: aceite mayor y temperatura con un tiempo de reacción mucho mayor para obtener rendimiento de ésteres comparables a la de una reacción con catalizador homogéneo, Tyagi [19].

#### ***Proceso de producción de biodiésel a condiciones supercríticas***

El proceso de transesterificación supercrítico es considerablemente bueno en la obtención de ésteres usando alcoholes sin la intervención de ningún catalizador. Para que sea efectivo, en este método, la temperatura y presión de operación está arriba del punto crítico del alcohol a emplear. En este punto, la constante dieléctrica se reduce y crea una sola fase en lugar de dos fases de alcohol-aceite, como se reporta en los procesos de transesterificación convencionales. Como se encuentra en una sola fase, la reacción se ve favorecida, ya que no existe la limitación del fenómeno de transferencia de masa en estas condiciones, Tyagi, [19]. Las principales ventajas se encuentran: menor tiempo de reacción, no formación de jabón, no generación de residuos y fácil recuperación de la glicerina debido a la ausencia de catalizador. Las desventajas más relevantes son: altos costos de operación, necesidad de una gran cantidad de alcohol y la posible degradación de los ésteres producidos debidos a las condiciones de operación tan altas. Joon Ching *et al.* [21].

#### ***Comparación***

Sobre la base de los métodos de producción aportados por los autores, se determinó que el esquema de producción óptimo para la producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas* es el proceso de producción de biodiésel de dos etapas usando catalizadores homogéneos, principalmente por la facilidad

de operación de este y por las recomendaciones aportadas por estudios mencionados con anterioridad. Aun cuando los costos son mayores que el proceso de una etapa, los rendimientos alcanzados son mayores, ya que dada las propiedades del aceite de *Jatropha*, el uso exclusivo de un catalizador básico conlleva a problemas de operación debido a la formación de jabón.

Al comparar el proceso de producción de biodiésel de dos etapas utilizando catalizadores homogéneos con el proceso de producción de biodiésel de una etapa usando catalizador heterogéneo es fácil argumentar que el segundo es más económico, sin embargo, este proceso requiere una mayor proporción inicial de metanol:aceite (el costo de las materias primas es la contribución más importante al costo unitario de producción), carga del catalizador y temperatura de reacción con un tiempo de reacción mucho más largo para obtener rendimientos de éster comparables a una reacción catalizada homogéneamente. Por lo tanto, no es una opción viable basándonos en criterios técnicos/económicos. El proceso de producción de biodiésel a condiciones críticas no es económicamente viable a pesar de los rendimientos de ésteres alcanzados, por lo que, es una opción fácilmente descartable basándonos en criterios económicos.

### **Fase III. Selección de un esquema de producción para biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* empleando programas comerciales de simulación.**

Tras la comparación de los diferentes esquemas de producción de biodiésel, se seleccionó el esquema de producción de biodiésel de dos etapas con uso de catalizadores homogéneos, esto con base en todas las características del aceite a trabajar y a lo económicamente factible que es en comparación a los procesos de producción de biodiésel a condiciones supercríticas. Para la simulación, se utilizó el programa Aspen Plus V8.8.

#### ***Especificación de componentes y propiedades***

Inicialmente, se especificó los componentes que formarían parte del proceso de producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*. La determinación de los componentes del aceite de *Jatropha* se logró a partir de investigaciones previas, Akbar *et al.* [22], sin embargo, se presentan muchas limitantes a lo que especificación de triglicéridos respecta. Se visualizó los componentes especificados en la interfaz de la simulación en la investigación realizada por Sarmiento y Vega [10].

Si bien se tiene la composición de triglicéridos del aceite es imposible detallar cada componente en el simulador, por la diferente geometría y variación de ácidos grasos que presentan los triglicéridos del aceite. Por lo tanto, a partir de la concentración de ácidos grasos, se especificó los triglicéridos de los ácidos grasos que se encuentran en mayor proporción, sin considerar las moléculas de diglicéridos/monoglicéridos. Se seleccionó el triglicérido del ácido oleico (trioleína), el triglicérido del ácido palmítico (tripalmitina), el triglicérido del ácido linoleico (trinoleína) y el triglicérido del ácido esteárico (triestearina), que son los ácidos grasos que se hallan en mayor proporción, y como componente que representa la concentración de ácidos grasos libres según Akbar *et al.* [22], se tomó el ácido oleico.

Se especificaron otros componentes tales como la glicerina, los metilésteres de los ácidos grasos respectivos (metil palmitato, metil estearato, metil oleato y metil linoleato), el agua (que es producto de la reacción de esterificación, y se usa para al lavado del biodiésel), el (catalizador), el (catalizador), y demás componentes que forman parte de la neutralización de catalizadores. El modelo matemático seleccionado fue el NRTL (No Random Two Liquids), basándose en las recomendaciones de autores, debido a la presencia de componentes altamente polares, con el fin de predecir los coeficientes de actividad de los componentes en una fase líquida, Zhang [23].

Algunos coeficientes de los parámetros de interacción no disponibles, como los de metanol/metil-oleato, glicerol/metil-oleato y ácido sulfúrico con cualquier otro componente, se estimaron utilizando el UNIQUAC. Por otro lado, para la simulación del proceso de decantación se seleccionó el método Peng-Robinson, debido a su particular precisión para cálculos de densidad líquida, Peng y Robinson, [24].



horizontal por gravedad que tiene como objetivo separar dos fases, una polar (compuesta mayormente por glicerina y metanol) y otra no polar (compuesta mayormente por los metilésteres y un porcentaje de metanol). Dicha corriente de glicerina y metanol puede separarse con el fin de obtener glicerina y metanol (no se hace esta consideración en el proceso).

A partir de este punto se llega a las fases de purificación del biodiésel para que este alcance los parámetros especificados en la norma. Inicialmente, se realiza una separación flash en el separador V-101 con el fin de separar el biodiésel del metanol remanente (y recircularlo al reactor R-102 de transesterificación), de dicho separador se obtiene biodiésel con baja concentración de metanol a una temperatura bastante alta, por lo que se enfrió en un intercambiador de calor (a 25 °C) antes de ser llevada a la columna de lavado (T-101) (que se simuló como una columna de extracción líquido-líquido), en esta se eliminan todas las impurezas asociadas al proceso, tales como catalizadores, metanol remanente de la reacción y emulsiones de jabón. Finalmente, tras obtener el biodiésel lavado, se llevó a un separador flash con el fin de purificar el biodiésel y separar los componentes volátiles como el agua y el metanol del producto final. La corriente de producto final es la corriente Diésel.

Paralelamente a la producción del biodiésel ocurre un proceso de recuperación de metanol con la finalidad de aumentar la eficiencia del proceso, esta recuperación de metanol ocurre posterior a las reacciones de esterificación y transesterificación, en la columna de destilación T-102 y en el separador flash V-102. Es importante determinar las especificaciones de operación óptimas con el fin de garantizar la mayor recuperación de metanol posible, para que parte de este pueda ser usado nuevamente en los reactores. Se sugiere tiempos de retención de 1 a 3 minutos en los separadores S-101, S-102, S-103 y S-104 basados en las recomendaciones de Requena y Rodríguez [27], que sugieren ese rango de tiempos de retención para fluidos con un rango 25-40 °API para separadores horizontales con principio de separación por gravedad.

Las especificaciones de operación óptima se determinaron mediante el análisis de sensibilidad de los equipos más relevantes como las columnas T-102 y T-101 y los separadores tipo Flash V-101 y V-102, las columnas fueron utilizadas para recuperación de metanol y purificación del biodiésel respectivamente, mientras que los separadores se emplean para asegurar que dichos procesos tengan la mayor efectividad posible. El comportamiento de dichas gráficas se puede observar en la investigación realizada por Sarmiento y Vega [10].

#### **Fase IV. Proponer una planta para producir biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* que cumpla normativas internacionales.**

Una vez determinada la simulación, se procede a recoger los datos de la corriente de biodiésel, es importante destacar que la corriente de biodiésel simulada será caracterizada de acuerdo a lo estipulado por las normas EN14214 y la ASTM D6751 [4], con la finalidad de validar la calidad del biodiésel debido a su gran variedad de componentes significativos. Los valores de tabla ASTM D6751[4] y EN14214 se presentan en detalle en la investigación elaborada por los autores Sarmiento y Vega [10]

En las normativas que regulan los parámetros fisicoquímicos del biodiésel se puede concluir que cualquier biocombustible deberá respetar las normativas para su posterior aplicación en el mercado, de las propiedades más considerables se encuentran el contenido del metanol presente en las corrientes, ya que estos son los componentes que le dan sus características al biodiésel, la cantidad de glicerina libre presente en la corriente, se expresa en la cantidad de glicerol disuelto en la misma, junto a las viscosidades cinemática y densidad, todas las propiedades mencionadas detallan la eficacia del proceso de purificación. A continuación, se procede a exhibir la Tabla 3 donde se evidenció las propiedades fisicoquímicas de la corriente de biodiésel producida determinadas por el simulador, para luego, hacer la comparativa con respecto a las normativas internacionales ASTM D6751[4] y EN 14214.

**Tabla 3. Especificaciones de propiedades fisicoquímicas del biodiésel B100 según la ASTM**

Propiedades	Unidades	Resultados	Estándar	Cumple con la normativa
Densidad a 20 °C	Kg/m <sup>3</sup>	845.64	860-900	No
Glicerina libre	%masa	3.33E-9	0.02	Si
Glicerina total	%masa	4,60E+00	0.24	Si
Número de cetanos	Cetanos	55.88	47	Si
Punto de inflamación	°C	135.00	130	Si
Rendimiento	L biodiesel/ L aceite	98.3	95	Si
Contenido de metanol	%masa	128.22E-9	0.2	Si
Contenido de éster		98.98	96.5	Si

Nota: Sarmiento y Vega [10]

En la Tabla 3 se presentó los resultados de las propiedades más influyentes presentadas en las normas ASTM D6751 [4] y EN 14214 en la corriente resultante de biodiésel, es importante aclarar que, aunque no están todas las propiedades presentes en la corriente por la limitación del simulador, a primeras instancias se puede observar un valor de 55.88 referentes al número de cetanos, el autor Knothe [28] nos define esta propiedad como un parámetro importante para observar la calidad de ignición de un combustible al momento de inyectarlo a la cámara de combustión de un motor de diésel, un valor de 55.88 superiores al mínimo establecido por la normativa, se traduce en una mejor calidad de ignición y menos tiempo de retardo de la ignición y viceversa.

Otras de las propiedades que tiene una desviación importante es la densidad del producto, un parámetro significativo, debido a que los sistemas de inyección utilizan un sistema de medición volumétrico, por ende, un valor elevado se traduce en un incremento de la masa de combustible suministrada al motor. Al observar el valor de 845.64 kg/m<sup>3</sup> podemos determinar que se presenta un valor por debajo de las normativas internacionales, estas desviaciones pueden deberse a que los valores reportados en la literatura fueron obtenidos para reacciones con rendimientos alrededor del 90% por lo que el porcentaje de triglicéridos no convertidos era menor y en consecuencia su densidad también. Sin embargo, el autor Franco *et al.* [3] indica que aun cuando el porcentaje de conversión fuese menor, la densidad calculada debería encontrarse por debajo de la densidad del agua (1000 kg /m<sup>3</sup>).

Las propiedades de glicerina libre y glicerina total, están relacionadas con la cantidad de triglicéridos no reaccionados y la eficacia del proceso de purificación de biodiésel respectivamente. El contenido de glicerina total es la suma del glicerol libre y el enlazado, el cual corresponde a los mono-, di- y triglicéridos presentes en el combustible expresado como glicerina, mientras que la glicerina libre se refiere solamente a la cantidad de glicerol presente en el producto final. En la Tabla 3 se evidenció que las propiedades presentan valores inferiores de lo máximo permitido, indicando así una efectividad de las etapas de purificación de biodiésel.

El punto de inflamación del biodiésel obtenido fue de 135 °C, valor que cumple lo establecido en normas ASTM D6751 [4] de mínimo 130 °C y por la norma EN 14214 de 120 °C. El objetivo de este parámetro es observar la efectividad del proceso de purificado para el biodiésel producido, otras propiedades que definen el proceso de purificado de biodiésel tal y como lo define Moser [29] el contenido de ésteres y metanol, el primero presenta un valor de 98.98 % ratifica condiciones de operación adecuadas y no la presencia de contaminantes, el contenido de metanol bajo nos brinda una confirmación en que los procesos de evaporación y lavados con agua fueron realizados con éxito.

Para finalizar se determinó el rendimiento del proceso de producción de biodiésel, el flujo de combustible producido a partir del aceite de *Jatropha*, el cual fue de 98.3%, como se observó en la Tabla 3, varios autores como Martínez [30] y Ali y Rind [31] indican que el aceite de *Jatropha curcas* presenta un rendimiento superior al 90% este valor no solo muestra una elevada efectividad durante el proceso de purificación, sino que representa una gran oportunidad para ser empleado en la industria automotriz.

## Conclusiones

Se lograron identificar cada uno de los parámetros fisicoquímicos de las variables operacionales, y su impacto en el diseño de una planta de producción de biodiésel, como lo son agua, el metanol, el biodiésel producido y el aceite de *Jatropha curcas* que se emplearán como materia prima para la síntesis de biocombustibles; esto permitió que se establecieran los datos de composición de las corrientes, la relación molar en los reactores, las temperaturas y presiones requeridos por el simulador de procesos, Aspen plus para el desarrollo de la simulación.

Se determinó que el proceso de producción de biodiésel de dos etapas haciendo uso de catalizadores homogéneos es la opción más técnica y económicamente factible para la producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*. Esto es debido a la gran influencia que tiene la formación de jabones en el rendimiento de la transesterificación, al reaccionar ácidos grasos libres con las bases (haciendo muy difícil alcanzar rendimientos aceptables sin un tratamiento), y a lo poco económicamente factible que son los procesos de producción alternativos a condiciones supercríticas.

La simulación del proceso fue alcanzada con éxito mediante el uso del programa de simulación ASPEN V8.8 utilizando el modelo NRTL para la mayor parte del proceso y PR para la decantación. El proceso consta de las etapas de tratamiento, transesterificación y purificación de biodiésel, con la finalidad de alcanzar la calidad de producto necesaria. Los parámetros de operación de los equipos se determinaron con base en los análisis de sensibilidad de los mismos y recomendaciones de autores. Por otro lado, la especificación de componentes y el uso de data experimental externa al programa de simulación se realizó basándonos en información proporcionada por autores.

Los resultados experimentales demuestran que el aceite vegetal de *Jatropha curcas*, puede ser empleado para la obtención de biodiésel, mediante un proceso de transesterificación con KOH. El producto obtenido fue caracterizado, mediante la determinación de: Densidad, número de cetanos, contenido de metanol, de ésteres y cantidad de glicerina libre y total. Las propiedades de glicerina libre, glicerina total, número de cetanos, contenido de metanol, éster y punto de inflamación cumplen con las especificaciones de la Norma ASTM D-6751-08 [4] para biodiésel y son comparables a las obtenidas para un diésel comercial. Además, que el biodiésel brinda un alto rendimiento a partir del aceite alimentado. Las propiedades de densidad no cumplieron lo mínimo según la norma, lo cual se puede atribuir a reacción incompleta de los triglicéridos durante la transesterificación.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Rodríguez, P., Hernández, A., Melo, E., Zumalacárregui, L., Pérez, O., Pérez, L., Piloto-Rodríguez, R. Caracterización del biodiesel obtenido del aceite de *Jatropha curcas* L. *Afinidad*, Vol.75, N°581, (2018), 45-51.
- [2] Dincer, K. Lower emissions from biodiesel combustion. *Energy source, part A: Recovery, Utilization and Environmental effects*. Vol 30, N° 12, (2008), 963-968. <https://doi.org/10.1080/15567030601082753>
- [3] Franco, M. Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales en condiciones supercríticas – Comunidad. (Tesis de maestría, Universidad politécnica de Cataluña) Barcelona-España, (2013).
- [4] American Society for Testing and Materials: ASTM D6751-09. Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels, (2010).
- [5] Chen, C. L., Huang, C., Tran, D. T., & Chang, J. S. Biodiesel synthesis via heterogeneous catalysis using modified strontium oxides as the catalysts. *Bioresource technology*: Vol. 113, (2012), 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.142>
- [6] Om, N., Gomes, D., de Mesquita, J., & Ceva, O. Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiésel reaction. *Fuel*, Vol.87, N°10–11, (2008). 2286–2295. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.12.006>.

[7] Sonntag, N.O.V. Composition and Characteristics of Individual Fats and Oils. In: Swern, D., Ed., *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, Vol. 1, John Wiley & Sons, New York, (1979), 289-477.

[8] Pabón, L., y Hernández, P. Importancia química de *Jatropha curcas* y sus aplicaciones biológicas, farmacológicas e industriales. (2011). [online] Medigraphic.com. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revcubplamed/cpm-2012/cpm122h.pdf>.

[9] García, M, Gandón, J, y Maqueira, Y. Estudio de la obtención de biodiesel a partir de aceite comestible usado. *Tecnología Química*, Vol. 33, N° 2, (2013), 134-138. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543779005>

[10] Sarmiento, J y Vega, L. Diseño de una planta de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas* – comunidad. (Tesis para grado, Universidad Rafael Urdaneta). Maracaibo, Venezuela, (2021).

[11] Maucher, B.F., Romano, S.D. Estudio de la viscosidad del biodiesel: resultados experimentales y predicciones, (2011).

[12] García-Muentes, S. A., Sánchez del Campo-Lafita, A. E., Labrada-Vázquez, B., Lafargue-Pérez, F., & Díaz-Velázquez, M. Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., en la provincia de Manabí, Ecuador. *Tecnología Química*, Vol.38, N°2, 281-297.

[13] Castillo, K. Caracterización Teórica de parámetros de biodiésel y estudio de algunas de sus emisiones. Madrid, España, (2018). [http://oa.upm.es/53357/1/TFG\\_KEVIN\\_CASTILLO\\_FERNANDEZ.pdf](http://oa.upm.es/53357/1/TFG_KEVIN_CASTILLO_FERNANDEZ.pdf)

[14] Romano, S. & Sorichetti P. Dielectric Spectroscopy in biodiésel Production and Characterization. Londres, Editorial Springer , (2010), 103 p.

[15] Berchmans, H. J., & Hirata, S. Biodiesel production from crude *Jatropha Curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology*, Vol. 99, N°6, (2008), 1716–1721. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.051>.

[16] Demirbas, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Convers. Manage.* Vol. 50, N°1, (2010), 14–34.

[17] Abbaszaadeh, A., B. Ghobadian, M. R. Omidkhan, and G. Najafi. Current biodiesel production technologies: A comparative review. *Energy Convers. Manage.* Vol. 63, (2012), 138–148.

[18] Koh, M. Y., & Mohd. Ghazi, T. I. A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, N° 5, (2011), 2240–2251. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.013>.

[19] Tyagi, R. Biodiesel production: technologies, challenges, and future prospects. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. (2019).

[20] Deng, X., Fang, Z., & Liu, Y. Ultrasonic transesterification of *Jatropha curcas* L. oil to biodiesel by a two-step process. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, N° 12, (2010), 2802–2807. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.017>.

[21] Joon Ching, J., Damayani, K., Ta Yeong, W., & Taufiq-Yap, Y. H. Biodiesel production from *Jatropha* oil by catalytic and non-catalytic approaches: An overview. *Bioresource Technology*, Vol., N° 102, N°2, (2011), 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.093>

[22] Akbar, E., Yaakob, Z., Kamarudin, S., Ismail, M. y Salimon, J. Characteristic and composition of *Jatropha curcas* oil Seed from Malaysia and its potential as biodiésel feedstock. *European Journal of Scientific Research*. Vol. 2, (2009), 75-89.

[23] Zhang, Y. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*. Vol.89, N°1, (2003), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00040-3).

- [24] Peng, D.-Y., & Robinson, D. B. A New Two-Constant Equation of State. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol.15, N°1, (1976), 59–64. <https://doi.org/10.1021/i160057a011>.
- [25] Patil, P. D., & Deng, S. Optimization of biodiesel production from edible and non-edible vegetable oils. *Fuel*. Vol. 88, N°7, (2009), 1302–1306. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.01.016>.
- [26] Prabowoputra, D., Sartomo, A., Y Suyitno. The effect of pressure and temperature on biodiesel production using castor oil. *The 5th International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering 2019 (ICIMECE 2019)*, (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0000>.
- [27] Requena, J., y Rodríguez, M. *Diseño y Evaluación de separadores bifásicos y trifásicos* (Tesis de pregrado, Universidad Central de Venezuela). Caracas Venezuela, (2006).
- [28] Knothe, G. Calidad del combustible biodiésel y la norma ASTM. *Palmas*. Vol.31, N°2, (2010), 163. [https://www.google.comahUKEwjonamO6LXsAhUy2FkKHWwrB9IQFjAAegQIBxAC&url=https%3A%2F%2Fpublicaciones.fedepalma.org%2Findex.php%2Fpalmas%2Farticle%2Fview%2F1563&usq=AOvVaw3EGIMp\\_iPVynSxaEqFkvdE](https://www.google.comahUKEwjonamO6LXsAhUy2FkKHWwrB9IQFjAAegQIBxAC&url=https%3A%2F%2Fpublicaciones.fedepalma.org%2Findex.php%2Fpalmas%2Farticle%2Fview%2F1563&usq=AOvVaw3EGIMp_iPVynSxaEqFkvdE).
- [29] Moser, B. Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*. Vol.45, N° 3 (2009), 229-266.
- [30] Martínez, H. J. El Piñón Mexicano: una Alternativa Bioenergética para México. *Revista Digital Universitaria* Vol., 8, N°12, (2007), 1-10. [http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art88/dic\\_art88.pdf](http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art88/dic_art88.pdf)
- [31] Ali, M., & Rind, S. Rendimiento del motor y análisis de emisiones utilizando biodiésel de neem y *Jatropha*. *La Granja Revista de Ciencias de la Vida*. Universidad Politécnica Salesiana. Vol.32, N°2, (2020), 19-29. <https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.02>

### Nota Especial

Artículo de investigación derivado del Trabajo Especial de Grado, titulado: Diseño de una planta de producción de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas*, presentado en la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela