

Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa de producción, mediante simulación

Optimization of the process of obtaining
biodiesel from a production company,
through simulation

Cristian Freire Ordóñez

Magíster en Gestión Ambiental - Universidad Internacional SEK -
Email: chrstnfreire@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1947-4455>

Johanna Medrano Barboza

Magíster en Ingeniería Química - Universidad Internacional SEK -
Email: johanna.medrano@uisek.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1414-5038>

PERSPECTIVAS

Vol 1 - No. 16

Octubre - diciembre 2019

ISSN 2145-6321

e-ISSN 2619-1687



Artículo recibido 2018 – 06 - 11
Artículo aceptado 2019 – 02 - 05

RESUMEN

Ecuador ha sido catalogado como uno de los países con potencial para incursionar en la producción de biodiesel en América Latina, utilizando aproximadamente 200 hectáreas para la generación de aceite de *Jatropha curcas*; sin embargo, la producción de este aceite no es suficiente para satisfacer la demanda del mercado ecuatoriano. En este trabajo se presenta la optimización del proceso productivo de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* en una planta piloto ecuatoriana mediante la evaluación de mejoras aplicadas mediante simulación. Para ello, se hizo el levantamiento de información de los datos operacionales, se realizaron los balances de masa y energía y se optimizaron las variables principales de operación como: temperatura, tiempo de reacción, concentración molar alcohol: aceite vegetal, uso de catalizadores homogéneos y heterogéneos, y su concentración, la intensidad del mezclado y el control de la humedad en el paquete comercial SuperPro Designer v.9.5 para la validación de la información. El resultado fue un aumento de la eficiencia del proceso de obtención de biodiesel de la empresa de 85 % a 91 % en volumen, mismos que fueron escalados tomando en cuenta la producción local de la especie y los resultados obtenidos demostraron que se puede cumplir con 25% del objetivo propuesto por el gobierno actual al obtener 10 MM (millones) de litros de biodiesel de la planta escalada.

Palabras Clave: Biocombustible, Producción biodiesel, *Jatropha curcas*, Simulación, SuperPro Designer

ABSTRACT

Ecuador has been cataloged as one of the countries with the potential to venture into biodiesel production in Latin America, using approximately 200 hectares for the generation of *Jatropha curcas* oil; however, the amount of the produced oil it is not enough to satisfy the demand of the Ecuadorian market. This paper presents the optimization of the biodiesel production process from *Jatropha curcas* in

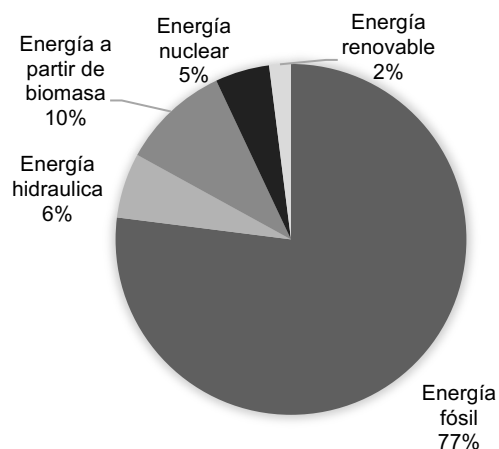
Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa de producción, mediante simulación

an Ecuadorian pilot plant through the evaluation of improvements applied by simulation. For this, the information was collected from the operational data, mass and energy balances were made and the main variables such as: temperature, reaction time, alcohol: vegetable oil molar ratio, use of homogeneous and heterogeneous, catalysts and their concentration, mixing intensity and humidity control, were optimized in the commercial package SuperPro Designer v.9.5 to validate the information. The result was an increase in the efficiency of the process of obtaining biodiesel from the company from 85% to 91% in volume, which were scaled taking into account the local production of the specie and the results obtained showed that it can be fulfill with 25% of the objective proposed by the current government to obtain 10 (millions) MM liters of biodiesel from the large scale plant.

Keywords: Biofuel, Biodiesel Production, *Jatropha curcas*, Simulation, SuperPro Designer

Introducción

El crecimiento de la población mundial en los últimos años, ha llevado a la búsqueda de alternativas que permitan cubrir la creciente demanda del consumo de energía. Los combustibles fósiles han sido los proveedores de energía en la mayoría de los procesos diarios hasta el día de hoy, mismos que han sido responsables de la generación de daños ambientales por ejemplo el cambio climático (Benito, 2016); por lo cual, estudios recientes se han focalizado ya no en la adaptación a las circunstancias; sino, en estrategias que permitan mitigar los problemas ambientales a los que se enfrenta la sociedad mediante convenios internacionales como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Naciones Unidas, 2015). La energía que se obtiene a partir de combustibles fósiles es de alrededor de 77 %, el otro 23 % lo ocupan energías obtenidas de diversas fuentes, como puede apreciarse en la Fig. 1 (Cabello, Rincón, & Zepeda, 2016).



El biodiesel se presenta como una alternativa a los combustibles fósiles, catalogados como una gran fuente de energía debido a que pueden provenir de recursos agrícolas, madereros o cualquier fuente de residuos de desperdicios urbanos (ProEcuador, 2013). Mediante un proceso de transesterificación, aceites animales, vegetales o grasas recicladas pueden convertirse en biodiesel, el cual presenta características ambientales positivas en comparación con el diésel derivado del petróleo (Castellar Ortega, Angulo Mercado, & Cardozo Arrieta, 2014).

El 83% de la producción de biodiesel se obtiene a partir de aceites vegetales, se espera que la misma disminuya con la utilización de diversas materias primas como los son: piñón, biomasa, aceite de cocina usado y sebo animal (ProEcuador, 2013). Si se toman en cuenta criterios de sustentabilidad, el reemplazo de combustibles fósiles a biodiesel debería ser llevado a corto plazo; sin embargo, no se ha alcanzado un desarrollo tecnológico apropiado y su avance depende de las diferentes resoluciones de inversionistas y del gasto que se destine a investigaciones para cumplir con las metas de las diferentes regiones (Cunningham, 2006).

El precio del mercado de biodiesel hoy en día no puede competir con los precios del petróleo crudo, pero se prevé que el precio de los derivados del petróleo; en especial los combustibles, aumenten en un 7 % desde la fecha de referencia (2013) hasta el año 2022; con lo cual, la demanda de biodiesel aumentará en un 50 % para el consumo automotor, lo cual representaría oportunidades

de trabajo y un crecimiento de la economía local (ProEcuador, 2013).

Ecuador es uno de los países que ha incursionado en el tema del biodiesel en América Latina con su propuesta Ecopaís, la cual tiene en su composición 5 % de bioetanol; hoy en día se pueden encontrar más de 40 estaciones de servicio en la ciudad de Guayaquil que ofrecen esta mezcla de combustible.

El biodiesel estimula la actividad agrícola; asimismo, genera beneficios ambientales tales como la reducción de gases de efecto invernadero como CO, CO₂, NO_x y debido a que prácticamente no contiene azufre no se generará SO₂, si es que el combustible es netamente biodiesel; sin embargo, utilizando combustibles con una composición de 95 % diesel convencional y un 5% de biodiesel se puede apreciar una disminución en los gases de efecto invernadero (Retana, 2008).

‘El proceso de obtención de biodiesel se puede realizar mediante la reacción de transesterificación de aceites o grasas (que es una reacción entre sus triglicéridos) y metanol, produciéndose glicerina y ésteres metílicos (Ramos, Fernández, Casas, Rodríguez, & Pérez, 2009). La transesterificación es la reacción en la cual los triglicéridos que se encuentran en el aceite de *Jatropha curcas* se ponen en contacto con un alcohol de bajo peso molecular (metanol, etanol, etc.) en presencia de un catalizador, para formar glicerina y una mezcla de ésteres grasos. Los factores primordiales a tomarse en cuenta en la reacción de transesterificación son el desempeño del catalizador y el control de las condiciones óptimas de reacción (Ismail, Hamid, & Wagialla, 2017).

La reacción que se presenta en la Fig. 2, es una reacción reversible puesta en contacto con un catalizador representado por ROH. R', R'' y R''' representan las cadenas de ácidos grasos asociados con el aceite o la grasa usados en la reacción, que en este caso, son usualmente, ácido palmítico, esteárico, oléico y linoléico (Ismail et al., 2017).

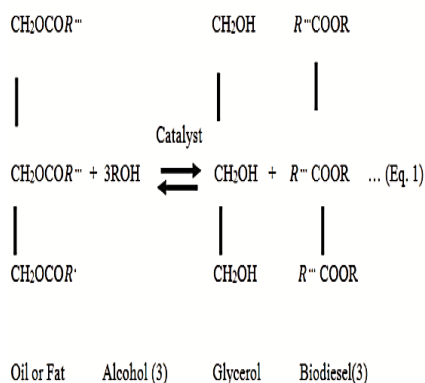


Fig. 2. Reacción de transesterificación de ácidos grasos-Simulation of Jatropha Biodiesel using SuperPro Designer (Ismail et al., 2017).

Las características fisicoquímicas del biodiesel son determinadas por los ésteres metílicos de ácidos grasos con respecto a su proporción, longitud de cadena de carbonos, y grado de insaturación. Algunas de las características fisicoquímicas consideradas para determinar la calidad de biodiesel son: viscosidad cinemática, densidad, número de cetano, índice de yodo, índice de acidez y entalpía de combustión, mismas que se encuentran en normas como la ASTM D6751 en Estados Unidos y la EN 14214 en Europa (Hoekman, Broch, Robbins, Cenicerros, & Natarajan, 2012).

El biodiesel que proviene de aceites ricos en ácidos grasos insaturados como el oléico y linoléico, proporcionan características aptas para el correcto desempeño en los motores de combustión interna, ya que su densidad y viscosidad son similares a las del diésel (Shahid & Jamal, 2011). Se ha descubierto que la presencia de ésteres metílicos de ácidos grasos monoinsaturados beneficia la calidad de ignición del biodiesel y su flujo en el motor (Shahid & Jamal, 2011).

El género *Jatropha* integra la familia Euphorbiaceae y Latinoamérica es un centro de diversificación y endemismo, contando con aproximadamente 21 % de sus especies (Fresnedo-Ramírez & Orozco-Ramírez, 2013). La especie *Jatropha curcas* posee variedades tóxicas y no tóxicas y es conocida como piñón o piñoncillo. Varias investigaciones la caracterizan como una especie con gran capacidad para la producción de biodiesel debido a

su contenido de aceite de 30% a 40% y a la composición química de éste, que se aproxima a 21% de ácidos grasos saturados y a 77% de ácidos grasos insaturados (Balat, 2011)(Armando, Alvear, & Álvarez, 2010) (Falasca & Ulberich, 2008).

2. Materiales y métodos

Las Fig. 3 y 4, representan el proceso actual de obtención de biodiesel de la planta piloto objeto de estudio, a partir del aceite de *Jatropha curcas*. La planta cuenta con una capacidad de producción del 85% y su producción es de 4 L/d.

La planta piloto y la simulación realizada constan de cuatro procesos: un reactor R-101, dos centrifugas DC-101 y DC-102, y un mezclador M-101, los mismos que conforman el proceso de obtención de biodiesel que se encuentran en la Fig. 4, y que se explican brevemente a continuación: la corriente de la catálisis la cual contiene una solución 75% de metanol con 25% de hidróxido de sodio, creándose el compuesto metóxido de sodio (NaOCH_3), se pone en contacto con la corriente de metanol, formando la corriente C-101, la cual alimenta al reactor R-101 por el tope, mientras que el aceite de *Jatropha curcas* alimenta por la parte media a dicho reactor. Acorde a la reacción de transesterificación mencionada en la Fig. 2, el metanol reacciona con el aceite de *Jatropha curcas* produciendo la corriente C-102 la cual contiene biodiesel, glicerol y trazas de los reactantes.

El tiempo de residencia en el reactor es de 1 hora, obteniéndose una conversión aproximada del 82 al 85%. La corriente C-102 ingresa al centrifugador DC-101, en el cual se separan grasas y aceites con el fin de retirar en su mayoría, el biodiesel crudo (C-103) del glicerol (C-104). En los procesos de centrifugación se adoptaron las propiedades propuestas por el software SuperPro Designer V9.5 para este tipo de equipos como el tipo de solvente y tamaño de partícula del separador, cambiando simplemente los porcentajes en el balance de materia con la finalidad de obtener una separación de biodiesel del glicerol.

La corriente C-103 que contiene biodiesel crudo, se lava con agua acidificada (C-105) con un pH de 4.5 en el mezclador M-101, utilizando HCl en una relación del 1% p/p con respecto al aceite, para neutralizar la catálisis y evitar la formación de jabón. El producto resultante del mezclador (C-106) se envía al segundo centrifugador (DC-102) para separar la fase acuosa, obteniendo biodiesel y restos de glicerol.

Las variables que se identificaron y que su variación puede afectar al proceso de transesterificación son: temperatura, tiempo de reacción, relación molar alcohol: aceite vegetal, tipo de alcohol, humedad y concentración de catalizador (Sharma, Singh, & Upadhyay, 2008). El producto de la corriente de biodiesel no debe contener más de un 0.05% p/p de agua. Un alto contenido de agua puede reducir la velocidad de reacción, debido a que la misma reacciona con los catalizadores formando jabones (Garc, 2006) (Ismaiel et al., 2017).

Como se observa en la Fig. 2, en la reacción de transesterificación la relación estequiométrica es de 3:1 alcohol: aceite, pero se suele optar por un exceso de metanol de hasta una relación 6:1 para obtener una mayor conversión; sin embargo, una relación de alcohol superior a la de 6:1 puede afectar a la separación de glicerina por el aumento solubilidad, cuando esta se encuentra en la solución provoca que la reacción se revierta hacia la izquierda, reduciendo el rendimiento de los ésteres (Gil, 2017).

3. Resultados

Las diferentes propiedades físicas de los compuestos utilizados en esta simulación se encuentran en la base de datos del software SuperPro Designer v.9.5. Las condiciones de operación recomendadas en plantas piloto de obtención de biodiesel son: un reactor de agitación continua con temperatura de reacción de 60° C y 1 atm de presión, con tiempo de residencia de 60 min (Sastry, 2011).

En el proceso de la Fig. 3, se aprecia la etapa de transesterificación sin una etapa de pre-tratamiento del aceite, debido a que el aceite de *Jatropha curcas* del

Ecuador posee tan solo el 1,26% de ácidos grasos libres, y por lo tanto no requiere de un pretratamiento previo (Elizalde & Rodríguez, 2009).

El catalizador utilizado fue el NaOH debido a sus ventajas económicas y de velocidad de reacción (Torossi, 2006), la concentración del catalizador es de 1 % y cuenta con una relación molar alcohol: aceite de 3:1; (Gupta & Sastry, 2016).

Los resultados obtenidos en la planta piloto de biodiesel de la empresa ecuatoriana estudiada, previa a la realización de la simulación eran del 85%, basándose solamente en el volumen del producto al final del proceso, que representa aproximadamente 2,4543 kg/día de biodiesel.

Al analizar las diferentes variables de operación mencionadas en la metodología y con el objetivo de asegurar máximas conversiones se utilizó un tiempo de residencia de 90 minutos en el reactor CSTR, tiempo con el que se trabaja en algunas plantas de obtención de biodiesel en la India (Sastry & Ramachandramurthy, 2011), obteniendo resultados de 3,8508 kg de biodiesel, correspondiente a un 91% de conversión con respecto al proceso previo en la simulación base, el cual era de un 85%, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Detalles de flujos de corrientes de la planta piloto empleados para la simulación base.

Detalle corrientes		
Reactor 1/ R-101		
Corriente	Componentes	Flujo (kg/día)
C-101	Metanol- Catálisis	0,43
Aceite de Jatropha curcas	Aceite Jatropha curcas	4,00
Centrifugador 2/ DC-102		
C-102	Biodiesel	3,8000
	Glicerol	0,4038
	Aceite Jatropha curcas	0,1171
	Metóxido de sodio	0,0125
	Agua	0,0160
C-103	Biodiesel	3,8100
	Aceite Jatropha curcas	0,1116
	Metóxido de sodio	0,0125
	Agua	0,0160
C-104	Glicerol	0,4038
Mezclador / R-103		
C-105	HCl- Agua	0,1570
C-106	Biodiesel	3,8306
	Glicerol	0,0403
	HCl	0,0152
	Aceite Jatropha curcas	0,1171
	Metanol	0,0055
	Metóxido de sodio	0,0031
	Cloruro de sodio	0,0101
	Agua	0,0160
Centrifugador 2/ DC-104		
Biodiesel	Biodiesel	3,8508
C-107	Glicerol	0,0400

Fuente: SuperPro Designer v.9.5 – Elaboración propia

Propuesta deescalamiento de 10 MM de L/año

Al analizar la situación actual de Ecuador y ante el requerimiento del cambio de la matriz energética, se dispuso a diseñar **mediante** simulación, una planta de mayor capacidad. Para la simulación de la nueva planta se tomaron como referencia la información recolectada de varios estudios, acerca de las variables que intervienen en el proceso de biodiesel, así como, la inclusión de un proceso para el tratamiento de la glicerina producida utilizando el software (Sastry, 2011)(Cabello et al., 2016)(Albis et al., 2005)(Castellar Ortega et al., 2014)(Rojas, Canchala, & Torres, 2009), como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables identificadas y valores puntuales de operación

Variables	Valores bibliográficos de operación
Temperatura de reacción	60° C
Relación alcohol molar: aceite vegetal	3:1
Tipo de alcohol	Metanol
Tipo de catalizador	NaOH
Concentración de catalizador	1% p/p
Tiempo de reacción	90 min
Intensidad de mezclado	450 rpm
Humedad	0,05%

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Las Fig. 5 y 6, representan la propuesta de escalamiento al proceso de obtención de biodiesel. La propuesta basa sus principios en la simulación utilizada en el proceso de obtención de biodiesel de la empresa.

La simulación cuenta con dos etapas, de reacción y dos etapas adicionales para la purificación de glicerina como se observa en la figura 8; las mismas se describen a continuación:

Dos reactores para la etapa de reacción (R-101 y R-102).

Un mezclador para la etapa 1 (M-101) y dos mezcladores adicionales para la etapa 2 de purificación de glicerina (M-202 y M-203)

Tres centrifugadoras para la etapa 1 de reacción y neutralización (DC-101, DC-102 y DC-103) y una centrifugadora para el proceso de purificación de glicerina (DC-201).

Un destilador flash para separar la fase líquida de la de biodiesel (V-101).

Dos torres de destilación (T-201 y T-202) para la separación de metanol y agua que será reconectada al proceso.

Se tomaron en cuenta criterios de expertos los cuales determinan que en 1 ha de siembra de *Jatropha curcas* con una producción de semillas de 5 ton/ha, se puede obtener 1.5 ton de aceite (De la Rosa, Henríquez Montero, Sánchez Tuirán, & Ojeda Delgado, 2015). Para alcanzar el objetivo de los 10 MM de L/año de biodiesel, basándose en el criterio anterior se debe contar con un espacio de terreno cultivable de 6480 ha y 32400 ton/ha de semilla de *Jatropha curcas*.

Proceso de obtención de Biodiesel de la empresa

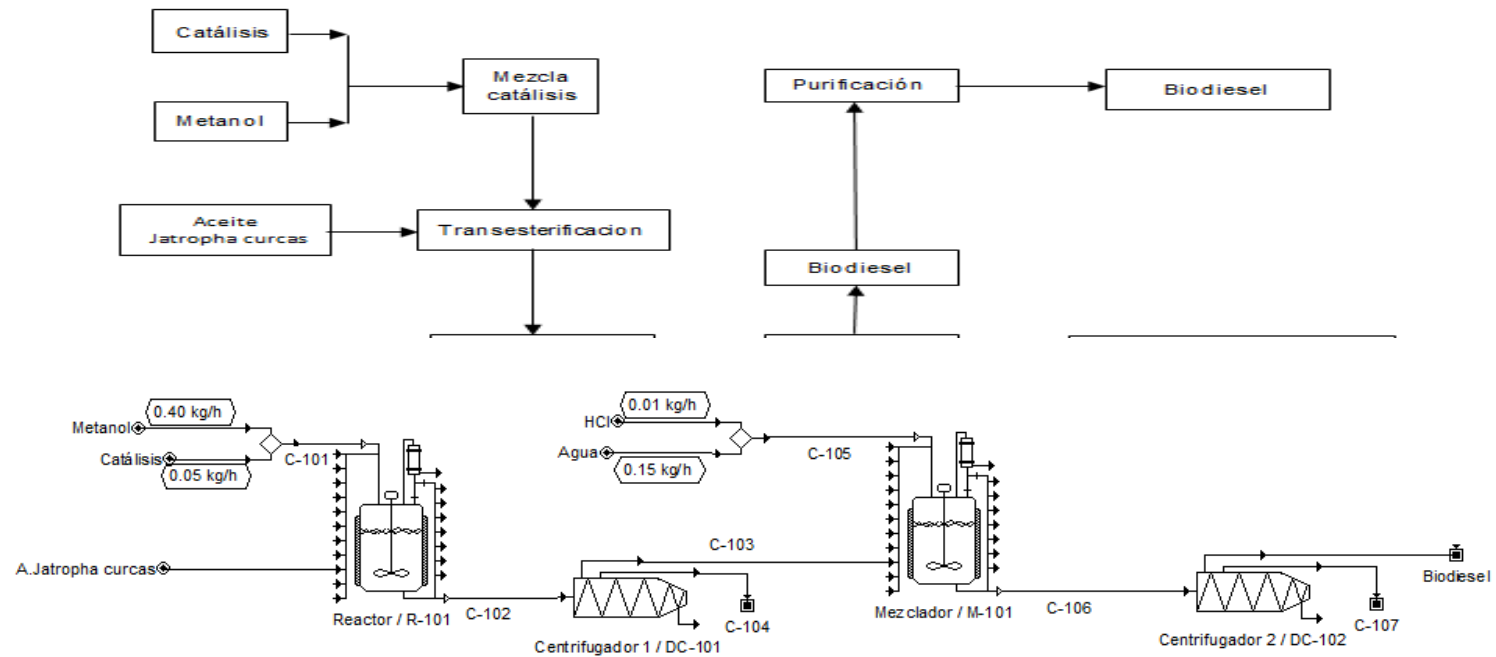


Fig. 4. Diagrama de producción de biodiesel- planta piloto ecuatoriana con SuperPro Designer v.9.5

Pese a que la transesterificación de *Jatropha curcas* se puede dar a temperaturas de hasta 25°C, es recomendable mantener rangos entre 60-65 °C de la misma, debido a que la concentración alcohol: aceite que se maneja es de 3:1. Como se observa en la Tabla 3, el contenido de agua en la corriente de vapor es del 98.69 % mientras que el contenido de la corriente por la parte inferior de biodiesel es de 98.53 %, evidenciando así la separación del agua del biodiesel.

En el proceso de purificación de glicerina, las corrientes provenientes de las tres centrifugadoras ingresan al mezclador M-201, para ser acidificadas con HCl 1N 35,5-38% para separar los jabones y neutralizar el residuo de NaOH contenido en ellas (Carvajal-osorio et al., 2010). Los resultados de las corrientes derivadas de la centrifugadora y la columna de destilación, se muestran en las Fig. 4 y 5, respectivamente.

Con respecto a las variables de operación utilizadas en la propuesta de escalado de la Tabla 2, se debe tomar en cuenta que si bien el aumento de la temperatura a 60°C favorece el rendimiento y el tiempo de reacción disminuye, se sugiere que la temperatura no sobrepase el punto de ebullición del metanol de 64,7°C porque se vaporizará, formándose burbujas que limitan la reacción en las fases alcohol/aceite/biodiesel (Liu, Piao, Wang, & Zhu, 2008).

Para alcanzar el objetivo de 10 MM de L/año (9.353.857,97 kg/año) se toma como referencia el tiempo de operación de la planta piloto ecuatoriana, que son 9 h/día durante 240 días; carga de trabajo que se acostumbra a utilizar en las diferentes haciendas de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. Para estimar el rendimiento de la planta se tomó en cuenta las diferentes entradas al proceso durante un año las cuales equivalen a 10.278.964,80 kg/año y la salida al final del proceso son de 9.353.857,97 kg/año obteniéndose un porcentaje del 91% p/p.

Tabla 3. Resultados del Destilador Flash/V-101

Corriente	Componentes	kg/h	% masa
Vapor	Biodiesel	0,0019	0,0022
	Glicerol	0,0963	0,1092
	Aceite Jatropha curcas	0,0963	0,1092
	Metanol	0,8014	0,9078
	NaOCH ₃	0,1573	0,1782
	Agua	87,1017	98,6934
Biodiesel	Biodiesel	4269,958	98,5342
	Glicerol	40,4833	0,9342
	Aceite Jatropha curcas	6,0642	0,1399
	Metanol	0,3895	0,0090
	NaOCH ₃	0,1874	0,0043
	Agua	15,4422	0,0356

Se determinaron los costos de los materiales utilizados en base a bibliografía y estudios de mercadeo en Ecuador (Arias, 2014). En las Tablas 6, 7 y 8 se aprecia que el costo total invertido en el simulador es de \$ 44.928.000 MM; este precio incluye el costo de los equipos, los costos directos e indirectos.

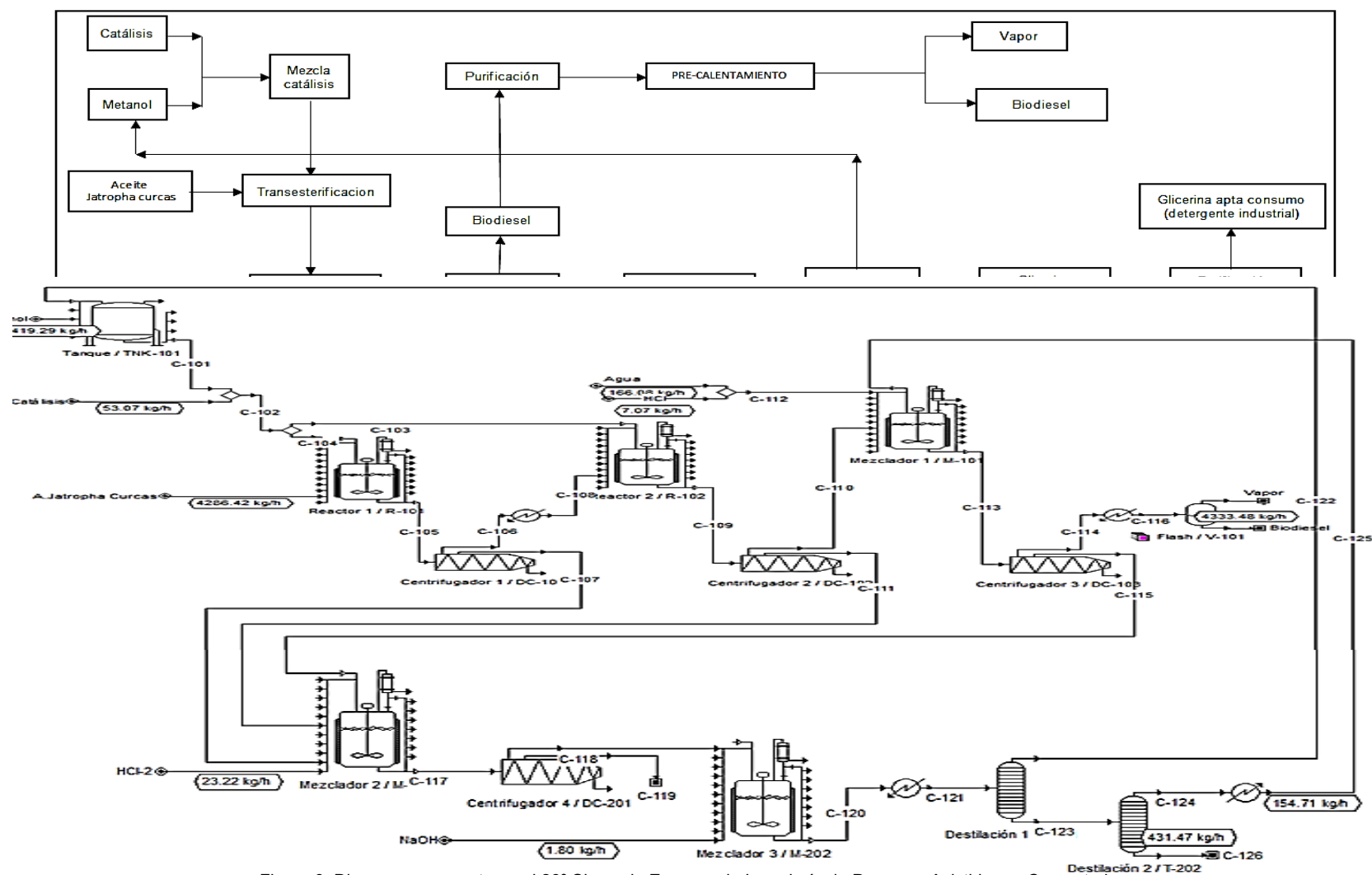


Figura 6. Diagrama propuesto en el 26º Simposio Europeo de Ingeniería de Procesos Asistida por Computadora

Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa de producción, mediante simulación

Tabla 4. Resultados de corrientes Centrifugadora DC-201

Corriente	Componentes	Flujo (kg)
C-117	Biodiesel	1,2424
	Glicerol	401,6890
	HCl	1,8750
	Aceite Jatropha curcas	3,8639
	Metanol	11,1369
	Agua	262,3787
C-118	Biodiesel	1,2422
	Glicerol	401,6488
	HCl	1,2012
	Aceite Jatropha curcas	3,8635
	Metanol	7,1348
	Agua	168,0921
C-119	Biodiesel	0,0001
	Glicerol	0,0401
	HCl	0,6738
	Aceite Jatropha curcas	0,0003
	Metanol	4,0021
	Agua	94,2866

Fuente: SuperPro Designer v9.5 -

Tabla 5. Corrientes destilador T-201

Corriente	Componentes	Flujo (kg)	%
C-122	Metanol	7,0782	99,7681
	Agua	0,0164	0,2319

Fuente: SuperPro Designer v9.5 -

Tabla 6. Resumen del análisis económico

Base	3 ton/ hora aceite <i>J.curcas</i> 27 ton/ día aceite <i>J.curcas</i>
Tiempo de operación	9 horas por día
	240 días por año
Capital Total Invertido	\$ 44.928.000
Costos operacionales estimados para 10 años	\$ 107.278.000

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Tabla 7. Costo equipos propuesta escalado

Especificaciones equipos y costo FOB USA (precios 2017)

Cant.	Nombre	Descripción	Costo unitario (\$)	Costo Total (\$)
1	R-101	Reactor Agitado	767000	767000
		Volumen recipiente = 5408.3 L		
1	R-102	Reactor Agitado	773000	773000
		Volumen recipiente = 5703.6 L		
1	DC-101	Centrífuga	300000	300000
		Rendimiento = 5161.18 L/h		
1	DC-102	Centrífuga	300000	300000
		Volumen recipiente = 5193.9 L		
1	HX-101	Intercambiador de calor	9000	9000
		Área = 0.48 m ²		
1	M-101	Mezclador	643000	643000
		Volumen recipiente= 1497.86 L		
1	DC-103	Centrifugadora	300000	300000
		Rendimiento = 5391.94 L/h		
1	HX-102	Intercambiador de calor	10000	10000
		Área = 1.29 m ²		
1	V-101	Destilador flash	10000	10000
		Volumen recipiente = 1677.4 L		

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Los costos operacionales correspondientes a un precio de \$107.278.000 MM incluyen los valores las materias primas, mano de obra, facilidades y los fluidos utilizados como generadores de calor o de enfriamiento (Vapor alta presión y agua).

Tabla 8. Costo equipos propuesta escalado

Especificaciones equipos y costo FOB (precios 2017)

Cant.	Nombre	Descripción	Costo unitario (\$)	Costo Total (\$)
1	M-201	Mezclador	517000	517000
		Volumen recipiente = 306.18 L		
1	DC-201	Centrifugadora	300000	300000
		Rendimiento = 611.62 L/h		
1	M-202	Mezclador	504000	504000
		Volumen recipiente = 254.69 L		
1	HX-201	Intercambiador de calor	9000	9000
		Área = 0.30 m ²		
1	T-201	Columna destilación	9000	9000
		Volumen columna = 14.03 L		
1	T-202	Columna destilación	18000	18000
		Volumen columna = 145.29 L		
1	TNK-101	Tanque vertical	39000	39000
		Volumen recipiente = 12971.8L		
1	HX-202	Intercambiador de calor	9000	9000
		Área = 0.01 m ²		
		Equipos no listados		1134000
		TOTAL		5651000

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Para la planta de escalado se utilizaron reactores continuos, ya que son los más usados en la producción a gran escala de biodiesel, porque permiten mantener resultados de calidad similares a lo largo del proceso y el costo por unidad de producto es menor en comparación a otros reactores (eXtension, 2015).

Una de las variables modificadas es el tipo de catalizador a utilizarse en la obtención de biodiesel. Se comparó el resultado de la simulación de la planta de escalado utilizando un catalizador heterogéneo como el óxido de zirconio (ZrO_2), manteniendo los valores de las variables de la Tabla 2, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 9. Resultado Destilador Flash/V-101 utilizando ZrO_2

Resultado Destilador Flash/V-101			
		kg/h	% masa
Vapor	Biodiesel	0,0059	0,0064
	Glicerol	0,1058	0,1141
	Aceite Jatropha curcas	0,1472	0,1588
	Metanol	1,5813	1,7059
	Oxido de zirconio	0,2798	0,3018
	Agua	90,5761	97,7130
Biodiesel	Biodiesel	3742,099	98,0683
	Glicerol	45,1496	1,1832
	Aceite Jatropha curcas	7,1045	0,1862
	Metanol	0,8423	0,0221
	Oxido de zirconio	10,1584	0,2662
	Agua	10,4569	0,2740

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

La cantidad de materia prima ingresada al proceso es de 4758,70 kg/h mientras que la salida del proceso es de 3908,5068 kg/h, resultado de las corrientes de vapor y biodiesel de la Tabla 9, obteniéndose una conversión del 82 % p/p utilizando el ZrO_2 . Estos valores se corroboran con los

resultados de pruebas experimentales en donde se utilizó el ZrO_2 como catalizador, y en las que se obtuvieron rendimientos del 86 al 90,3 % en conversión (Cabello et al., 2016).

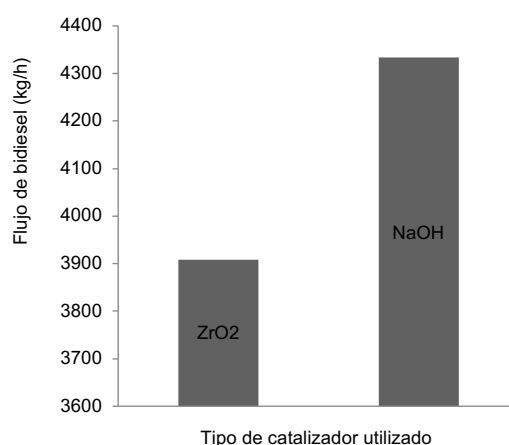


Fig. 7. Producción de biodiesel respecto al tipo de catalizador empleado para la transesterificación - Elaboración propia

Al obtenerse una conversión del 91 % es decir 4333,48 kg/h en la planta de escalado en el destilador Flash V-101 utilizando NaOH como catalizador, como se puede observar en la Fig. 7, se evidencia que por precio y rendimiento los catalizadores homogéneos como el NaOH superan a los heterogéneos.

La temperatura de reacción se encuentra directamente relacionada con las variables de tiempo de reacción y relación molar alcohol: aceite debido a que manteniendo un rango de 60°C se favorece la velocidad de reacción, como se muestra en la Fig. 8 y acorde a estudios realizados en India (Sasthy, 2011).

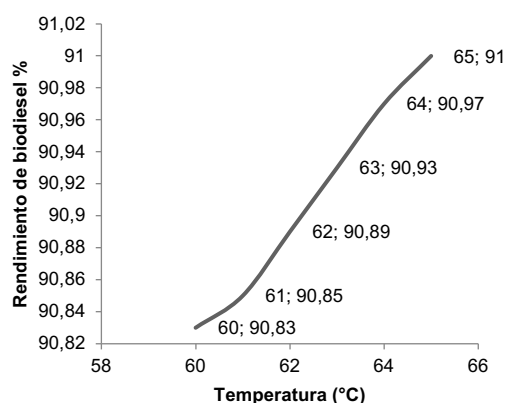


Fig. 8. Rendimiento de biodiesel en función de la variación de la temperatura

Al manipular la variable de relación molar alcohol: aceite donde si bien se especifica que se puede utilizar un exceso de alcohol hasta una concentración 6:1, para garantizar altas conversiones (Gupta & Sastry, 2016), dicha especificación no permite que se desarrolle la simulación en el programa SuperPro Designer v.9.5, debido a que en su base de datos la reacción de transesterificación está diseñada para operar con una relación alcohol: aceite de 3:1, por lo cual el parámetro de relación molar alcohol: aceite de 3:1 es el indicado en el proceso de escalado por restricciones del software.

Al trabajar en la simulación de la planta escalada con un tiempo de residencia de 60 minutos en los reactores, valor sugerido por Sastry (2011), para obtener máximas conversiones, se obtuvo una salida de producto de 4044,89 correspondiente al 85% de conversión; sin embargo, al utilizar un tiempo de residencia de 90 minutos en ambos reactores, parámetro con el cual se trabaja en distintas plantas de la India (Gupta & Sastry, 2016), se obtuvo un valor de 4758,70 kg/h que representa el 91 % de conversión, como se puede apreciar en la Fig. 9, determinándose el valor de 90 minutos como el tiempo óptimo de operación el tiempo de 90 minutos como la variable óptima de operación. A mayor tiempo no se evidenció un aumento en el rendimiento, por el contrario existiría un incremento de costos.

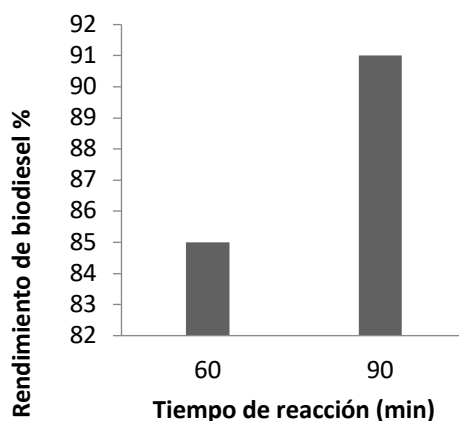


Fig. 9. Rendimiento de biodiesel en función del tiempo de reacción.

Luego de la obtención del biodiesel, este deberá ser caracterizado para comprobar que este cumpla con los requerimientos expuestos en normas internacionales como la ASTM D6751 en Estados Unidos y la EN 14214 en Europa (Hoekman et al., 2012).

4. Conclusiones

Las oportunidades de mejora encontradas con la implementación de procesos de producción permitieron determinar las cantidades de materia prima apropiadas para obtener una eficiencia del 91% utilizando el aceite de *Jatropha curcas* como materia prima.

A partir de las oportunidades de mejora, se concluye que con el diseño propuesto, de los valores de las variable de temperatura de 65 ° C, relación molar alcohol metanol: aceite de 3:1, concentración de catalizador (NaOH) del 1% p/p, tiempo de reacción de 90 min, una intensidad de mezclado de 450 rpm, se alcanzaría una producción de 10.247.880,00 lt de biodiesel, obtenido a partir de aceite de *Jatropha curcas*.

Del análisis económico se concluye que el proyecto resulta rentable, considerando que la tasa interna de retorno (7,41 %) es mayor a la tasa de interés pagada por un banco nacional (5,06 %). Así mismo se evidenció que para alcanzar un VAN positivo deberían pasar al menos 6 años, que representaría el tiempo de recuperación de la inversión, trabajando con una carga horaria de 9 h/día durante 240 días.

Referencias bibliográficas

- Benito, Y. (2016). INVESTIGA I+D+i 2016/2017 GUÍA ESPECÍFICA DE TRABAJO SOBRE " Co 2 y cambio climático "; 10. Retrieved from [https://www.fundacionsanpatricio.org/es/investiga/pdf/guias2016-17/Guia introductoria al tema CO2 y cambio climatico.pdf](https://www.fundacionsanpatricio.org/es/investiga/pdf/guias2016-17/Guia%20introdutoria%20al%20tema%20CO2%20y%20cambio%20climatico.pdf)
- Naciones Unidas. (2015). Convenio Marco sobre el Cambio Climático. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>
- Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2016b). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad*, 74(March), 51–59. Retrieved from <http://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320756>
- ProEcuador. (2013). Biocombustibles. ProEcuador. (2013). *Biocombustibles*, 1–26., 1–26.
- Castellar Ortega, G. C., Angulo Mercado, E. R., & Cardozo Arrieta, B. M. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos Transesterification vegetable oils using heterogeneous catalysts. *Prospect*, 12(2), 90–104. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n2/v12n2a10.pdf>
- Cunningham, R. E. (2006). Biocombustibles como alternativa de los combustibles fósiles: ¿solución integral o apenas un paliativo?, 15. Retrieved from

<http://biblioteca.iapg.org.ar/ArchivosAdjuntos/Petrotecnia/2007-2/Biocombustible.pdf>

- Retana, I. (2008). Desventajas De La Utilización Del Biodiesel. Retrieved from http://www.ina.ac.cr/mecanica_de_vehiculos/Transferencia tecnologica sobre ventajas y desventajas de la utilizacion del biodiesel.pdf
- Ramos, M. J., Fernández, C. M., Casas, A., Rodríguez, L., & Pérez, Á. (2009). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, 100(1), 261–268. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.06.039>
- Ismail, M., Hamid, M., & Wagialla, K. M. (2017). Simulation of Jatropha Biodiesel production using SuperPro Designer, 2(March).
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicer, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 143–169. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.143>
- Shahid, E. M., & Jamal, Y. (2011). Production of biodiesel: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4732–4745. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.079>
- Fresnedo-Ramírez, J., & Orozco-Ramírez, Q. (2013). Genetic resources and crop evolution. Genetic resources and crop evolution. Kluwer Academic Publishers. Retrieved from http://agris.fao.org/agris-search/search.do;jsessionid=D96D0644960B9AF1FB6F2BCA4028ED36?request_locale=fr&recordID=US201400047528&query=&sourceQuery=&sortField=&sortOrder=&agrovocString=&advQuery=¢erString=&enableField=
- Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 858–875. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2010.08.013>

- Armando, V., Alvear, R., & Álvarez, F. (2010). Proyecto de Inversión para la elaboración y comercialización de Biodiesel a partir de la planta *Jatropha Curcas* en el Ecuador Resumen, 1–6. Retrieved from [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16193/1/Proyecto de Inversión para la elaboración y comercialización de Biodiesel a partir de la planta *Jatropha Curcas* en el Ecuador.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16193/1/Proyecto%20de%20Inversi3n%20para%20la%20elaboraci3n%20y%20comercializaci3n%20de%20Biodiesel%20a%20partir%20de%20la%20planta%20Jatropha%20Curcas%20en%20el%20Ecuador.pdf)
- Falasca, S. L., & Ulberich, A. (2008). Potencialidad bioenergética sudamericana a partir de forestaciones con *Jatropha* sp . (*J.curcas*, *hieronymi* y *macrocarpa*). *Revista Virtual Redesma*, 2, 102–115.
- Sharma, Y. C., Singh, B., & Upadhyay, S. N. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. *Fuel*, 87(12), 2355–2373. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2008.01.014>
- Garc, J. M. (2006). Biocarburantes Líquidos: Biodiésel Y Bioetanol. Fundación Para El Crecimiento de Madrid CEIM, (M-30985-2006), 125. Retrieved from http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/Publicacion/doc/VT/vt4_Biocarburantes_liquidos_biodiesel_y_bioetanol.pdf
- Gil, M. R. (2017). Producción de biodiésel a partir de aceite de girasol en una planta piloto de reacción por cavitación, 73. Retrieved from <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/25737/1/TFG-I-712.pdf>
- Sastry. (2011). Production of Biodiesel from the catalytic tranesterification of *Jatropha* oil. *Elixir Chem. Engg*, 40, 5136–5137. Retrieved from [http://www.elixirpublishers.com/articles/1350118299_40\(2011\) 5136-5137.pdf](http://www.elixirpublishers.com/articles/1350118299_40(2011)%205136-5137.pdf)
- Elizalde, P. X., & Rodríguez, B. L. (2009). Diseño preliminar de una planta de producción de biodiesel a partir de *j curcas* en la región sur del Ecuador.

- Torossi, F. (2006). Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado. ANALES de La Real Sociedad Española de Química, 102(3), 43–49. Retrieved from <https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd>
- Sastry, S. V. A. R., & Ramachandramurthy, C. V. (2011). Fuzzy logic application in process modeling of biodiesel reactor. Elixir Chem. Engg, 38, 4335–4338.
- Gupta, A. K., & Sastry, S. V. A. R. (2016). Developing the rate-equation for biodiesel production reaction." Advances in Energy Research, 127–133.
- Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2016a). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. Afinidad, 74(March), 51–59.
- Albis, A., Parra, J., & Sánchez, F. (2005). Transesterificación de aceite de palma con metanol por catálisis heterogénea. Ingeniería E Investigación, 25, 71–77.
- Rojas, A. F., Canchala, M. J., & Torres, H. G. (2009). PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES USADOS DE COCINA UTILIZANDO CATALIZADORES ADSORBIDOS EN MATRICES SÓLIDAS A. F. Rojas*, M. J. Canchala & H. G. Torres, 1–12. Retrieved from <http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/eventos/siquia/siquia2009pon10.pdf>
- Dela Rosa, L. R., Henríquez Montero, E., Sánchez Tuirán, E., & Ojeda Delgado, K. A. (2015). Diseño y simulación de una planta para la producción de biodiésel a partir de *Jatropha curcas* en el departamento de Bolívar. Revista ION, 28(1), 73–85. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2015000100008&script=sci_abstract&tlng=es
- Carvajal-osorio, H., Babativa, J. H., Alonso, J. A., Competitividad, I., Valle, U., Valle, U., ... Serra, A. B.

- (2010). Hydrogen production from photocatalytic water splitting over mesoporous-assembled SrTiO₃ nanocrystal-based photocatalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 312(2), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2009.07.012>
- Liu, X., Piao, X., Wang, Y., & Zhu, S. (2008). Calcium methoxide as a solid base catalyst for the transesterification of soybean oil to biodiesel with methanol, 87, 1076–1082.
- Arias, J. M. (2014). OBTENCIÓN Y USO DEL ACEITE DE PIÑÓN (*Jatropha Curcas*) PARA ELABORACIÓN DE BIODIESEL. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8697/3/C-D-5833.pdf>
- eXtension. (2015). Reactors for Biodiesel Production. Retrieved from <http://articles.extension.org/pages/26630/reactors-for-biodiesel-production>