



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

“Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa, mediante simulación”

Realizado por:

CRISTIAN GERMÁN FREIRE ORDÓÑEZ

Director del proyecto:

MSc. Johanna Medrano

Como requisito para la obtención del título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Quito, 05 de Abril del 2018

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, CRISTIAN GERMÁN FREIRE ORDÓÑEZ, con cédula de identidad # 171816583-8, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



171816583-8

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa,
mediante simulación”**

Realizado por:

CRISTIAN GERMÁN FREIRE ORDÓÑEZ

como Requisito para la Obtención del Título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

JOHANNA MEDRANO

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

RODOLFO RUBIO

WALBERTO GALLEGOS

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R. Rubio', written over a horizontal line.

FIRMA

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Walberto Gallegos', written over a horizontal line.

FIRMA

DEDICATORIA

A mi padre Germán Freire, por su abnegado esfuerzo e incondicional apoyo y cariño, por ser el pilar fundamental de mi vida y quien ha velado por mi bienestar y educación, depositando su entera confianza en cada reto que se me ha presentado sin dudar un solo momento en mi capacidad.

Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de él un gran ejemplo a seguir y destacar, quien me ha inculcado el valor de la honestidad para ser ante todo una persona íntegra, con su espíritu de lucha forjó ejemplo para no rendirme ante ningún obstáculo, por querer siempre mi superación, por ser el mejor papá del mundo y por siempre mi súper héroe.

.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, y a la Virgen Guadalupana por haberme cobijado bajo su manto durante estos años de maestría, siendo mi soporte fundamental en todo momento y guiándome siempre para ser un hombre de bien.

A mis dos madres, Germania y Sandra Ordoñez por todo su amor y comprensión, por ser pilar fundamental en mi crecimiento personal y profesional e inspirar los mejores valores alimentando mi corazón de sentimientos puros, y que sin su presencia no estaría en el lugar que estoy.

A mis hermanas Silvia y Alejandra, a quienes agradezco por su verdadero amor, cariño y amistad sincera a lo largo de todo este trayecto, y que sin ellas este reto no hubiera podido ser concluido.

A mis amigos, quienes han sido soporte fundamental de mi vida haciendo de ella una aventura llena de buenos momentos y alegrías. En especial a ti Bryan por haberte convertido en mi hermano y que en gran parte la persona que soy hoy te la debo a ti.

A mi tutora de tesis, Johanna Medrano por ser ejemplo de éxito profesional, fruto del esfuerzo honesto y preparación constante.

A mis maestros Rodolfo Rubio, y Walberto Gallegos por su paciencia al enseñarme algo nuevo cada día y por su seguimiento constante en el desarrollo de mi proyecto de fin de carrera.

5/4/18 8:03:13 a.3.p.3.

Para ser sometido a: REVISTA CIENCIA (órgano oficial de la Academia Mexicana de Ciencias)

**Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa,
mediante simulación.**

**Optimization process to obtain biodiesel from a company, through
simulation**

Cristian Freire¹ & Johanna Medrano²

¹Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales,
Quito, Ecuador. Email: chrstnfreire@gmail.com

²Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales,
Quito, Ecuador. Email: johanna.medrano@uisek.edu.ec

- Autor de correspondencia: MSc. Johanna Medrano,
johanna.medrano@uisek.edu.ec

Título corto (Running title): Optimization process to obtain biodiesel

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 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. Se estima que dicho consumo se ha duplicado con respecto a los años 90 y que el mismo podría aumentar en un 50 % para el año 2050 (WWF, Ecofys, & OMA, 2011). 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

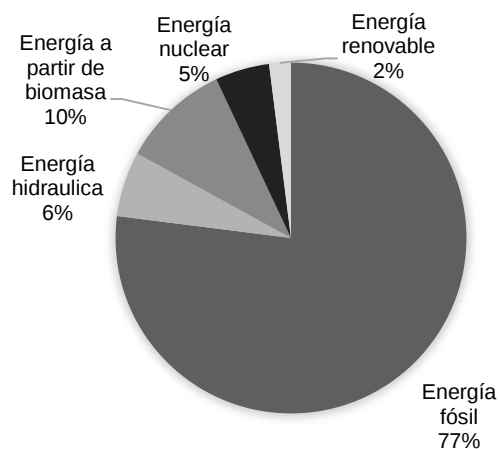


Figura 1. Distribución de porcentajes de energías utilizadas alrededor del mundo- Foro Mundial de Energía 2009

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 Figura 1 (Cabello, Rincón, & Zepeda, 2016).

En el año 2009 en el Foro Mundial de Energía, estudios predijeron que las reservas de petróleo se agotarán, de no ser descubiertos nuevos depósitos de petróleo, en 100 años. Algunas de las razones para que exista tan rápida disminución de este recurso son el crecimiento demográfico y la industrialización a nivel mundial, ocasionando que el precio del petróleo en muchos casos disminuya y a su vez pudiendo desatarse conflictos bélicos entre algunos países (Cabello et al., 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).

Sin embargo, el biodiesel ha desatado una controversia socio-ambiental en los últimos años, debido a su obtención a partir de productos de consumo masivo como la caña de azúcar, el maíz o la soja (Gala & Prado, 2012). Por lo cual, se han desarrollado investigaciones en base a la búsqueda de diferentes opciones de producción, que no comprometan el futuro alimenticio de la sociedad.

Se tiene como expectativa que países como EE.UU., Brasil y la Unión Europea continúen siendo precursores en la producción de bioetanol destinado a mezclarse con el diesel derivado del petróleo, como se menciona en artículos de la FAO, en los que se estima que la producción de bioetanol crecerá en un 70% durante los años 2012 a 2022, alcanzando aproximadamente 167.000 MM de litros. Dicha cifra representa el 12 % de la producción mundial de cereales secundarios y 29 % de la de caña de azúcar (HLPE & FAO, 2013).

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).

Producción de biodiesel en Ecuador

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. La capacidad instalada nacional actual es de 4 MM de litros de biocombustible al año; sin embargo; la meta del Gobierno es realizar una ampliación hasta los 40

MM de litros adicionales (ProEcuador, 2013). Como se menciona en el Decreto Ejecutivo 1303 emitido por el presidente del Ecuador Rafael Correa en el año 2012, se establece que el diésel de procedencia fósil que se consume en el país debe contener 5% de biodiesel hasta llegar al 10% del mismo en su composición final (Paredes, 2015). 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 aceite de palma africana es una de las fuentes para la producción de biodiesel en algunos países del continente americano como Colombia, Honduras, Ecuador, Brasil, Guatemala y Costa Rica (FAO, 2015)., en el Ecuador; sin embargo, la producción del mismo a partir de esta materia prima solo abarca el 30% de la demanda nacional de biodiesel, el cual es considerado parte fundamental en la transformación de la matriz productiva (ProEcuador, 2013). Varios proyectos se han llevado a cabo en las distintas regiones del país, dentro de las

cuales cabe destacar el proyecto de obtención de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* (piñón) en las Islas Galápagos (Alcúe, 2013).

Es de poco conocimiento que la energía que se ha utilizado durante los últimos años en algunos procesos productivos dentro de la región del archipiélago de Galápagos proviene de una fuente renovable como lo es el piñón, mismo que en tiempos de guerra era utilizado dentro de las industrias como lubricante y que hoy en día se utiliza para la generación de biodiesel, debido a sus propiedades, y al mismo tiempo no representa ningún perjuicio alimenticio para la humanidad (Arias, 2014).

Biodiesel

El uso indiscriminado de combustibles fósiles ha derivado a la crisis que atraviesa el sector energético mundial, razón por la cual, en los años 70 se propuso el uso de biocombustibles (Reijnders & Huijbregts, 2009). Estos combustibles poseen varias ventajas, como lo son el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y la reducción de las emisiones netas de CO₂, CO, NO_x y SO₂ (Retana, 2008). Los biocombustibles pueden clasificarse en tres generaciones de acuerdo con el origen de su materia prima: en la primera generación están incluidos los cultivos comestibles como azúcares, granos y semillas como el

maíz, soya, palma y girasol (Selaimia, Beghiel & Oumeddour, 2015). La segunda generación comprende a los cultivos no comestibles como *Jatropha*, *neem* y *karanja* (Selaimia et al., 2015). La tercera generación agrupa a las algas y bacterias fotosintéticas (Abideen et al., 2014).

La producción de biodiesel a partir de oleaginosas no comestibles ha sido causa de numerosos estudios, debido al alto costo y demanda de aceites comestibles, optando por especies de rápido crecimiento y altos rendimientos de aceite (Guevara-Fefer, Sánchez-Ramos, De-Jesús-Romero, & Niño-García, 2016). 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).

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 oleico y linoleico, 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). La adecuada fluidez del biocombustible en motores de combustión interna está directamente relacionado con valores bajos de viscosidad y densidad (Ramos et al., 2009). Además, se debe tomar en cuenta que, proporciones muy altas de ésteres de ácidos grasos saturados provocarían la solidificación del biodiesel en climas fríos (Guevara-Fefer et al., 2016).

Jatropha curcas

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; cabe mencionar, que el aceite de *Jatropha curcas* del Ecuador, posee tan solo el 1,26% de ácidos grasos libres (Balat, 2011)(Armando, Alvear, & Álvarez, 2010) (Falasca & Ulberich, 2008).

Son varias las aplicaciones en las que puede utilizarse la planta *Jatropha curcas*, como puede ser la siembra en forma de barreras naturales y tomada desde una perspectiva de desarrollo, la obtención del aceite de *Jatropha curcas* no requiere de altas inversiones ni tecnología avanzada para su obtención (Lau, 2017).

En Ecuador la planta *Jatropha curcas* ha sido partícipe de diversos proyectos en la provincia de Santa Elena, Manabí, Imbabura, Loja y Santo Domingo de los Tsáchilas, pero no es hasta el año 2009, cuando se empezó a utilizar esta planta como fuente para la producción de Biodiesel (Muñoz, 2009).

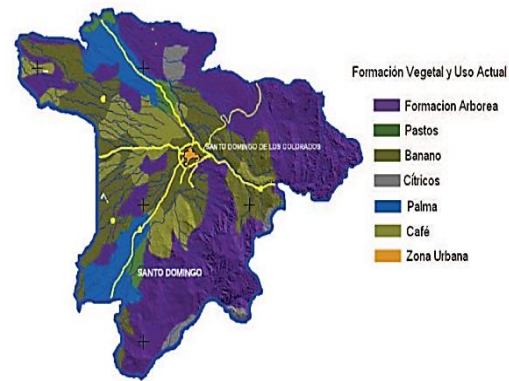


Figura 2. Uso actual del suelo en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas- Consejo Provincial de Pichincha 2010.

En la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas como se indica en la Figura 2, la formación arbórea representa el 20,4% del suelo actual, mientras que el 22.2% que representan 144.143 ha, son cultivos de ciclo corto o permanente. La superficie destinada a pastos alcanza 373.180 ha, equivalentes al 57.4% de terreno restante (Sánchez, 2009).

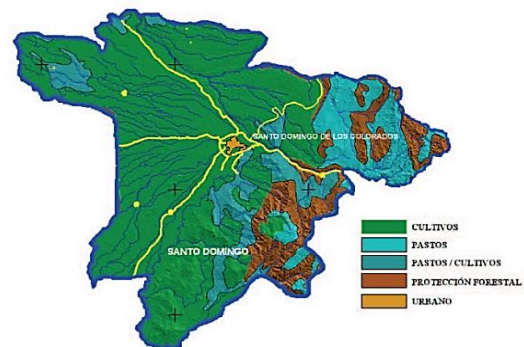


Figura 3. Uso potencial del suelo de la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas- Consejo Provincial de Pichincha 2010

Como se muestra en la Figura 3, la provincia en su mayoría presenta suelos cultivables. Estos están ubicados principalmente en la zona baja en las vías a la costa. La provincia cuenta con varios drenajes con diferentes caudales y longitudes. La parte norte se encuentra en la cuenca del río Esmeraldas, mientras que la parte sur se encuentra en la cuenca alta del río Daule, la cual se forma principalmente de los ríos Baba, Otongo, Bimbe y Salanga (Sánchez, 2009).

Catalizadores

La transesterificación puede llevarse a cabo tanto con catalizadores homogéneos como heterogéneos. Comúnmente en la producción de biodiesel se utilizan catalizadores homogéneos básicos como hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH). Al usar KOH en comparación con el NaOH, el resultado es que la glicerina generada del proceso es menos tóxica, lo que ha permitido el uso de este subproducto para producir fertilizantes artificiales (Cabello et al., 2016).

Otra opción es el uso de catalizadores heterogéneos que tienen diversas ventajas como son: su capacidad de ser reutilizables, favorecen a su fácil separación del producto y presentan la posibilidad de llevar a cabo simultáneamente las

reacciones de esterificación y transesterificación, pero en ciertas ocasiones tienen el inconveniente de una limitada difusión de los reactantes a la superficie del catalizador (Cabello, Rincón, & Zepeda, 2016). Los catalizadores básicos heterogéneos que se han generado para la producción de biodiesel en la actualidad son las zeolitas básicas y óxidos de metales alcalinotérreos, siendo el óxido de calcio (CaO) uno de los más usados en la industria, debido a su baja solubilidad en metanol y su elevada basicidad; además, este puede ser conseguido mediante la calcinación de piedra caliza e hidróxido de calcio (Cabello et al., 2016).

Tabla 1. Catalizadores utilizados en la producción de biodiesel

Tipos de catalizadores	Ejemplo de catalizadores
Ácidos homogéneos	H ₂ SO ₄ , HCl y H ₃ PO ₄
Ácidos heterogéneos	Zeolitas, resinas sulfónicas, SO ₄ /ZrO ₂ , TiO ₂ catalizadores a base de carbono
Básicos homogéneos	KOH y NaOH
Básicos heterogéneos	MgO, CaO y Na /NaOH /Al ₂ O ₃
Enzimáticos	Lipasas, Candida, Penicillium y Pseudo- monas

Fuente: Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel (Cabello et al., 2016).

En el trabajo de simulación se ha utilizado un catalizador homogéneo básico (NaOH) y uno heterogéneo (ZrO_2), en la Tabla 1, se muestran diferentes catalizadores utilizados para la obtención de biodiesel dependiendo su clasificación

Reacción de transesterificación

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 (Ismaiel, Hamid, & Wagialla, 2017).

La reacción que se presenta en la Figura 4, 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, oleico y linoleico (Ismaiel et al., 2017).

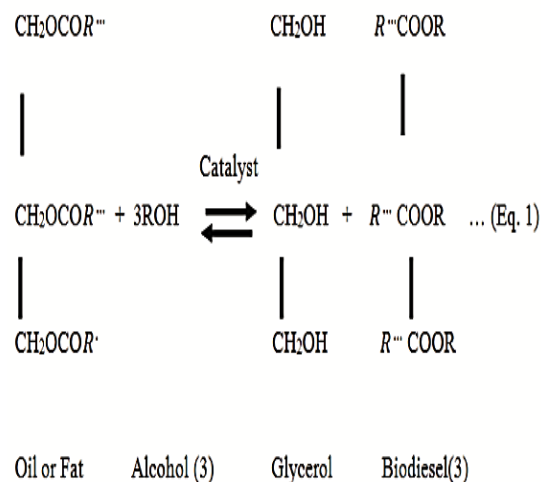


Figura 4. Reacción de transesterificación de ácidos grasos- Simulation of *Jatropha* Biodiesel using SuperPro Designer (Ismaiel et al., 2017).

Metodología

Las Figuras 5 y 6, 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 Figura 6, 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 figura 4, 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) (Ismail et al., 2017).

Como se observa en la Figura 4, 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).

El alcohol que es usado con frecuencia en la obtención de biodiesel, pese a su toxicidad, es el metanol; debido a su bajo costo, su fácil recuperación y menor inflamabilidad en comparación con el

etanol (Gil, 2017). La reacción de transesterificación puede llevarse a cabo a diferentes temperaturas; sin embargo, en el caso de aceite con metanol (3:1) al 1% w/w de NaOH se han apreciado conversiones del 85 al 90 % a temperatura de 60 °C (Freedman, Pryde, & Mounts, 1984).

La intensidad del mezclado es una de las variables a considerar en el inicio de la reacción, pues al alimentar los compuestos al reactor se crean sistemas de dos fases líquidas inmiscibles entre el aceite y la solución alcohol/ catalizador (Barnwal, Sharma, Barnwal, & Sharma, 1997). Posterior a la entrada del reactor no se requiere una agitación fuerte y sostenida, se han evidenciado elevados rendimientos con velocidades de agitación entre 360 y 600 rpm (Albis, Parra, & Sánchez, 2005), debido a que superadas las 360 rpm se excede el valor mínimo del número de Reynolds de 10.000, asegurando que la transferencia de masa de los reactantes y productos no limite la velocidad de reacción (Meher, Vidya Sagar, & Naik, 2004).

Resultados y análisis

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, con exclusión de la Tripalmitina, Triestearina, Trilinoleína y Trioleína, para lo cual se utilizó el Método de contribución de grupos

para determinar sus propiedades físicas (E. N. Fierro, Faúndez, & Valderrama, 2016), creándose un compuesto de mezcla en el software.

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).; sin embargo, estos valores pueden variar en función de la materia prima del cual se obtendrá el biodiesel. En el proceso de la Figura 4, 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).

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.

Proceso de obtención de Biodiesel de la empresa

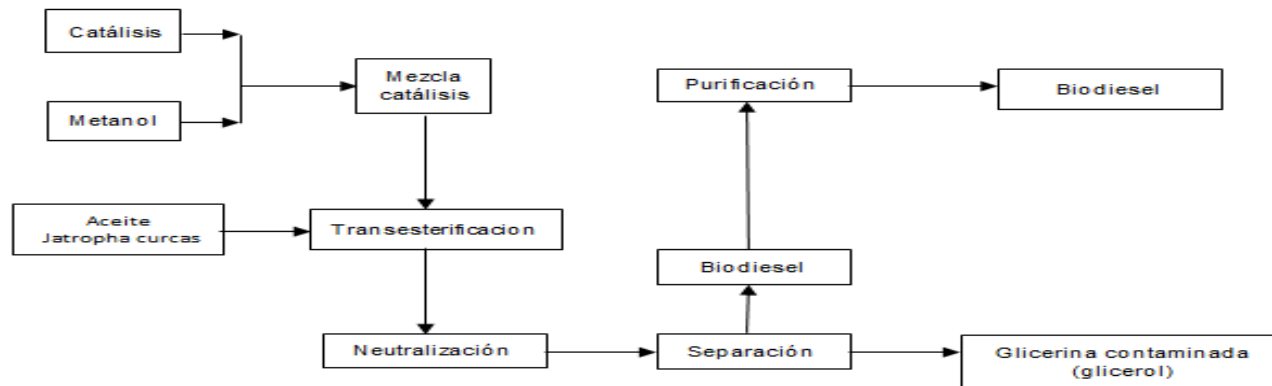


Figura 5. Esquema de producción de biodiesel de la planta piloto

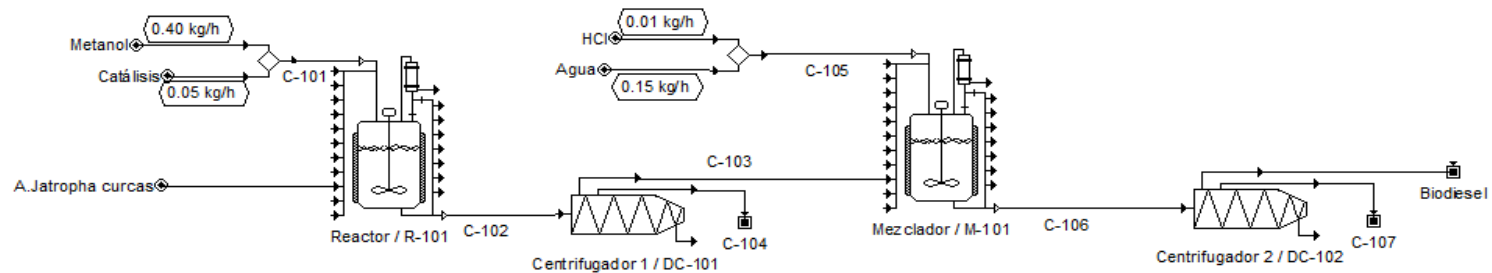


Figura 6. Diagrama de producción de biodiesel- planta piloto ecuatoriana con SuperPro Designer v.9.5

Tabla 2. 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 <i>Jatropha curcas</i>	Aceite <i>Jatropha curcas</i>	4,00
Centrifugador 2/ DC-102		
C-102	Biodiesel	3,8000
	Glicerol	0,4038
	Aceite <i>Jatropha curcas</i>	0,1171
	Metóxido de sodio	0,0125
	Agua	0,0160
C-103	Biodiesel	3,8100
	Aceite <i>Jatropha curcas</i>	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 <i>Jatropha curcas</i>	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

Cabe mencionar que ese porcentaje de conversión del producto se conseguía sin contar con un adecuado proceso de abastecimiento ni registros de las materias primas en la entrada de los procesos.

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 2.

Propuesta de escalamiento de 10 MM de L/año

Al analizar la situación actual del país y ante el requerimiento del cambio de la matriz energética, se dispuso a diseñar mediante simulación, una planta de mayor capacidad, cuya ubicación podría ser en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, aprovechando las diferentes facilidades que brinda el tipo de suelo para el cultivo de la planta *Jatropha curcas*.

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 (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 3; además del criterio del diagrama propuesto en el 26º Simposio Europeo de Ingeniería de Procesos Asistida por Computadora (inclusión de un segundo reactor y torre de destilación para el tratamiento de glicerina) (Nakem et al., 2016), para la obtención de biodiesel; así como, la inclusión de un proceso para el tratamiento de la glicerina producida utilizando el software.

Tabla 3. 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 Figuras 7 y 8, 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.

La corriente de metanol ingresa al tanque TNK-101. A la salida del mismo se forma la corriente C-101, la cual se mezcla con el producto de la catálisis formando la corriente C-102, y que mediante un divisor de flujo se divide en las corrientes C-103 y C-104, que alimentan a los reactores R-101 y R-102; respectivamente.

Las corrientes a la salida de los reactores (C-105 y C-109) ingresan a las centrifugadoras DC-101 y DC-102, para separar el biodiesel del glicerol. La corriente C-106 a la salida del centrifugador DC-101, ingresa al intercambiador de calor HX-101 para adecuar la temperatura apropiada para la reacción de transesterificación.

La corriente C-110 a la salida de la centrifugadora DC-102, junto con la corriente C-112 (agua y HCl) ingresan al mezclador M-101, para neutralizar la catálisis y evitar la formación de jabón; la corriente C-113 a la salida del mezclador entra en la centrifugadora DC-103, del cual sale la corriente C-114 y que ingresa al destilador flash/ V-101, obteniendo vapor por el tope y biodiesel por el fondo de la columna.

Las corrientes a la salida de las centrifugadoras DC-101, DC-102 y DC-103 y una corriente de HCl serán la alimentación del mezclador M-201. La corriente C-117 a la salida de este último mezclador, ingresa a la centrifugadora DC-201 aislando el agua de la glicerina; la corriente C-

118 junto a una corriente de NaOH, conforman la alimentación del mezclador M-202. La corriente C-121 producto del mezclador M-202 ingresa a la torre de destilación T-201 con el objetivo de separar las fases de metanol y la corriente C-123 ingresa a la torre destilación T-202 separando el agua que serán reconectadas al proceso. Como resultado en el fondo de la destilación T-202 se obtiene la glicerina tratada para procesos industriales.

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*. En la estimación de la base de cálculo no se tomó en cuenta la reposición de las plantas, ya que éstas pueden producir durante 50 años (Cortésao, 1956).

Las variables de operación utilizadas en la simulación anterior de la Tabla 3., se tomaron como base para los reactores R-101 y R-102, el mezclador M-101 del proceso de neutralización y las tres centrifugadoras de la etapa de reacción y neutralización. 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. Al no utilizar un exceso de metanol sería indispensable colocar un intercambiador de calor posterior a la centrifugadora DC-101 pues la corriente C-106 mantiene una temperatura de 25°C y para obtener una adecuada velocidad de reacción según estudios realizados en India, la corriente debe tener una temperatura de 60 °C (Sastry, 2011). El intercambiador de calor empleado antes del proceso de la destilación flash, tiene como función el aumentar la temperatura de la corriente C-116 para que, por puntos de ebullición, la fase de vapor se separe de la de biodiesel. Como se observa en la Tabla 4, 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).

Tabla 4. Resultados del Destilador Flash/V-101

Corriente	Componentes	kg/h	% masa
Vapor	Biodiesel	0,0019	0,0022
	Glicerol	0,0963	0,1092
	Aceite <i>Jatropha curcas</i>	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 <i>Jatropha curcas</i>	6,0642	0,1399
	Metanol	0,3895	0,0090
	NaOCH ₃	0,1874	0,0043
	Agua	15,4422	0,0356

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 5., la corriente C-117 a la salida del mezclador M-201 tiene una cantidad de agua de 262,38 kg; por lo cual se realiza una decantación para separar la solución acuosa de glicerina (fase inferior) de los ácidos grasos crudos formados en la acidificación.

A continuación, se puede observar que en la corriente C-118 y C-119 posterior a la centrifugadora DC-201, la solución acuosa con respecto a la corriente C-117 disminuye a 168,0921 kg.

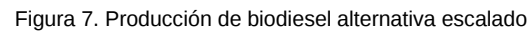


Tabla 5. Resultados de corrientes
Centrifugadora DC-201

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 - Elaboración propia

La corriente C-118 ingresa al mezclador M-202 donde luego es neutralizada con NaOH 1N (Carvajal-osorio et al., 2010). La glicerina es sometida a calentamiento, mediante un intercambiador de calor a una

temperatura de 100°C para concentrar la solución eliminando algunas impurezas (Carvajal-osorio et al., 2010).

Para la operación de las columnas de destilación se adoptaron las características de trabajo propuestas por Zapata et. al (2007); en el ejemplo del software con respecto a la extracción de biodiesel a partir de soja, tomándose como referencia que no se debe sobrepasar la temperatura de degradación del glicerol de 204,44°C (Zapata, Martínez, Arenas, & Henao, 2007).

Tabla 6. 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 - Elaboración propia

Los resultados obtenidos del destilador T-201 en la Tabla 6, muestran que la corriente de tope contiene un 99,7% de metanol el cual será reconectado al tanque TNK-101. Como se indica en la Tabla 7, en la corriente C-123 a la salida de la torre de destilación T-201, se obtienen 380,8945 kg de glicerol, correspondiente al 65,31%.

La corriente C-123 alimenta a la torre de destilación T-202, y en la Tabla 7 se puede observar que la corriente C-124 a la salida de la torre de destilación T-202 contiene 150,8408

kg de agua, la cual será reconectada al mezclador M-101 en la etapa de reacción. A la salida de la torre destilación T-202 por su parte inferior se detalla que la corriente C-126 contiene 380,85643 kg de glicerol equivalente a 88,1037%, materia prima resultante del proceso de purificación de glicerina.

Tabla 7. Corrientes Destilador T-202

Destilador 2			
Corriente	Componentes	Flujo (kg)	%
C-123	Biodiesel	1,2419	0,2130
	Glicerol	380,8945	65,3154
	Aceite Jatropha curcas	25,7113	4,4090
	Metanol	0,0007	0,0001
	Cloruro de sodio	10,6159	1,8204
	Hidróxido de sodio	0,2031	0,0348
	Agua	164,4938	28,2073
C-124	Glicerol	0,0380	0,0252
	Metanol	0,0007	0,0005
	Agua	150,8408	99,9743
C-126	Biodiesel	1,2419	0,2873
	Glicerol	380,8564	88,1037
	Aceite Jatropha curcas	25,7113	5,9478
	Metanol	0	0
	Cloruro de sodio	10,6159	2,4558
	Hidróxido de sodio	0,2031	0,0470
	Agua	13,6529	3,1584

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Con respecto a las variables de operación utilizadas en la propuesta de escalado de la Tabla 3, 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.

Análisis económico

El software SuperPro Designer V.9.5 contiene dentro de su paquete operativo herramientas que permiten realizar costeo de los equipos principales en función de las alimentaciones a los distintos procesos, los precios de la base de datos del programa son del año 2018. Los costos directos e indirectos se calcularon en base a un porcentaje del precio total de planta como se indica en la Tabla 8.

Tabla 8. Porcentajes utilizados costos directos e indirectos.

Costos Directos (CD)	
Tuberías	35 %
Instrumentación	40%
Aislamientos	3%
Facilidades eléctricas	10%
Construcciones	45%
Mejorar a la población	15%
Facilidades auxiliares	40%
Costos Indirectos (CI)	
Ingeniería	25%
Construcción	35%

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Se determinaron los costos de los materiales utilizados en base a bibliografía y estudios de mercadeo en Ecuador, como se observa en la Tabla 9 (Arias, 2014). En las Tablas 10, 11 y 12 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 que se encuentran en la Tabla 8, así como el precio que se consideró por la tarifa de contratistas y de contingencia.

Tabla 9. Precios compuestos y facilidades auxiliares utilizados para propuesta de escalado

Precio compuestos utilizados	\$/kg
Biodiesel	2,9500
Ácido clorhídrico (HCl)	0,3778
Aceite <i>Jatropha curcas</i>	0,5300
Metanol	0,2868
Metóxido de sodio NaOCH ₃	0,8000
Hidróxido de sodio	0,5170
Mejoras a la población	0,1500
Facilidades auxiliares	0,4000

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Tabla 10. 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

o de enfriamiento (Vapor alta presión y agua).

Tabla 11. 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

Tabla 12. 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 m2		
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 m2		
		Equipos no listados		1134000
			TOTAL	5651000

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Cálculo TIR/VAN

Como se observa en la Tabla 13, ante una tasa de descuento del 7,41 % (BCE Banco Central Ecuador, 2018), una inversión de \$152.206.000

resultado de la suma del capital invertido y los costos operacionales de la Tabla 10., y un PVP (precio valor al público) de \$2,95/kg de biodiesel (Tabla 8 Precios compuestos utilizados para propuesta de escalado), se obtiene un TIR (tasa interna de retorno) de 14,28% y un VAN (valor actual neto) de \$54.969.655,46.

Tabla 13. Cálculo TIR y VAN

Nombre del proyecto a Evaluar		Planta propuesta escalamiento 7,41%
Tasa de descuento		
Período (años)	Flujo de Fondos	
0	152.206.000	152.206.000
1	\$29.500.000	-\$122.706.000
2	\$29.500.000	-\$93.206.000
3	\$29.500.000	-\$63.706.000
4	\$29.500.000	-\$34.206.000
5	\$29.500.000	-\$4.706.000
6	\$29.500.000	\$24.794.000
7	\$29.500.000	\$54.294.000
8	\$29.500.000	\$83.794.000
9	\$29.500.000	\$113.294.000
10	\$29.500.000	\$142.794.000
TIR		14,28%
VAN		\$54.969.655,46

Fuente: Elaboración propia

Discusión

En base al objetivo del gobierno de Ecuador de realizar cambios en la matriz energética, necesitando para ello 40 MM de litros de biodiesel

(37.415.431,9 kg biodiesel) y a la información obtenida por el Honorable Consejo Provincial de Santo Domingo de los Tsáchilas del año 2009, se determinó que las características de suelo y agua apoyan la factibilidad de la propuesta de escalado para la producción de biodiesel. La capacidad de la planta a instalarse es de 10 MM de litros al año, cumpliendo en un 25% el objetivo planteado en un principio para el cambio de la matriz energética.

Este trabajo permitió identificar las principales variables de operación Tabla 3, que afectan el sistema de producción de biodiesel mediante estudios realizados durante la última década como se observa en la Tabla 3.

Una de las variables de gran importancia a considerarse previo la instauración de una planta de biodiesel es la cantidad de ácidos grasos libres (AGL) que contiene el aceite a ser utilizado; si el aceite, con el cual se va a trabajar posee un contenido de ácidos grasos libres (AGL) del 3-30% o incluso mayor en su composición, es de importancia convertir estos en biodiesel o el rendimiento será bajo (García, 2007).

En caso de que el contenido de los AGL se encuentre entre 3 – 30%, sería necesario incluir un pre-tratamiento con un catalizador ácido (H₂SO₄), en un reactor discontinuo de tanque agitado, en el que se llevaría

a cabo la reacción de esterificación para convertir los ácidos grasos libres que se encuentran en el aceite, utilizando como reactivo alcohólico el metanol (García, 2007). Luego de este proceso la corriente deberá ingresar a una centrifugadora de la cual saldrán dos corrientes:

- El aceite pre tratado con índice de acidez apto para iniciar el proceso de transesterificación (García, 2007).
- Una corriente con trazas de los reactivos usados en menores proporciones, la cual puede ser tratada y reconectada a la corriente de metanol (García, 2007).

Sin embargo, la planta de escalado no cuenta con un proceso de pre-tratamiento debido el aceite de *Jatropha curcas* del Ecuador posee tan solo el 1,26 % de ácidos grasos libres como se mencionó anteriormente por tal motivo dicho proceso no fue considerado. (Elizalde & Rodriguez, 2009),

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. Existen varias opciones en el mercado; sin embargo, se comparó el resultado de la simulación de nuestra planta de escalado utilizando un catalizador heterogéneo como el óxido de zirconio (ZrO_2), manteniendo los valores de las variables de la Tabla 3., obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 14. 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 <i>Jatropha curcas</i>	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 <i>Jatropha curcas</i>	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 14,

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).

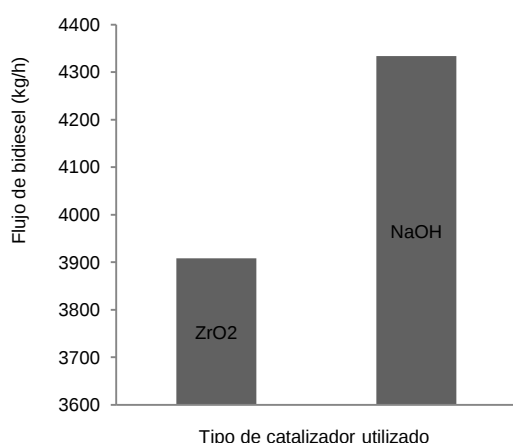


Figura 9. Producción de biodiesel respecto al tipo de catalizador empleado para la transesterificación

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 Figura 9, se evidencia que por precio y rendimiento los catalizadores homogéneos como el NaOH superan a los heterogéneos.

Para la producción de biodiesel el NaOH puede ser utilizado en concentraciones de 0,4 a 2 % p/p de aceite (Gil, 2017).; sin embargo, al

utilizar una concentración del 2 % p/p se produjo un error en la simulación por restricciones del software, por lo cual el rango de operación se debe mantener entre 0,5 a 1 %, obteniendo el 91 % de conversión en base al 1 % p/p de catalizador como se observó en la Figura 10.

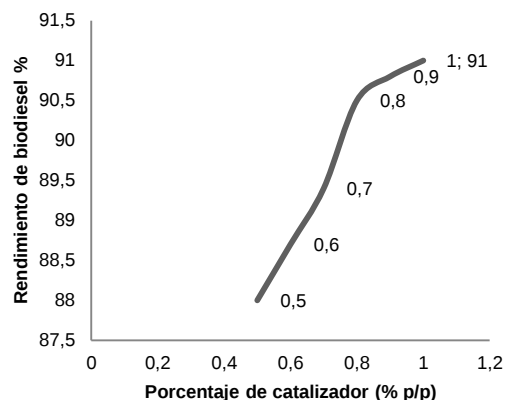


Figura 10. Rendimiento de biodiesel en función del porcentaje de catalizador utilizado (% p/p)

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 según estudios realizados en India (Sasthy, 2011).

Al cambiar la temperatura de reacción en ambos reactores, y manteniendo los demás parámetros constantes, la simulación produce un error que se debe a las restricciones que tiene el software, por lo cual el parámetro óptimo de operación puede manejarse dentro del rango de 60-65 °C, motivo por el cual se incorporaron

intercambiadores de calor en ciertas áreas de la simulación como la entrada a los reactores y destilador flash.

Por restricciones del software no se pudo trabajar con temperaturas superiores a 65° C sin que se produjesen errores en la simulación; sin embargo, en la figura 11 se puede apreciar como la temperatura tiene influencia sobre el rendimiento.

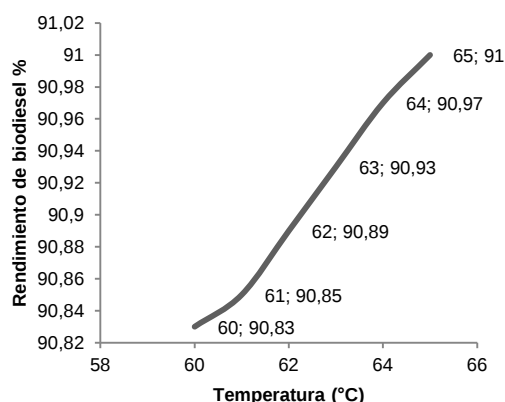


Figura 11. Rendimiento de biodiesel en función de la variación de la temperatura

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.

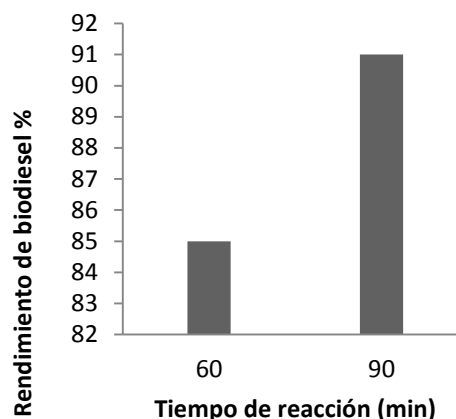


Figura 12. Rendimiento de biodiesel en función del tiempo de reacción

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 Figura 12, determinándose el valor 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.

Las cantidades de materia prima utilizadas en la planta piloto ecuatoriana la cual contiene solo el 1,26% de ácidos grasos libres como se observa en la Tabla 15., sirvieron como antecedente para poder realizar la propuesta de escalado; con lo cual, para obtener una producción de 10 MM de litros biodiesel se debe realizar una escala de 1:10000, manteniendo el tiempo de operación de 9 horas/ día durante 240 días/año, que es utilizado en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

Tabla 15. Cantidades utilizadas de materia prima planta piloto ecuatoriana – planta de escalado

Planta piloto ecuatoriana		Planta de escalado	
Entradas	Cantidad (kg/ h)	Entradas	Cantidad (kg/h)
Metanol	0,04	Metanol	419,29
Producto de catálisis	0,05	Producto de catálisis	53,07
Aceite <i>Jatropha curcas</i>	0,44	Aceite <i>Jatropha curcas</i>	4286,42
Escala	1:1	Escala	1:10000

Fuente: SuperPro Designer v9.5 - Elaboración propia

Como se observó en la Tabla 13., con una tasa interna de retorno del 14,28% y un VAN de \$54.969.655,46, se aprecia que a partir del sexto año se empieza obtener ganancias, con lo cual se determina que el proyecto es viable utilizando el aceite de *Jatropha curcas* como materia prima.

La puesta en marcha de proyectos como este o similares, enfocados a la producción a gran escala de biocombustibles, y sus mezclas con combustibles fósiles para su uso en motores de combustión interna, representa una propuesta amigable con el ambiente, encontrando allí su aporte a la gestión ambiental, en la disminución de gases de combustión y la eliminación de compuestos nocivos (CO, Hidrocarburos HC, Óxidos de nitrógeno, Plomo y compuestos de plomo Pb, cenizas volantes) (Benito, 2016). Como se observa en la Tabla 16, ya sea usando biodiesel B-100 o B-20 se evidencia que existe una disminución significativa de las emisiones gaseosas con respecto a los combustibles fósiles, con lo cual se estaría ejecutando las medidas propuestas en la COP 21, en donde se concluyó que se deben reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Naciones Unidas, 2015).

Tabla 16. Porcentaje de emisiones medias del Biodiesel comparadas al Diésel convencional

Tipo de emisión	% B-100 (sin corte)	% B-20 (corte al 20 %)
Hidrocarburos totales sin quemar (HC)	-68	-14
Monóxido de carbono (CO)	-44	-9
Partículas en suspensión (PM)	-40	-8
Sulfatos	-100	-20
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	-80	-13
Hidrocarburos aromáticos policíclicos nitrogenados (nPAH)	-90	-50
Potencial de destrucción de la capa de ozono	-50	-10
Óxidos de nitrógeno (NOx)	+6	+1

Fuente: BDI- BioEnergy International AG

Con respecto al Ecuador, el desarrollo agrícola es una de las ventajas que presenta el biodiesel, ya que permitirá generar fuentes de empleo en el sector (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2007); además el 75 % del precio del aceite vegetal de piñón es retribuido directamente al productor, mientras que en el biodiesel de palma es solo del 17,43 % (D. Fierro, 2014).

La especie *Jatropha curcas* no pugna con tierras designadas a cultivos de soberanía alimentaria; asimismo el biodiesel obtenido de esta especie tiene características ambientalmente más amigable que el biodiesel proveniente de palma, debido a que restaura el suelo y no lo degrada, requiere menos cantidad de agua y no requiere agroquímicos de origen fósil (D. Fierro, 2014).

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).

Conclusiones

1. Dentro del análisis realizado a los procesos y procedimientos de la planta piloto ecuatoriana, se encontró que existe un déficit en la implementación de procesos de producción y de registros adecuados, estos dos puntos constituyen las oportunidades de mejora. Aplicando el software SuperPro Designer V.9.5 se encuentra que implementando las oportunidades de mejora detectadas se puede incrementar la eficiencia del 85% al 91% en la planta piloto ecuatoriana.
2. A partir de las oportunidades de mejora, se concluye que con el diseño propuesto, el tipo de suelo y espacio disponible de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, junto con el uso 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*.

3. 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.

4. Con la implementación del tratamiento de purificación de los fluidos que salen de las centrifugadoras del área de reacción (DC 101,102,103), se lograría una separación del glicerol, del metanol y del agua; los cuales, podrían volver a utilizarse mediante una recirculación al proceso. Con la separación mencionada se obtendría 2.011.975,2 kg/año de glicerina, el cual representa el 9,08% del valor total de la materia prima que ingresa al proceso; este subproducto podría ser utilizado en otros procesos.

Referencias

- Abideen, Z., Koyro, H.-W., Huchzermeyer, B., Ahmed, M. Z., Gul, B., & Khan, M. A. (2014). Moderate salinity stimulates growth and photosynthesis of *Phragmites karka* by water relations and tissue specific ion regulation. *Environmental and Experimental Botany*, 105, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.04.009>
- Albis, A., Parra, J., & Sánchez, F. (2005). Transesterificación de aceite de palma con metanol por catálisis heterogénea. *Ingeniería E Investigación*, 25, 71–77.
- Alcúe, B. K. (2013). Experiencias exitosas en Bioeconomía, 84. Retrieved from [http://legacy.iica.int/Esp/regiones/andina/Ecuador/Documentos de la Oficina/experiencias_exitosas_bioeconomia_iica_2013.pdf](http://legacy.iica.int/Esp/regiones/andina/Ecuador/Documentos%20de%20la%20Oficina/experiencias_exitosas_bioeconomia_iica_2013.pdf)
- 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/CD-5833.pdf>
- 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%20Inversi%C3%B3n%20para%20la%20elaboraci%C3%B3n%20y%20comercializaci%C3%B3n%20de%20Biodiesel%20a%20partir%20de%20la%20planta%20Jatropha%20Curcas%20en%20el%20Ecuador.pdf)
- 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.ENCONMA.2010.08.013>
- Barnwal, B. K., Sharma, M. P., Barnwal, B. K., & Sharma, M. P. (1997). *Renewable & sustainable energy reviews. Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 9). Elsevier Science. Retrieved from https://econpapers.repec.org/article/eeeerens/v_3a9_3ay_3a2005_3ai_3a4_3ap_3a363-378.htm
- BCE Banco Central Ecuador. (2018). Tasa de interés activa y pasiva. Retrieved February 25, 2018, from <https://www.bce.fin.ec/index.php/indicadores-economicos>
- 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)
- Cabello, C., Rincón, S., & Zepeda, A. (2016a). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad*, 74(March), 51–59.
- 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>
- 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*, 35(2), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.07.012>
- 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>
- Cortés, M. (1956). Culturas tropicais: plantas oleaginosas. *Lisboa: Clássica*, 231.
- 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/Archivos/Adjuntos/Petrotecnia/2007-2/Biocombustible.pdf>
- David Zapata, C., Darío Martínez, I., Arenas Castiblanco, E., & Andrés Henao Uribe, C. (2007). PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE CRUDO DE PALMA: 1. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE DOS PROCESOS CONTINUOS BIODIESEL PRODUCTION FROM CRUDE PALM OIL: 1. DESIGN AND SIMULATION OF TWO CONTINUOUS PROCESSES, 151, 71–82. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n151/a08v74n151.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
- Elizalde, P. X., & Rodríguez, B. L. (2009). DISEÑO PRELIMINAR DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE *Jatropha curcas* EN LA REGIÓN SUR DEL ECUADOR.
- eXtension. (2015). Reactors for Biodiesel Production. Retrieved from <http://articles.extension.org/pages/26630/reactors-for-biodiesel-production>
- 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.
- FAO. (2015). Conferencia Mundial del sector palma africana. Retrieved from [http://www.iuf.org/w/sites/default/files/Palma africana - Documento informativo.pdf](http://www.iuf.org/w/sites/default/files/Palma%20africana%20Documento%20informativo.pdf)
- Fierro, D. (2014). Producción de Aceite de Piñón para Plan Piloto de Generación Eléctrica en Galápagos, 29. Retrieved from <http://slideplayer.es/slide/3383632/>
- Fierro, E. N., Faúndez, C. A., & Valderrama, J. O. (2016). Método de Contribución de Grupos: una Herramienta Fundamental en cursos Avanzados de Termodinámica y Física de Fluidos para la Estimación

- de Propiedades de Sustancias. *Formación Universitaria*, 9(3), 99–108. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062016000300011>
- Freedman, B., Pryde, E. H., & Mounts, T. L. (1984). Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión catálisis química. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 61(10), 1638–1643. <https://doi.org/10.1007/BF02541649>
- Fresnedo-Ramírez, J., & Orozco-Ramírez, Q. (2013). *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=
- Gala, P. R., & Prado, Y. P. (2012). Biodiesel argentino: sustentabilidad en tensión. Retrieved from http://revistaoficio.org/wp-content/uploads/2016/09/Biodiesel-argentino-sustentabilidad-en-tension_Gala-Romina_Prado-Patricia.pdf
- 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
- García, M. de los M. (2007). Diseño de una instalación de pretratamiento de aceites con alto contenido en ácidos grasos libres para producción de biodiesel, 367. Retrieved from <http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6570/33727429.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>
- Guevara-Fefer, P., Sánchez-Ramos, G., De-Jesús-Romero, Y. A., & Niño-García, N. (2016). *Jatropha sotoi-nunyezii* y *Jatropha curcas*, especies de Tamaulipas: una comparación desde la perspectiva de los biocombustibles. *CienciaUAT*, 11(1), 91. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v11i1.769>
- Gupta, A. K., & Sastry, S. V. A. R. (2016). Developing the rate–equation for biodiesel production reaction." *Advances in Energy Research*, 127–133.
- HLPE, & FAO. (2013). Los biocombustibles y la seguridad alimentaria. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial, 157.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, 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>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2007). Proyecto Piñón para Galápagos. Retrieved from http://legacy.iica.int/Esp/regiones/andina/Ecuador/Paginas/proyecto_piñ

- Ismail, M., Hamid, M., & Wagialla, K. M. (2017). Simulation of Jatropha Biodiesel production using SuperPro Designer, 2(March).
- Lau, R. Pa. (2017). CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE Jatropha curcas PARA LA ELABORACIÓN DE BIODIESEL EN GUATEMALA, 166. Retrieved from <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisortiz/2017/06/15/Lau-Raisa.pdf>
- 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.
- Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. (2004). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review, 21. Retrieved from <http://www.eprint.iitd.ac.in/bitstream/2074/1497/1/mehertec2006.pdf>
- Muñoz, M. A. (2009). Caracterización Morfométrica de cuatro ecotipos de piñón (Jatropha curcas), asociado con teca (Tectona grandis), 117. Retrieved from <https://www.dspace.espol.edu.ec/retieve/90881/D-65722.pdf>
- Naciones Unidas. (2015). Convenio Marco sobre el Cambio Climático. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>
- Nakem, S., Pipatanatornkul, J., Papong, S., Rodcharoen, T., Nithitanakul, M., & Malakul, P. (2016). 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 38). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63428-3.50286-1>
- Paredes, V. (2015). Estado del desarrollo de biocombustibles en el Ecuador. Retrieved from <http://www.olade.org/wp-content/uploads/2015/06/3-VICTOR-PAREDES-ESTADO-DEL-DESARROLLO-DE-BIOCOMBUSTIBLES-EN-EL-ECUADOR-.pdf>
- ProEcuador. (2013). Biocombustibles. *ProEcuador. (2013). Biocombustibles, 1–26., 1–26.*
- 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>
- Reijnders, L., & Huijbregts, M. A. J. (2009). *Biofuels for road transport: a seed to wheel perspective*. Springer.
- 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
- 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>
- Sánchez, R. (2009). ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
Y AMBIENTAL DIAGNÓSTICO Y
RECOMENDACIÓN DE POLÍTICAS
TÉCNICAS AMBIENTALES PARA
EL CONSEJO PROVINCIAL DE
SANTO DOMINGO DE LOS
TSÁCHILAS TABLA DE
CONTENIDO, 156. Retrieved from
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1148/1/CD-2623.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

Sastry, S. V. A. R., & Ramachandramurthy, C. V. (2011). Fuzzy logic application in process modeling of biodiesel reactor. *Elixir Chem. Engg*, 38, 4335–4338.

Selaimia, R., Beghiel, A., & Oumeddour, R. (2015). The Synthesis of Biodiesel from Vegetable Oil. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 1633–1638. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2015.06.221>

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>

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>

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=10&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwicwN6BxOnOAhXPaCYKHXYCsKQFghVMak&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F2082917.pdf&usg=AFQjCNEpNcC0rrH-HjLY9YMQyKqTbP_FTQ&sig2=loh6HfiZd

WWF, Ecofys, & OMA. (2011). El informe de la energía renovable 100% (p. 7).