

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

TEMA:

**DISEÑO IN SILICO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE PALMA AFRICANA
(*Elaeis guineensis*) EN EL CANTÓN SHUSHUFINDI,
PROVINCIA DE SUCUMBÍOS**

AUTORES:

**JACQUELINE ALEXANDRA PINTO ROMERO
BAYRON JAVIER TACURI FAREZ**

DIRECTOR:

MSC. PAÚL MARCELO MANOBANDA PINTO

PUYO - ECUADOR

2019-2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Jacqueline Alexandra Pinto Romero con C.I: 0605412907 y Bayron Javier Tacuri Farez con C.I: 1400519144, certificamos que los criterios y opiniones que constan en el Proyecto de Investigación bajo el tema: **“DISEÑO IN SILICO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis*) EN EL CANTÓN SHUSHUFINDI, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS”**, son de nuestra autoría y exclusiva responsabilidad.

Jacqueline Alexandra Pinto Romero
C.I: 0605412907

Bayron Javier Tacuri Farez
C.I: 1400519144

CERTIFICADO DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACION

Por medio del presente, Yo, Paul Marcelo Manobanda Pinto, con C.I: 1803229499 certifico que los egresados Jacqueline Alexandra Pinto Romero y Bayron Javier Tacuri Farez, realizaron el Proyecto de Investigación titulado **“DISEÑO IN SILICO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis*) EN EL CANTÓN SHUSHUFINDI, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS”** previo a la obtención del título de ingeniero ambiental bajo mi supervisión.

MSc. Paul Marcelo Manobanda Pinto

DIRECTOR DEL PROYECTO

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El Proyecto de Investigación titulado “**DISEÑO IN SILICO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis*) EN EL CANTÓN SHUSHUFINDI, PROVINCIA DE SUCUMBÍOS**”, fue aprobado por los siguientes miembros del tribunal.

MSc. Angélica Tasambay
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Dr. Tunieski Gutiérrez
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

MSc. Alberto Vélez
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por llenar mi vida de bendiciones durante este largo y a veces difícil camino. Al Señor de la Misericordia por escucharme siempre y enseñarme que sus decisiones han sido mejores que las mías.

A Lida Romero mi madre, mi padre y mi amiga por una vida de esfuerzo y valentía brindándome su amor y su apoyo. Sé que nada hubiera sido posible sin ti. A Tania Karolina por ser mi confidente, mi compañera de travesuras, mi paño de lágrimas. Puedo estar al otro lado del mundo, pero mi corazón siempre estará en casa contigo.

A mi familia que estuvo presente en cada momento brindándome su apoyo y su confianza. Por todo lo que han hecho siempre por mí agradezco a mis tíos Miguel, Arnaldo, Violeta y Wilson, a mi abuelita Olivia y a mis primos Byron y Emily.

A la Universidad Estatal Amazónica por brindarme la oportunidad de crecer como persona y como profesional y de manera muy especial quiero expresar mis sinceros agradecimientos al MsC. Paul Manobanda por su excelente dirección. Su orientación, sus conocimientos y su paciencia han sido fundamentales para la culminación de este trabajo. Gracias por ser un gran profesor y un excelente ser humano.

A todas aquellas personas, compañeros, amigos y futuros colegas que me brindaron su amistad, su tiempo y sus conocimientos para el logro de mi objetivo. Hicieron de esta etapa, una parte de mi vida que nunca olvidaré.

Soy inmensamente feliz por haber alcanzado lo que tanto anhelaba, gracias por todo.

Jacqueline Pinto Romero

Expreso mi agradecimiento a la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Estatal Amazónica, por haberme forjado en sus aulas y brindarme cuantiosos conocimientos que serán la base fundamental durante mi vida profesional.

Quiero brindar mi más sincero agradecimiento al MsC. Paul Manobanda quien con esfuerzo y dedicación ha brindado todo su conocimiento para la culminación de este trabajo de titulación.

Bayron Tacuri

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Lida Noemí Romero Cortez la mujer que más admiro en esta vida y Tania Karolina Pinto Romero mi compañera del alma, quienes con su amor y paciencia me han ayudado a cumplir mi objetivo, gracias por ser las promotoras de mis sueños.

A Kelly Muñoz, Paola Merino y Edison Yáñez por su amistad sincera, por sus consejos honestos y por haber hecho de pequeños momentos grandes instantes. Gracias amigos por quererme, acompañarme y soportarme, aunque a veces fue difícil, pero precisamente por eso gracias. ¡Hicieron el papel de una verdadera familia!

A Kevin Gómez por acompañarme en muchos momentos de crisis y recaídas dándome la fuerza y los consejos para levantarme y seguir adelante. Gracias porque, aunque no siempre tuviste una solución para mis problemas te quedaste a mi lado y me apoyaste sin pedirme nada a cambio.

Jacqueline Pinto Romero

La presente tesis se la dedico a Dios, quien supo guiarme por el buen camino y darme las fuerzas para seguir adelante durante toda mi preparación académica.

A mis padres Carlos Tacuri y Esperanza Farez, por su apoyo incondicional y sus sabios consejos, que gracias a sus sacrificios he logrado culminar mi formación profesional, gracias por estar a mi lado siempre brindándome su cariño y

A mis hermanos Paul, Verónica, Carlos y Cristofer quienes son mi mayor motivación.

Bayron Tacuri

RESUMEN EJECUTIVO

Se realizó el diseño in silico de un proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) en el cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos, el diseño se llevó a cabo con el software *Superó Designer*. El método de obtención de biodiesel seleccionado es la transesterificación, por su bajo costo, mínimo tiempo de reacción y conversión directa. La tecnología utilizada para el proceso de producción de biodiesel consiste en 3 procesos: reacción, refinación y purificación, en los que se emplean como materias primas: HCl, agua, metanol, NaOCH_3 , aceite de palma e hidróxido de sodio. La sección de reacción el primer reactor tiene flujo másico resultante compuesto por 77% de diésel y 8% de glicerol con un residuo de 15 % de materia prima sin reaccionar. El segundo reactor tiene un flujo másico de 94,27 kg/h compuesta por el 98% de metanol y el 2% de NaOCH_3 y la segunda corriente entrada tiene un flujo másico de 5235,53 kg/h compuesta por 2% de metanol, 10% de aceite de palma, 86% de biodiesel y 2% de glicerina. En la sección de refinación de biodiesel el flujo másico resultante es de 6408,01kg/h compuesto por el 78% de diésel, el 19% de agua, el 1% de aceite de palma, el 1% de glicerina y el 1% de metanol. La sección de purificación del glicerol tiene una corriente resultante de flujo másico de 1967,03kg/h compuesto por el 56% de agua, el 23% de glicerina, el 20% de metanol y el 1% de NaCl.

Palabras clave: Biodiesel, transesterificación, aceite de palma, metanol, glicerol.

ABSTRACT

The silica design of a biodiesel production process from African palm oil (*Elaeis guineensis*) Shushufindi canton, Sucumbíos province was carried out, the design was carried out with the Superpro Designer software. The method of obtaining biodiesel selected is transesterification, due to its low cost, minimum reaction time and direct conversion. The technology used for the biodiesel production process consists of 3 processes: reaction, refining and purification, in which raw materials are used: HCl, water, methanol, NaOCH₃, palm oil and sodium hydroxide. The reaction section the first reactor has resulting mass flow consisting of 77% diesel and 8% glycerol with a residue of 15% unreacted raw material. The second reactor has a mass flow of 94.27 kg / h composed of 98% methanol and 2% of The second reactor has a mass flow of 94.27 kg / h composed of 98% methanol and 2% of NaOCH₃ and the second input stream has a mass flow of 5235.53 kg / h composed of 2% of methanol, 10% palm oil, 86% biodiesel and 2% glycerin and the second input stream has a mass flow of 5235.53 kg / h composed of 2% of methanol, 10% palm oil, 86% biodiesel and 2% glycerin. In the biodiesel refining section the resulting mass flow is 6408.01kg / h composed of 78% diesel, 19% water, 1% palm oil, 1% glycerin and 1% metanol. The glycerol purification section has a resulting mass flow current of 1967.03kg / h composed of 56% water, 23% glycerin, 20% methanol and 1% NaCl.

Keywords: Biodiesel, transesterification, palm oil, methanol, glycerol.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	VI
DEDICATORIA	VIII
RESUMEN EJECUTIVO	IX
ABSTRACT	X
INDICE DE TABLAS	XIII
INDICE DE ILUSTRACIONES	XIV
INDICE DE GRÁFICOS	XV
INDICE DE ECUACIONES	XVI
INDICE DE ANEXOS	XVII
CAPITULO I	18
INTRODUCCIÓN	18
1.1 Planteamiento del problema	20
1.2 Justificación	21
1.3 Objetivos	22
1.3.1 Objetivo general	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
CAPITULO II	23
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	23
2.1 Antecedentes	23
2.2 Bases teóricas	24
2.2.1 Diseño industrial de procesos	24
2.2.2 Modelación y Simulación	25
2.1.3 Combustibles fósiles	27
2.1.4 Biocombustibles	29
CAPITULO III	36
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	36
3.1 Localización	36
3.2 Tipo de investigación	36
3.2.1 Exploratoria-descriptivo e inferencial	36
3.2.2 Cuantitativa	37
3.3 Métodos de investigación	37

3.3.1 Análisis	37
3.3.2 Síntesis	37
3.3.3 Comparación	38
3.3.4 Método inductivo	38
3.3.5 Método deductivo.....	38
3.4 Técnicas	38
3.4.1 Norma técnica: Código ASME	38
3.4.2 Diseño de la investigación.....	39
3.4.3 Recursos humanos y materiales	40
CAPITULO IV	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1 Datos necesarios para el diseño de la propuesta	41
4.1.1 Situación del biodiesel	41
4.1.2 Disponibilidad de la materia prima	41
4.1.3 Descripción general del proceso de producción de biodiesel	46
4.1.3.1 Descripción del proceso de la sección de reacción.	46
4.1.4 Materia prima	51
4.1.5 Descripción de los equipos.....	52
4.1.6 Balance de masa y energía	63
4.1.7 Análisis de las condiciones de operación.....	67
4.2 DISCUSIÓN	75
CAPITULO V.....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1 Conclusiones	78
5.2 Recomendaciones	79
CAPITULO VI	80
6 BIBLIOGRAFIA	80
CAPITULO VII	88
7 ANEXOS	88

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros comparativos del Biodiesel y Diesel.....	30
Tabla 2 Recursos humanos necesarios para el proyecto de investigación.....	40
Tabla 3 Recursos materiales necesarios para el proyecto de investigación.....	40
Tabla 4 Composición de los ácidos grasos del aceite de palma	42
Tabla 5 Distribución de los bloques de producción de palma africana	43
Tabla 6 Condiciones para la producción de palma africana	45
Tabla 7. Materia prima para el proceso de producción.....	51
Tabla 8. Características de diseño de los tanques de almacenamiento.	53
Tabla 9. Características de diseño de los reactores agitados.	55
Tabla 10 Características de diseño de los recipientes de los recipientes de mezcla	56
Tabla 11. Características de diseño de los decantadores centrífugos.	57
Tabla 12. Características de diseño de los intercambiadores de calor.	58
Tabla 13. Condiciones de diseño de las bombas centrífugas.....	59
Tabla 14. Condiciones de diseño de las columnas de destilación.	60
Tabla 15. Características de diseño del tambor de flash.	62
Tabla 16. Condiciones de diseño de la caja genérica.	63
Tabla 17 Resumen de entradas y salidas de materia en la sección de reacción.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Tabla 18. Resumen de entradas y salidas de materia en la sección de refinación de biodiesel.	65
Tabla 19. Resumen de entradas y salidas de materia en la sección de purificación de glicerol.	66
Tabla 20. Condiciones de operación del tanque de almacenamiento.	68
Tabla 21. Condiciones de operación de los reactores.	69
Tabla 22. Condiciones de operación para el recipiente de mezcla.	70
Tabla 23. Condiciones de operación para el decantador centrífugo.	70
Tabla 24. Condiciones de operación para el intercambiador de calor.	71
Tabla 25 Condiciones de operación de las columnas de destilación	72
Tabla 26. Condiciones de operación para bombas.	73
Tabla 27. Condiciones de operación para el secador de vacío.	73

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Reacción de transesterificación.....	34
Ilustración 2. Diagrama de la sección reacción del proceso de producción.....	46
Ilustración 3. Diagrama de la sección de refinación del proceso de producción.....	47
Ilustración 4. Diagrama de la sección de refinación del proceso de producción.....	48
Ilustración 5. Esquema general del diseño in silico del proceso de producción de biodiesel.	50
Ilustración 6. Tanque de almacenamiento.....	53
Ilustración 7. Reactor agitado	54
Ilustración 8. Recipiente de mezcla	55
Ilustración 9. Decantador centrífugo	57
Ilustración 10. Intercambiador de calor	58
Ilustración 11. Bomba centrífuga	59
Ilustración 12. Columna de destilación.....	60
Ilustración 13. Tanque flash.....	61
Ilustración 14. Caja genérica	62

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Consumo energético mundial en el año 2018.....	28
Gráfico 2. Evolución de la producción energética mundial en los últimos 10 años	28
Gráfico 3 Evolución del consumo energético mundial por regiones	29
Gráfico 4 Emisiones de dióxido de carbono del diésel, biodiesel y mezclas	31
Gráfico 5 Capacidad de producción de las extractoras de la empresa DANEC	44
Gráfico 6 Resumen de las exportaciones de aceite crudo de palma por empresas hasta julio de 2019.....	44

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ecuación de estado Soave-Redlich–Kwong	74
Ecuación 2 Constante de corrección de la atracción potencial de las moléculas	74
Ecuación 3 Constante de corrección de la atracción potencial de las moléculas	74

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Propiedades de algunos aceites vegetales	89
ANEXO 2. Listado de los equipos	90
ANEXO 3. Componentes de entrada para el proceso de producción de biodiesel	92

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Las nuevas necesidades de la población exigen de la academia investigaciones enfocadas ya no en la búsqueda de adaptación sino de estrategias que permitan la obtención de productos y servicios sostenibles para garantizar la satisfacción de las necesidades de las presentes y futuras generaciones valorando la naturaleza y aprovechando las nuevas tecnologías que existen hoy en día.

Una de estas necesidades es la demanda energética que se ha incrementado en los últimos años debido al crecimiento poblacional y depende principalmente de los combustibles fósiles, los mismos que además de contar con reservas limitadas, generan emisiones atmosféricas en sus procesos de combustión con las afectan negativamente al medio ambiente. Esto ha generado una búsqueda emergente de alternativas que permitan garantizar la seguridad energética y ambiental mediante el abastecimiento de energías limpias y renovables.

Bajo esta visión, el presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal el diseño y la simulación de un proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana (*Elaeis guineensis*) en el cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos con el software *SuperPro Designer*® que permite evaluar la viabilidad del proyecto a través de una valoración ambiental y económica del mismo para optimizar la eficiencia del proceso.

El biodiesel al originarse de aceites vegetales, microalgas, aceites usados y otras materias primas con buenos rendimientos es un combustible biodegradable y renovable.

Se ha utilizado el aceite de palma africana como materia prima para esta investigación porque cumple con las especificaciones requeridas para la obtención de biodiesel y tiene un alto rendimiento por su composición de ácidos grasos saturados e insaturados. Cabe recalcar

que Ecuador ostenta el segundo lugar en la producción regional de aceite de palma con 379.028 toneladas métricas al año.

Existen varios procesos viables para la producción de biodiesel que combinados con las tecnologías existentes pueden aumentar la eficiencia de producción. Estos procesos pueden ser continuos o discontinuos. Para el desarrollo de esta investigación se ha utilizado la reacción de transesterificación por ser el método más económico y tener una conversión directa con pocas reacciones secundarias y un mínimo tiempo de reacción. El proceso se divide en tres etapas: transformación, separación y purificación.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, el presente trabajo se encuentra distribuido en 5 capítulos importantes: en el CAPITULO I se presenta la introducción en donde se plantea el problema de investigación, la justificación y los objetivos; en el CAPITULO II se presenta una reseña histórica sobre el biodiesel y se definen las bases teóricas de la investigación, en donde se recopila la información necesaria para el desarrollo del proceso. En el CAPITULO III se presenta la metodología implementada para llevar a cabo el diseño y la simulación del proceso de producción, en esta sección se describe el tipo de investigación, la metodología utilizada para el diseño y los recursos humanos y materiales. En el CAPITULO IV se presentan los resultados de la simulación del diseño del proceso de producción que corresponden principalmente a la descripción de los equipos, las condiciones de operación y los balances de masa y energía, también se presenta la discusión en donde se analizan los resultados obtenidos y finalmente en el CAPITULO V se presentan las conclusiones y recomendaciones con las que se determina el cumplimiento de los objetivos planteados.

1.1 Planteamiento del problema

Los combustibles fósiles son recursos no renovables, sin embargo, son la principal fuente de energía en el mundo. (Foster & Elzinga, 2018) afirman que “Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial y el sistema energético es la fuente de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO_2 .”

Por lo que es precisa la búsqueda de nuevas alternativas al uso de combustibles fósiles que garanticen la seguridad energética y ambiental mediante el abastecimiento de energías limpias y renovables. En este sentido en los últimos años ha crecido el uso y aplicación alternativa del biodiesel que por la ausencia de compuestos de azufre no elimina gases de combustión al ambiente, esto ha motivado a las naciones más desarrolladas a promover su uso, destacando el uso de aceites de girasol, soya y palma africana, en forma de metilésteres (Murillo, 2004).

Las favorables condiciones climáticas ubican al Ecuador en un lugar privilegiado para el cultivo de palma africana. Según el último Censo Nacional Palmero realizado en 2017, Ecuador cuenta con alrededor de 8149 plantaciones, con un total de 257.120,93 has de producción distribuidas principalmente en las provincias de provincias de: Esmeraldas (116430.48 has), Los Ríos (39146.08 has) y Sucumbíos (21,184.34 has). Según (Acosta, 2019). La producción de aceite crudo de palma actualmente es de 379.028 TM de las cuales 166.960 TM son absorbidas por la industria nacional, su excedente, 212.068 TM se exportan principalmente hacia Colombia, Países Bajos, Cuba, entre otros. Esto debido a que no existen muchos estudios que den un valor agregado a esta producción excedente.

1.2 Justificación

El presente proyecto de investigación se ha realizado con el propósito de evaluar la factibilidad técnica de un proceso tecnológico de producción de biodiesel a partir de aceite crudo de palma africana. Esto, en respuesta a la necesidad de una búsqueda emergente de nuevas alternativas al uso de combustibles fósiles, como ya se ha mencionado anteriormente, son recursos limitados de los que dependen la mayoría de las actividades humanas a nivel mundial. Además, es preciso mencionar que estos combustibles han generado efectos negativos para el ambiente ya que son responsables de la mayoría de las emisiones de CO_2 , las mismas que contribuyen al efecto invernadero, uno de los grandes desafíos ambientales que hoy enfrenta la humanidad.

Ecuador y específicamente el cantón Shushufindi ubicado en la provincia de Sucumbíos posee una amplia riqueza de producción agrícola de palma africana, una planta oleaginosa de la que se extrae el aceite con el más alto rendimiento en la producción de biodiesel. Según (Chavéz, Gallegos, & Tapia, 2010) el aceite de palma africana tiene la capacidad de producir 5 550 litros de biodiesel por hectárea. Sin embargo, por la falta de investigación y tecnología la producción se ha destinado a la industria alimentaria nacional y su excedente a la exportación como materia prima, sin dar un valor agregado basado en obtener productos propios.

Por esta razón, se ha planteado un diseño in silico del proceso de producción de biodiesel tomando como materia prima el aceite crudo de palma africana con el software *SuperPro Designer*® que permite evaluar la viabilidad del proyecto a través de una valoración ambiental del mismo, con la finalidad de brindar información que puede ser el punto de partida para generar nuevas ideas de aprovechamiento del aceite crudo de palma africana en la generación de biocombustibles.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Realizar un diseño in silico de un proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma (*Elaeis guineensis*) en el cantón Shushufindi, como alternativa de sustitución de combustibles fósiles.

1.3.2 Objetivos específicos

- Recopilar datos necesarios para el diseño de la propuesta tecnológica de producción de biodiesel a partir de aceite de palma (*Elaeis guineensis*).
- Modelar el sistema de producción de biodiesel a partir del aceite de palma africana mediante el software de simulador químico SuperPro Designer®.
- Analizar las condiciones de operación de la propuesta tecnológica.

CAPITULO II

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Antecedentes

Las energías renovables son aquellas que se regeneran y se espera que perduren por más tiempo. Además, se distribuyen en amplias zonas y su adecuada utilización tiene un favorable impacto ambiental, razón por la cual es una herramienta de mucha importancia en la actualidad frente a la necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel (Vázquez, 2014).

La historia de los biocombustibles inició a finales del siglo XIX con el uso de hidrocarburos como fuente de energía. En 1895 se utilizó por primera vez los aceites vegetales como combustibles para motores cuando Rudolf Diésel desarrolló el primer motor diésel que funcionaba con aceite de maní. En 1908 Henry Ford hizo el primer diseño de su automóvil modelo T en el que esperaba utilizar etanol como combustible. Fue en la década de los sesenta con la crisis del mercado petrolero cuando se instituyó una mezcla de gasolina y etanol como una alternativa frente a los elevados precios del petróleo y al posible agotamiento de sus fuentes de reserva (Salinas & Gasca, Los biocombustibles, 2009). En este sentido y teniendo excedentes de producción de ciertas semillas, en 1983 Sudáfrica perfeccionó el uso del aceite trans-esterificado de girasol como biodiesel y en 1989 una compañía austriaca instaló la primera planta industrial de biodiesel a base de semillas de colza con una capacidad de procesamiento de 30 mil tm/año (Valdés & Palacios, 2016).

En Colombia la industria del biodiesel inició en el año 2008 a partir de aceite de palma debido a que es el país con más producción de palma en América Latina y el quinto en el mundo (Fontalvo, Vecino, & Barrios, 2014).

Ecuador por su parte ha incursionado en la producción de biodiesel con la propuesta de Ecopaís, con una capacidad de 4 mil millones de litros al año distribuidos en más de 40 estaciones instaladas en Guayaquil (ProEcuador, 2013). En 2012 Rafael Correa emitió el Decreto Ejecutivo 1303 en donde se menciona que el diésel fósil que se consume en el país debe contener el 5% de biodiesel (Paredes, 2015).

En la actualidad La Fabril es la única empresa que produce biodiesel a partir de palma africana en el país para exportación principalmente a Estados Unidos y Perú por otro lado la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra importó dos tipos de reactores para una elaboración de biodiesel a pequeña escala y la Escuela Superior Politécnica del Litoral ha realizado avances importantes en la producción de biodiesel a pequeña escala.

(Alarcón & Guayaquil, 2011) realizaron el análisis de alternativas de aceite vegetal para la producción de biodiesel en el Ecuador con la finalidad de identificar las posibles fuentes de aceites vegetales para la producción de biodiesel en el país. Además, especifican que el país si cuenta con la tecnología necesaria para la producción de biodiesel.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Diseño industrial de procesos

El diseño industrial de procesos aloja un conjunto de pasos que se siguen con el fin de alcanzar un resultado satisfactorio conforme a las necesidades iniciales. Este diseño se basa principalmente en generar un valor agregado a la elaboración y desarrollo de productos con alta demanda, con estrategias para incrementar las ventas en las empresas capitalistas (Forero, 2016). El diseño industrial de plantas y el establecimiento de procesos de producción tienen la finalidad de alcanzar el mayor nivel de competitividad en los mercados.

2.2.1.1 Etapas del diseño

Según (Riba, 2002) el diseño industrial se divide en cuatro etapas que determinan los resultados de cada una de las etapas sucesivas:

- *Etapa 1* donde se planifica o define el producto, para ello es necesario recopilar información y elaborar una lista detallada dependiendo los requerimientos del producto.
- *Etapa 2* comprende el diseño conceptual que involucra la búsqueda de los posibles problemas de diseño, con el fin de construir una estructura de trabajo adecuada e implantar soluciones a los problemas que puedan generarse.
- *Etapa 3* comprende el diseño de conjunto o materialización donde se toma en cuenta las definiciones de la fase conceptual para continuar con el diseño final del producto requerido en base a los datos técnicos y necesidades económicas, lo cual permite evaluar la funcionalidad y viabilidad del diseño.
- *Etapa 4* comprende el diseño de detalle que se refiere a los planos de fabricación y ultimación de detalles.

2.2.2 Modelación y Simulación

La modelación y simulación son herramientas analíticas que comprenden la estructuración de un modelo operacional de un sistema real con la finalidad de analizar su comportamiento en espacio y tiempo y a la vez evaluar las estrategias alternativas para el desarrollo del mismo (Bermúdez & Carreño, 2011). La modelación y simulación puede ser utilizada en diferentes áreas una de ellas es la simulación de procesos químicos para los que es necesario seleccionar un sistema termodinámico que represente las propiedades fisicoquímicas de los componentes que conforman el sistema (Cera & Iglesias, 2014).

Estos simuladores permiten la variación de las especificaciones de diseño y las condiciones de operación de los equipos que conforman el sistema con el fin de obtener modelos óptimos. Además, permiten realizar un análisis económico, así como balances de masa y energía con los que se mejora la eficiencia del proceso y facilita la toma de decisiones.

En la actualidad existe una variedad de simuladores de procesos químicos que operan como instrumentos de cálculo, con bases de datos y respaldos de bibliotecas para cálculos, a continuación, se describen los principales simuladores químicos:

2.2.2.1 Hysys®

Es un software de simulación de procesos químicos líder en simulaciones relacionadas con la industria petroquímica. Permite la modelación de sistemas complejos mediante su avanzada interfaz gráfica que ofrece al usuario la facilidad de estructurar el flowsheet de la planta en una ventana llamada Process Flowsheet Diagram, en donde se puede simular el sistema real y obtener los resultados y estimaciones adecuadas (Villegas, 2007).

2.2.2.2 Aspen Plus®

Es un software de diseño y simulación plantas industriales en base a modelos termodinámicos y propiedades fisicoquímicas de compuestos que permiten el análisis de procesos y operaciones unitarias con la finalidad de obtener productos de diferentes materias primas (Moreno, 2019).

2.2.2.3 Chemcad®

Es un software que permite el dimensionamiento de un proceso o equipo y evaluar sus condiciones de operación con la posibilidad de modificar las variables según las necesidades del sistema. El software cuenta con un amplio banco de componentes y además permite incorporar nuevos en caso de ser necesario (Toselli, Monesterolo, & Beltran, 2009).

2.2.2.4 SuperPro Designer®

Es un software que facilita la modelación y simulación de procesos industriales tales como: farmacéuticos, alimenticios, biotecnológicos, agroquímicos, entre otros. Contiene herramientas para la evaluación de balances de masa y energía costos en una planta dada operando tanto de forma continua como por lotes, así como también por contener herramientas de cálculo diseñadas específicamente para procesos que incluyen componentes biológicos. (Cortes, Martinez, Rodriguez, Rodríguez, & Amaury, 2018).

Para el desarrollo del presente proyecto de simulación de proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma se lleva a cabo con el programa *SuperPro Designer®* ya que es un software ampliamente utilizado en la simulación de procesos biotecnológicos e industrias químicas.

2.1.3 Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles están compuestos por: Carbono (C) e Hidrogeno (H), son sustancias originadas a partir de plantas y animales muertos que quedaron enterrados bajos muchas capas de la tierra y rocas llamadas sedimentos. El petróleo, el carbón y el gas natural.

2.1.3.1 Producción y uso de combustibles fósiles

Las actividades humanas en la actualidad dependen de las energías fósiles, históricamente el petróleo, el gas natural y el carbón, han mantenido el liderazgo en consumo y producción a pesar del desarrollo de nuevas fuentes de energía primaria como son la nuclear, hidroeléctrica y otras energías renovables. Sin embargo, el 85% de consume energético del planeta lo cubren el petróleo, el gas natural y el carbón (Gráfico 1).

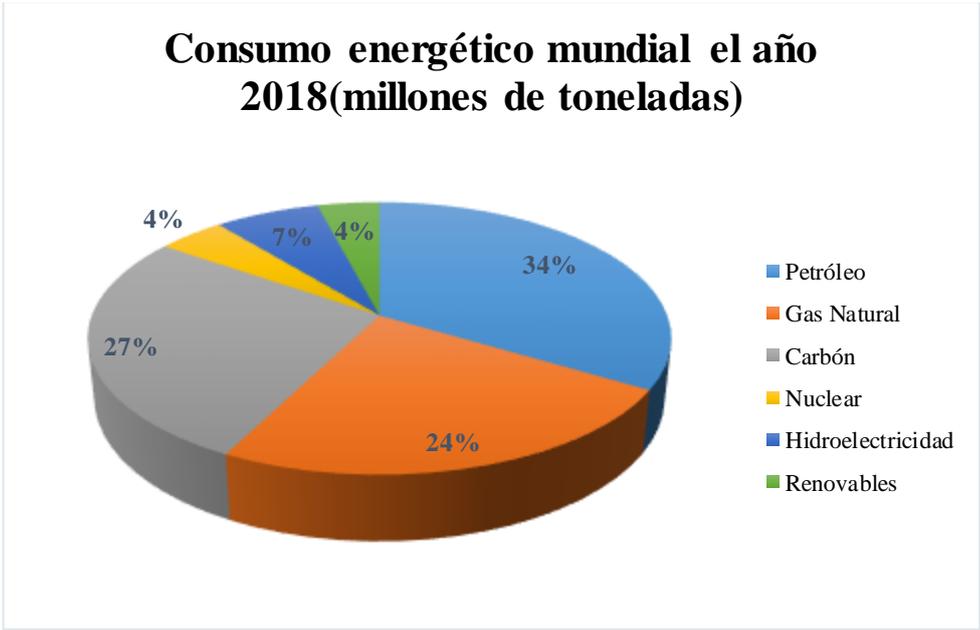


Gráfico 1 Consumo energético mundial en el año 2018

Fuente: (BP Statistical, 2019)

En la última década la producción energética (Gráfico 2) de la energía nuclear se ha reducido, mientras que la producción de la hidroelectricidad y de las energías renovables ha aumentado mínimamente. La producción del petróleo y el carbón se ha mantenido y la producción de gas natural ha tenido un aumento a partir de 2013.

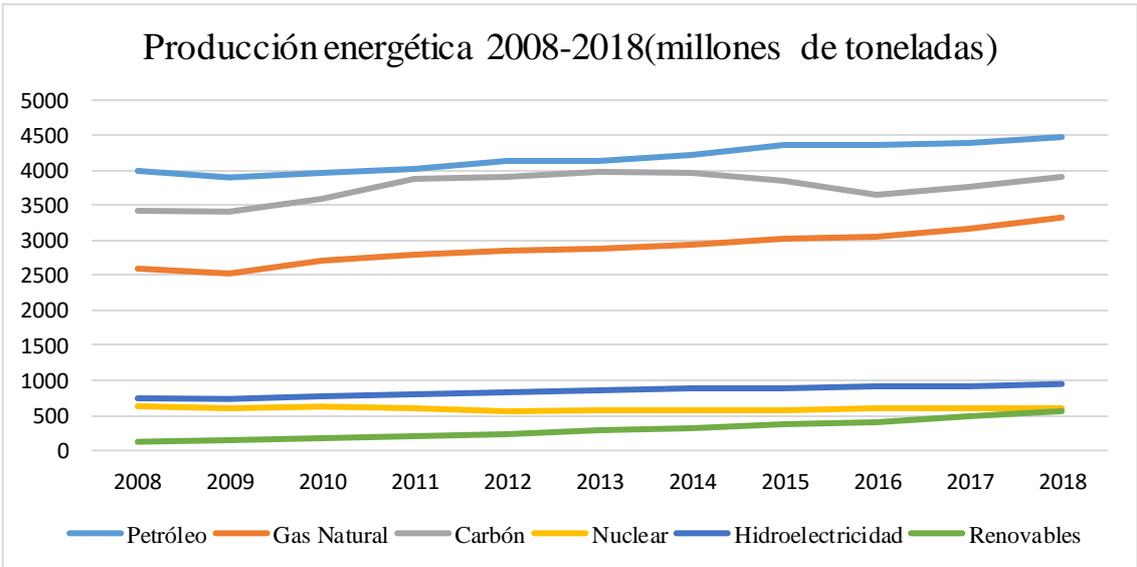


Gráfico 2. Evolución de la producción energética mundial en los últimos 10 años

Fuente: (BP Statistical, 2019)

La evolución del consumo de energías primarias (Gráfico 3) ha tenido un crecimiento exponencial en América del Norte en los últimos 10 años es el principal consumidor de la energía. África es un productor potencial de combustible y consume menos que América del Norte. Las demás regiones han mantenido sus niveles de consumo desde 2008 a 2018.

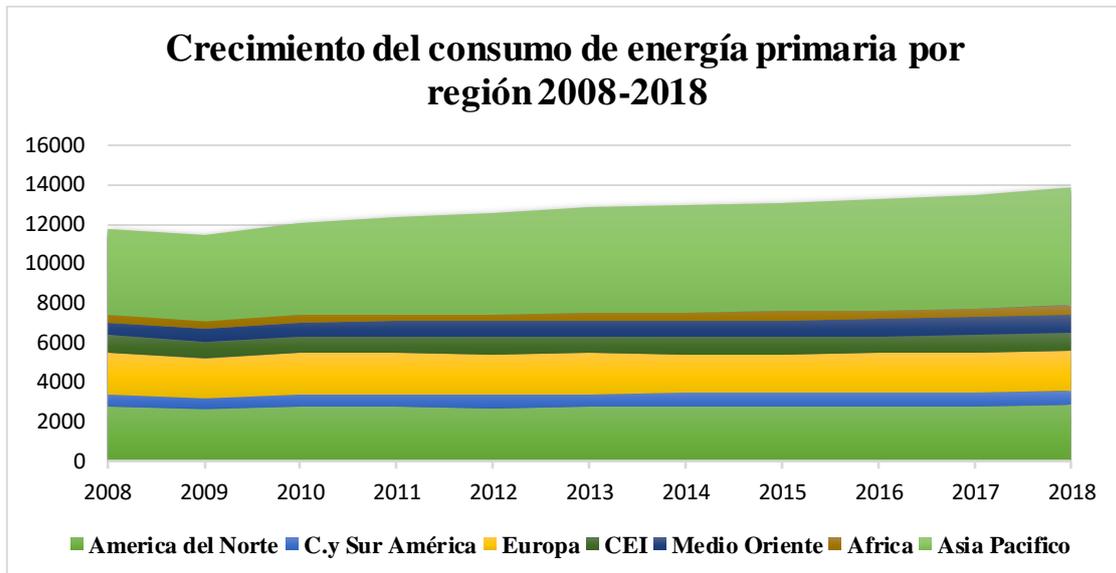


Gráfico 3 Evolución del consumo energético mundial por regiones

Fuente: (BP Statistical, 2019)

2.1.4 Biocombustibles

Son biocarburantes procesados a partir de biomasa compuesta de material vegetal o de restos orgánicos no fosilizados que liberan la energía contenida mediante la reacción de combustión y reemplazan el uso de combustibles fósiles. Los biocombustibles más comunes son el bioetanol y el biodiesel (Salinas y Gasca, 2009).

2.1.4.1 Biodiesel

Es un biocombustible líquido formado por una mezcla de metil ésteres de ácidos grasos que se obtienen de la reacción de transesterificación a partir de lípidos naturales derivados de grasas animales, aceites vegetales y plantas oleaginosas, y un alcohol monovalente, en presencia de un catalizador básico (Benjumea, Agudelo, y Ríos, 2009).

2.1.4.1.1 Características del biodiesel

El biodiesel utiliza productos vegetales como materia prima. Es por ello que se debe caracterizar los mercados agrícolas y evaluar la disponibilidad de las mismas. Cabe recalcar que para la industria de los biocombustibles no depende necesariamente de la demanda local sino de la existencia de demanda suficiente (Arancibia & Calero, 201).

El biodiesel puede utilizarse mezclado con diésel en cualquier proporción y las cantidades manejadas en la composición establecerán las características finales del producto, denominándose a la mezcla como biodiesel y el porcentaje de éster metílico se señala en la nomenclatura del biodiesel, entre los que están: B5, B10, B50, B100.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros comparativos físicos y químicos de Biodiesel frente al Diesel.

Tabla 1 Parámetros comparativos del Biodiesel y Diesel

Propiedades	Biodiesel	Diesel
Ácidos grasos	$C_{12} - C_{22}$	$C_{18} - C_{21}$
Poder calorífico (<i>Kcal/mol</i>)	9500	10800
Viscosidad cinemática (<i>cst a 40°C</i>)	3,5 - 5,0	3,0 - 4,5
Densidad (<i>g/cm³</i>)	0,875 - 0,900	0,850
Azufre (<i>%p/p</i>)	0	0,02
Punto de ebullición (<i>°C</i>)	190 - 340	180 - 335
Punto de inflamación (<i>°C</i>)	120 - 170	60 - 80
Número de cetanos	48 - 64	44 - 52
Relación aire/combustible	13 - 14	14 - 16

Fuente: (Velasquez, 2018)

2.1.4.1.2 Ventajas del biodiesel

El biodiesel es un carburante ecológico con grandes beneficios ambientales ya que al ser de origen vegetal reduce la generación de emisiones de CO_2 a la atmósfera reduciendo las emisiones de efecto invernadero. En el Gráfico 4 se indica la disminución de emisiones asociada con el aumento en la concentración de biodiesel.

El protocolo de Kioto es un documento que responde al cambio climático producto del aumento de los gases de efecto invernadero y con él se propone reducir n al menos el 5% de emisiones bajo los niveles existentes en 1990 mediante compromisos como la investigación científica y técnica para fomentar el desarrollo de tecnologías, prácticas y procesos para controlar y prevenir las emisiones.

El biodiesel no requiere modificaciones en su composición para su uso en motores diésel comunes y tiene gran poder de lubricación con lo que minimiza el desgaste del motor. Además, permite a los países agrícolas independizarse de los países productores de petróleo.

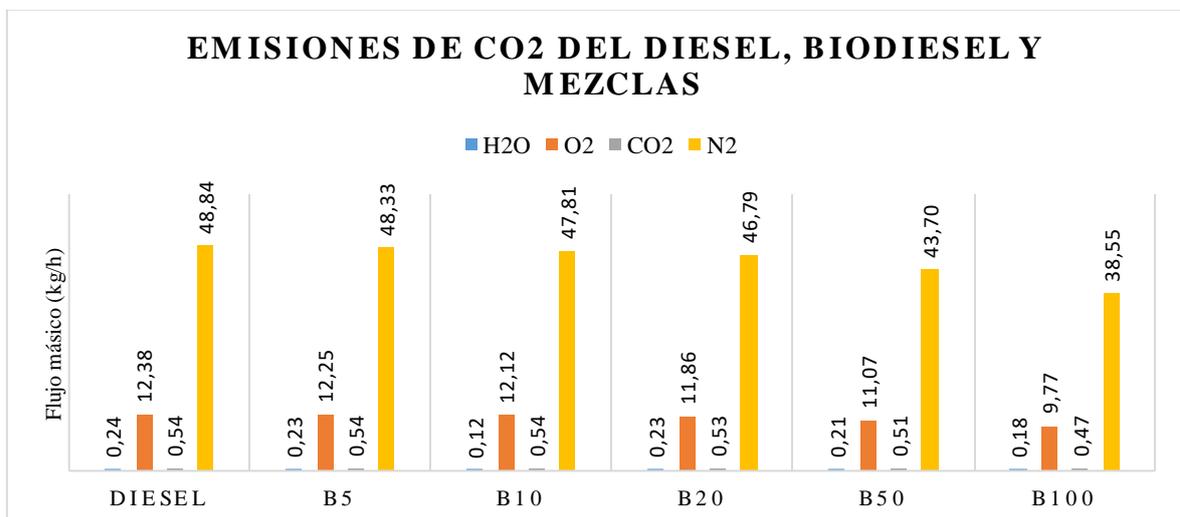


Gráfico 4 Emisiones de dióxido de carbono del diésel, biodiesel y mezclas

Fuente: (Pérez, et al., 2015)

2.1.4.1.3 Economía del biodiesel

La economía del biodiesel depende de la selección de la materia prima. El desafío está en la elección de tecnologías de producción basadas en materias primas de disponibilidad local con alto rendimiento para que el costo de producción del biocombustible sea competitivo y conserve una calidad apropiada (Benavides, Benjumea y Pashova, 2007).

Chavéz, Gallegos y Tapia (2010) afirman que “la ecuación económica del biodiesel también dependerá del tipo de residuo sólido que la extracción del aceite genera. Si este residuo es apto para uso humano, o para alimentos balanceados, el costo del aceite vegetal será relativamente menor”(p.17).

2.1.4.1.4 Producción y uso del biodiesel

Los países de la Unión Europea lideran la producción y consumo de biodiesel; esto debido a que está libre de impuestos y recibe un fuerte impulso frente a los altos precios del diésel (Benjumea, Agudelo, & Corredor, 2003). En América Central y del Sur la palma africana es la principal materia prima para la producción de biodiesel, Colombia es el cuarto productor de aceite de palma en el mundo y el primero en América. Según la (Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, 2012) cuenta con más de 300.000 hectáreas de cultivos de palma de aceite y 5 plantas productoras de biodiesel.

América del Sur es el segundo productor mundial de biodiesel. (Ramos, Díaz, & Villar, 2016), afirman que: En 2014 Brasil produjo 3500 millones de litros de biodiesel de los cuales exporta el 1,14% de esa producción principalmente a los Estados Unidos, Suecia y Holanda. Ecuador tiene una escasa producción de biodiesel, existe una sola empresa “La Fabril” que realiza la producción y exportación desde el 2005 utilizando el aceite de palma como materia prima. Este biocombustible no puede competir con el petro diésel debido a los altos subsidio que existe en el país (Vega, 2010).

2.1.4.1.5 Métodos de obtención

Según (Chacón, 2017) existen diferentes métodos disponibles para el proceso de obtención de biodiesel entre los que se destacan 4 métodos de transformación:

- *Uso directo de aceites y mezcla con gasóleo:* es el uso directo de diésel como combustible o combinado con gasóleo.
- *Micro - emulsiones:* son microestructuras constituidas por dos líquidos inmiscibles que sustituyen al diésel N°2.
- *Pirolisis:* es la conversión de cadenas largas y sustancias saturadas en biodiesel mediante el calor. Esta conversión presenta resultados químicamente similares a los derivados del petróleo.
- *Transesterificación:* es la reacción de un triglicérido con un alcohol en presencia de un catalizador a partir de la que se obtiene ésteres y glicerina.

La reacción de transesterificación es el método más utilizado debido a que es el más económico y tiene una conversión directa con pocas reacciones secundarias y un mínimo tiempo de reacción. esta reacción, como se muestra en la Ilustración 1, consiste en la transformación química de un triglicérido compuesto por tres moléculas de ácidos grasos y alcoholes de bajo peso molecular en presencia de un catalizador homogéneo o heterogéneo para producir glicerina y ésteres procedentes de los tres ácidos grasos de partida (Tejada, Tejada, Villabona, & Monroy, 2013). Se puede realizar por varias rutas: base de transesterificación catalizada del aceite, transesterificación directa catalizada por el ácido del aceite, conversión del aceite a sus ácidos grasos y luego a biodiesel

La vía catalítica más utilizada es la catálisis alcalina ya que permite que la reacción sea llevada a cabo a bajas temperaturas y en tiempos cortos (Sequeira, Polich, Morales, & Chamorro, 2011).

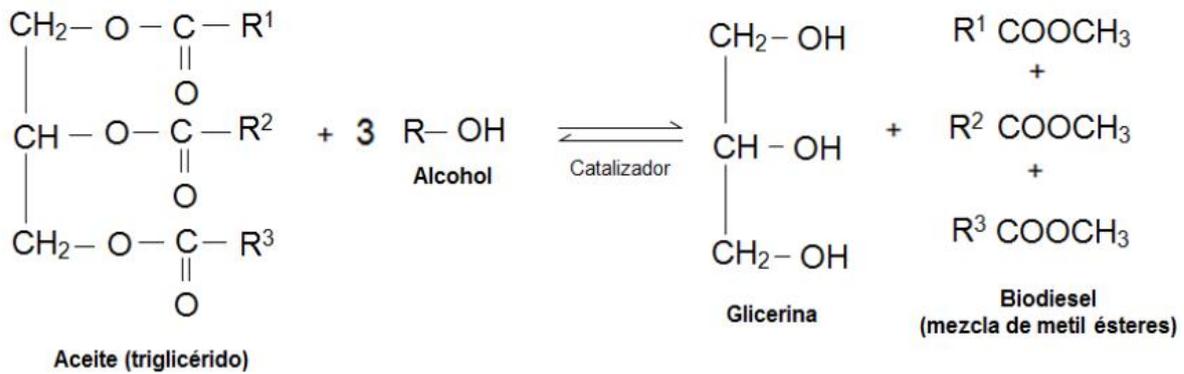


Ilustración 1 Reacción de transesterificación

Fuente: (Chacón, 2017)

2.1.4.1.6 Materia Prima

1. Lípidos naturales

Químicamente el biodiesel es una mezcla de ésteres de alquilo que contienen largas cadenas de ácidos grasos obtenidos a partir de lípidos naturales como los aceites vegetales, grasas animales, aceites usados, etc. Según (Castellar, Angulo, & Cardozo, 2014) el 95% de la materia prima utilizada para la producción de biodiesel corresponde a aceites vegetales comestibles debido a su riqueza productiva en varias regiones del mundo, además el uso de aceites vegetales vírgenes disminuye el costo de producción del producto. En el ANEXO 1 se presentan las propiedades de algunos aceites vegetales.

2. Alcohol

El alcohol es el principal insumo para la producción de biodiesel entre los más utilizados se encuentran el metanol y el etanol porque son más sensibles a la contaminación con agua la cual inhibe la reacción. El metanol es el alcohol más utilizado debido a su alta reactividad y bajo costo (Medina, Chávez, & Jáuregui, 2012). Desde el punto de vista técnico de la reacción el metanol requiere menos cantidad de alcohol en exceso en comparación con el

etanol además requiere menores temperaturas de reacción y posee menores tiempos de reacción.

3. Catalizadores

Los catalizadores son necesarios para el desarrollo de la reacción que produce el biodiesel. Estos catalizadores pueden ser ácidos, básicos o enzimáticos. Los catalizadores básicos se utilizan a nivel industrial ya que actúan mucho más rápido y permiten operar en condiciones moderadas entre los catalizadores básicos homogéneos más utilizados están el $NaOH$ y KOH y debido que su uso conlleva a procesos de purificación del producto (biodiesel), además de ser altamente corrosivos. Por lo que se emplea alcóxidos para simplificar el proceso de producción e incrementar la eficiencia del mismo (Medina, Chávez, & Jáuregui, 2012).

CAPITULO III

3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización

El diseño in silico del presente proyecto de investigación se ha realizado en las instalaciones de la Universidad Estatal Amazónica, ubicada en la ciudad de Puyo, en el Km 2 $\frac{1}{2}$ vía a Tena, cantón Puyo, provincia de Pastaza, como una propuesta de implementación en la extractora Palmeras del Ecuador S.A ubicada en el Km 16 vía a Limoncocha, en el cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos.

3.2 Tipo de investigación

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó información de investigaciones realizadas a nivel mundial, regional y local relacionada con la producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana, además se utilizó bases de datos de instituciones gubernamentales, asociaciones y centros de investigación con el objetivo de obtener datos actualizados de la producción actual de la materia prima en el país, para poder aplicar los pasos para obtener la simulación del proceso de producción de biodiesel.

3.2.1 Exploratoria-descriptivo e inferencial

El presente estudio tiene un alcance exploratorio-descriptivo e inferencial ya que no posee antecedentes de otros estudios en la localidad de simulación de procesos de producción de biodiesel que puede ayudar a generar nuevas alternativas de aprovechamiento del excedente de producción de aceite crudo de palma africana en el cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos.

3.2.2 Cuantitativa

El tipo de estudio fue cuantitativo por la identificación de cantidad de materia prima, el dimensionamiento de los equipos, los parámetros para las operaciones unitarias, la cantidad de residuos y productos generados por el proceso para la producción de biodiesel para generar el proceso de simulación y reportes económicos-ambientales que faciliten una producción eficiente y la evaluación de la factibilidad económica, ambiental y social del proceso.

En esta investigación se detallaron, además, se detallaron las características específicas de las condiciones necesarias para el proceso para la obtención de biodiesel, se reunió información específica de la cantidad de aceite crudo de palma producido en el cantón Shushufindi. Se realizaron cálculos a partir de la materia prima (aceite crudo de palma) necesario para la elaboración de biodiesel para evaluar su rentabilidad.

Se describieron las condiciones de operación en cada una de las etapas, residuos, emisiones y subproductos generados.

3.3 Métodos de investigación

3.3.1 Análisis

El método de análisis se utilizó a partir de la compilación de información relevante de investigaciones realizadas por diversos autores (artículos científicos, revistas científicas, libros, repositorios de tesis, etc.).

3.3.2 Síntesis

Previo a una revisión se realizó la selección de puntos de interés que sirvieron como referencia y guía para el desarrollo de la presente investigación.

3.3.3 Comparación

Una vez terminada la síntesis se comparó los resultados en dependencia a diferentes capacidades de la materia prima para determinar eficiencia, condiciones de trabajo, el punto de equilibrio y resultados óptimos y veraces.

3.3.4 Método inductivo

Mediante la simulación de la mezcla entre etanol y aceite de palma en presencia de un catalizador se determinará las especificaciones solicitadas, para obtener las condiciones iniciales de operación del diseño in silico del proceso y estimación de costo de producción del biodiesel, evaluación de impacto ambiental y cálculo de propiedades termodinámicas.

3.3.5 Método deductivo

El dimensionamiento del diseño se fundamentará en Operaciones Unitarias, tiempo de reacción, transferencia de calor y cálculos de balance de masa y energía que sirven para determinar las variables del proceso y realizar los cálculos necesarios para llevar a cabo los objetivos planteados. El objeto de este estudio se fragmentó en tres objetivos específicos que constituyen parte del cuerpo de la investigación la misma que ayudará a la recopilación de datos necesarios para analizar las condiciones de operación para la modelación de la propuesta tecnológica de producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana.

3.4 Técnicas

3.4.1 Norma técnica: Código ASME

Es una norma técnica para el diseño, la fabricación y operación recipientes a presión y calderas. Está conformada por 12 secciones agrupadas en: códigos de construcción (I, III, IV, VIII, X y XII), códigos de referencia (II, V y IX) y códigos de operación e inspección: Secciones: VI y VII.

3.4.1.1 Sección VIII, división 1

Esta sección contiene los requerimientos, prohibiciones y reglas de construcción, está formada por tres subsecciones: la subsección A establece los requisitos mínimos en cuanto a materiales diseño, aberturas y refuerzos, superficies reforzadas y apoyadas, ligamentos, fabricación, inspección y prueba, estampado de reportes y dispositivos de alivio de presión, la subsección trata sobre los requisitos mínimos para los diferentes métodos de fabricación y la subsección C trata lo referente a los materiales de construcción de los recipientes sujetos a presión (Chuquín, 2013).

3.4.1.2 Normas del TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association)

Estas normas tratan lo relacionado a los intercambiadores de calor, presentan de manera normalizada la nomenclatura para los intercambiadores de calor, establecen la tolerancia de construcción, la instalación y mantenimiento, la inducción de las vibraciones, estudios térmicos, se presentan conjuntos de forma gráfica y tubular de los fluidos y las dimensiones de tubos y conexiones (Chuquín, 2013).

3.4.2 Diseño de la investigación

El diseño de investigación se asocia con la metodología que se seleccionó en la simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma africana. El demo del programa de simulación *SuperPro Designer*® que para la simplificación del proceso permitió especificar tres etapas: reacción, refinación del biodiesel y purificación de glicerol.

3.4.3 Recursos humanos y materiales

3.4.3.1 Recursos humanos

Los recursos humanos y materiales se encuentran detallados en la Tabla 2.

Tabla 2 Recursos humanos necesarios para el proyecto de investigación

Recursos humanos	Cantidad (U)
Director(s) del proyecto de investigación	1
Estudiante(s)	2

Elaboración propia de los autores; 2020

3.4.3.2 Recursos materiales

Los recursos materiales necesarios para la elaboración del proyecto de investigación se encuentran detallados en la Tabla 3.

Tabla 3 Recursos materiales necesarios para el proyecto de investigación

Recursos materiales	Cantidad (U)
Laptop(s)	2
Cuaderno	2
Bolígrafo	2

Elaboración propia de los autores; 2020

CAPITULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Datos necesarios para el diseño de la propuesta

4.1.1 Situación del biodiesel

En Ecuador como ya se ha explicado en los Antecedentes cuenta con la empresa La Fabril como la única empresa de producción de biodiesel a partir de palma africana, producción destinada a la exportación.

La Fabril se abastece de 16 extractoras de aceite de palma y cuenta con dos plantas de producción de biodiesel en Montecristi y en Guayaquil con una capacidad de 12 000 toneladas métricas mensuales, además ha implementado estrategias de productividad de la materia prima cumpliendo con las normativas ambientales (González, 2014).

4.1.2 Disponibilidad de la materia prima

4.1.2.1 Palma africana (*Elaeis guineensis*)

La palma africana es la planta oleaginosa que produce la mayor cantidad de aceite por unidad de superficie. Fue cultivada originariamente en países africanos de donde ha sido exportada a varios países del mundo y cruzada con especies locales que han incrementado su nivel de producción (Mingorance, Minelli, & Le Du, 2004).

4.1.2.1.1 Composición química del aceite de palma

El aceite de palma está compuesto por ácidos grasos saturados que son palmítico, esteárico, láurico y mirístico; y ácidos grasos insaturados que son oleico y palmitoleico. La Tabla 4 resume los porcentajes básicos de ácidos grasos presentes en el aceite de

palma. Además, cabe destacar que el aceite de palma cuenta con vitamina E y un alto contenido de antioxidantes (Chacón, 2017).

Tabla 4 Composición de los ácidos grasos del aceite de palma

Composición de ácidos grasos	% máxico
Láurico (C12)	0,5
Mirístico (C14)	1,1
Palmítico (C16)	38,9
Palmitoleico (C16:1)	4,3
Estearico (C18)	4,3
Oleico (C18:1)	35,8

Elaborado por: Elaboración propia de los autores; 2020

Fuente: (Gesteiro, Galera, & Gonzales, 2018)

4.1.2.1.2 Características químicas y físicas del aceite de palma

El aceite de palma se extrae del mesocarpio del fruto de la semilla de la palma africana por medio de procedimientos mecánicos. Esta construido por una mezcla de ésteres de glicerol (triglicéridos) y es fuente natural de carotenos y vitamina E. Los tocoferoles y tocotrieno les le confieren una gran estabilidad contra la oxidación. El aceite crudo de palma también contiene cierta cantidad de agua que puede ser generadora de la hidrolisis de los triglicéridos si se exceden niveles críticos (Fontalvo, Vecino, & Barrios, 2014) en el ANEXO 3. Componentes de entrada para el proceso de producción de biodiesel Se presentan los rangos de las características de los componentes del proceso.

4.1.2.1.3 Producción

De acuerdo al Censo Nacional Palmero realizado en 2017 el área cultivada en Ecuador es de 257, 120.93 ha, se divide en cuatro bloques (Tabla 5). El Bloque 2 cuenta con la mayor producción con una superficie de 125895,58 has sembradas que representan el 51% de la superficie total. Las provincias con superficies más grandes son: Esmeraldas, Los Ríos y Sucumbíos (AEXPALMA, 2017).

En Ecuador existen 48 plantas extractoras que se encuentran divididas en los mismos bloques expuestos anteriormente. El bloque 1 cuenta con 3 extractoras, el bloque 2 con 40 los bloques 3 y 4 con 1 extractora cada uno. Todas las extractoras cuentan con una capacidad instalada de 570ttf/h de las que se extrae el 20% de aceite crudo de palma (Alarcón & Guayaquil, 2011).

Tabla 5 Distribución de los bloques de producción de palma africana

Bloque	Sector	Superficie (ha)	Plantaciones
Bloque 1	Ricaurte-San Lorenzo	29387,71	175
Bloque 2	Rio Verde-Muisne-Quinindé-Santo Domingo	125895, 58	4559
Bloque 3	Santo Domingo- Quevedo-Santa Elena-El Oro	68035,64	2143
Bloque 4	Shushufindi-Joya de los Sachas	33801,99	1272
Total		257120,93	8149

Fuente: (AEXPALMA, 2017)

4.1.2.1.4 Disponibilidad

La demanda de aceite de crudo de palma en Ecuador se destina a la industria alimenticia, cuyo requerimiento se cumple en su totalidad, debido a los grandes volúmenes de producción local que a su vez generan una producción excedente. La producción de aceite crudo de palma en Ecuador es de 379.028 TM de las cuales 166.960 TM son absorbidas por la industria nacional, su excedente, 212.068 toneladas métricas pueden ser aprovechadas para dar lugar al desarrollo de la industria del biodiesel (Acosta, 2019). En el Gráfico 6 se presentan las exportaciones de aceite crudo de palma por empresas hasta julio del 2019.

Capacidad de producción de las extractoras de la empresa DANEC en toneladas fruto/hora

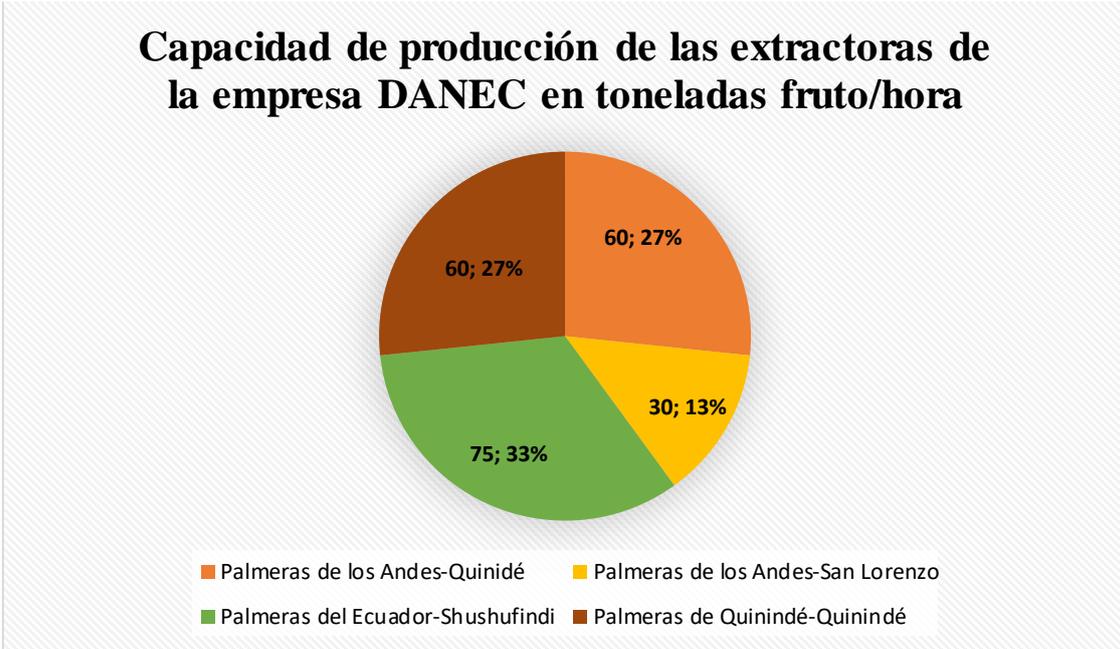


Gráfico 5 Capacidad de producción de las extractoras de la empresa DANEC

Fuente: (Acosta, 2019)

DANEC cuenta con 4 extractoras de aceite (Gráfico 5). La planta extractora Palmeras del Ecuador-Shushufindi ubicada en el kilómetro 16 vía a Limoncocha es la planta más grande de la empresa, actualmente cuenta con 14.000 has de plantación y una capacidad de producción de 75 toneladas/hora. Para este proyecto de investigación se ha tomado un excedente de producción de 5818 toneladas métricas (DANEC, 2014).

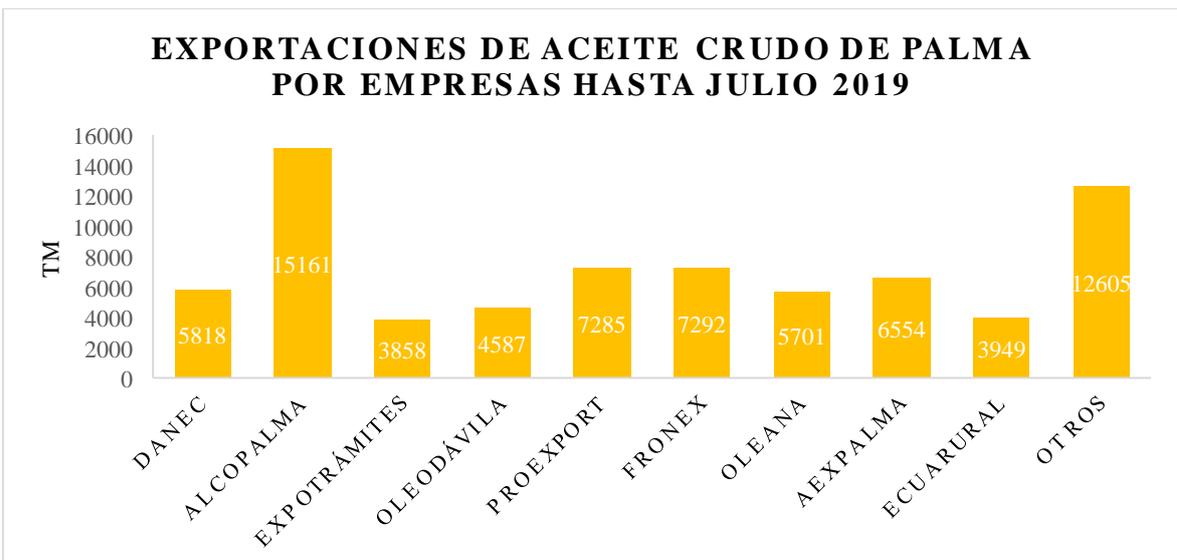


Gráfico 6 Resumen de las exportaciones de aceite crudo de palma por empresas hasta julio de 2019.

4.1.2.1.5 Rendimiento

En condiciones ideales (Tabla 6) los cultivos pueden producir hasta 20 toneladas de racimos por hectárea al año de los cuales se puede extraer hasta el 20% de aceite (5 ton) y el 5% de aceite de palmiste (1 ton). Del aceite crudo procesado se obtienen: oleína que es la fase líquida y estearina la fase sólida (Mingorance, Minelli, & Le Du, 2004). Esta cantidad es la mayor cantidad producida en relación a otra fuente de aceite. Los frutos tienen un peso de alrededor de 0,001 kg de los cuales el 50% es aceite con lo que logra un rendimiento de 4000 a 5000 litros de biodiesel por hectárea.

Tabla 6 Condiciones para la producción de palma africana

Requerimientos	Necesarios
Latitud	15° Norte y 15° Sur
Altitud(msnm)	500 msnm
Suelos	Pendientes menores a 15°
Temperatura (°C)	5°C-28°C
Luminosidad (horas luz/año)	1500-2000
Precipitación	1800- 2200 mm
Evaporación (mm/año)	1100 mm
Humedad Relativa	80%

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

Fuente: (FEDEPALMA, 2019)

4.1.2.2 Selección de la tecnología

La tecnología aplicada en el proceso de producción de biodiesel consiste en procesos de reacción, refinación y purificación; en los mismos que se emplean: HCl, agua, metanol, NaOCH₃, aceite de palma e hidróxido de sodio como materias primas (ver Tabla 7). Los

subproductos tales como: calefacción, centrifugación, enfriamiento, destilación tienen un alto valor en el proceso.

4.1.3 Descripción general del proceso de producción de biodiesel

El proceso de producción de biodiesel se ha desarrollado en base a la metodología aplicada por (Velasquez, 2018) que consiste en la mezcla de un triglicérido (aceite de palma) y metanol en presencia de un catalizador, provocando la reacción de transesterificación. Además, se ha utilizado un manual diseñado en la ESPOL para la correcta operación del proceso (Robalino, 2009).

La reacción química de biodiesel se ha dividido en tres secciones: reacción, refinación de biodiesel y purificación de glicerol como se muestra en la Ilustración 5.

4.1.3.1 Descripción del proceso de la sección de reacción.

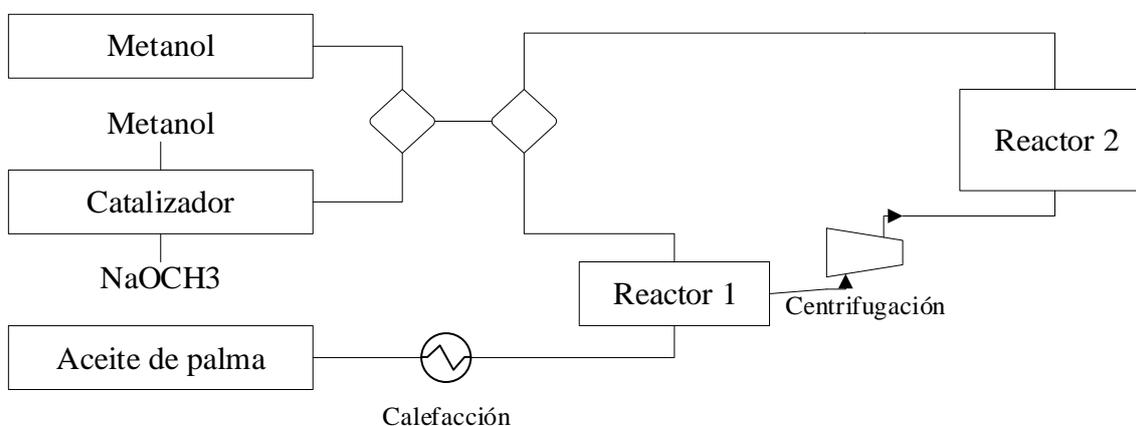


Ilustración 2. Diagrama de la sección reacción del proceso de producción.

En la sección de reacción se han utilizado tres tanques de almacenamiento de materia prima para el metanol (TNK-101), para el catalizador (TNK-102) y para el aceite de palma (TNK-103), dos reactores (R-101 y R-102) y un separador centrífugo (DC-101) los mismos que operan continuamente bajo condiciones adiabáticas. Los fluidos son transferidos mediante bombas centrífugas que aumentan la presión de los mismos.

El aceite de palma proveniente del tanque de almacenamiento (TNK-103) se precalienta por medio del intercambiador de calor (HX-101) y se alimenta al primer reactor (R-101). El metanol y el catalizador provenientes de los tanques de almacenamiento (TNK-101 y TNK-102) se fusionan y el 10% de la mezcla es enviada al segundo reactor (R-102) mientras que el 90% ingresa al primer reactor (R-101) donde el metanol reacciona con el aceite de palma produciendo biodiesel y glicerol. El metanol se alimenta a la unidad de reacción con un exceso del 300% con relación a la cantidad estequiométrica con el objetivo de maximizar la eficiencia de la reacción.

La mezcla de la reacción se alimenta al separador centrífugo (DC-101) donde el producto se divide en dos corrientes; la primera que aún contiene metanol sin reaccionar, catalizador y aceite de palma, se precalientan y se alimentan al segundo reactor (R-102) previa a la adición de la corriente de metanol-catalizador desde el divisor (FSP-101) y la segunda compuesta por la fracción de biodiesel y el aceite de palma que no han reaccionado es reciclada a la sección de purificación del glicerol.

4.1.3.2 Descripción del proceso en la sección de refinación del biodiesel

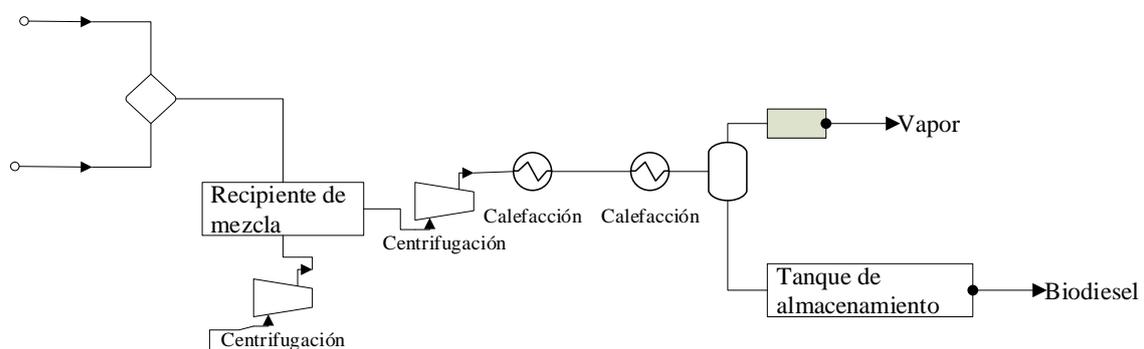


Ilustración 3. Diagrama de la sección de refinación del proceso de producción.

En la sección de refinación de biodiesel se utilizan dos separadores centrífugos continuos (DC-102 Y DC-104), un recipiente de mezcla (V-102), un sistema de secador de vacío (V-104 y GBX-101) y un tanque de almacenamiento de biodiesel (TNK-104).

La mezcla de ésteres metílicos (biodiesel), glicerol, sustratos sin reaccionar y catalizador que salen segundo reactor se alimentan directamente al separador centrífugo (DC-102 donde luego de ser separada; la corriente aceitosa es reciclada a la sección de purificación y la corriente bruta de biodiesel se alimenta al tanque de mezcla (V-102) en donde se lava con agua acidificada a un pH de 4.5 para neutralizar el catalizador y convertir los jabones en ácidos libres para posteriormente ser alimentada directamente al separador centrífugo (DC-104) de donde luego de ser calentada mediante los intercambiadores (HX-104 y HX-105) ingresa mediante la bomba centrífuga (P-31) al sistema de secador de vacío (V-104 y GBX-101) donde el 99,9% de agua es evaporada reduciendo el contenido del 2,2% al 0,001%. La corriente de biodiesel proveniente del flash (V-104) es alimentada directamente al tanque de almacenamiento (TNK-104) y transferidas a la bomba centrífuga (P-43) donde se separa el biodiesel de las trazas de aceite de palma, catalizador y glicerol que aún contiene.

4.1.3.3 Descripción del proceso en la sección de purificación del glicerol

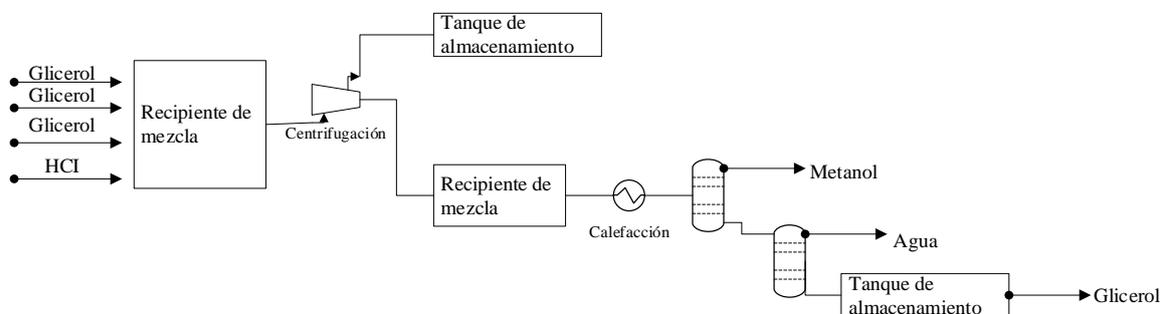


Ilustración 4. Diagrama de la sección de refinación del proceso de producción.

En la sección de purificación del glicerol se han utilizado dos recipientes de mezcla (V-101 y V-103), un separador centrífugo (DC-103), dos columnas de destilación (C-101 y C-102) y dos tanques de almacenamiento (TNK-105 y TNK-106).

El glicerol producido durante la reacción de transesterificación requiere de una purificación para eliminar el metanol disuelto y las impurezas antes de su comercialización. El equipo está diseñado para eliminar el metanol, los ácidos grasos y la mayor parte del producto para producir un 80% de glicerol.

Las corrientes de glicerol (S-119 y S-132) y los contaminantes de ácidos grasos (S-137) se agrupan y se tratan como ácido (HCl) en el recipiente de mezcla V-101 para convertir los jabones en ácidos grasos libres que posteriormente se eliminan mediante centrifugación en el separador centrífugo (DC-103). La corriente de ácidos grasos es transferida al tanque de almacenamiento (TNK-105) mediante una bomba centrífuga (P-114) para su eliminación. La corriente de glicerol se neutraliza con hidróxido de sodio (NaOH) en el recipiente de mezcla V-103, luego se precalienta por medio del intercambiador (HX-103) para ingresar a la columna de destilación (C-101) en donde el metanol contenido en la corriente de glicerol se recupera y se recicla nuevamente al TNK-101. Mientras la corriente de glicerol se alimenta a la columna de destilación (C-102) en donde se elimina el agua y se concentra para alcanzar el 80% de pureza. La corriente de metanol con agua sale por la parte superior de la columna y después de ser enfriada en el intercambiador (HX-106) se recicla nuevamente al recipiente de mezcla V-102. Finalmente, la corriente de glicerina, casi libre de ácidos grasos y todavía con metanol y agua se envía al tanque de almacenamiento (TNK-106) por medio de la bomba (P-113) y mediante otra bomba (P-116) se envían al depósito neutralizador donde se separan.

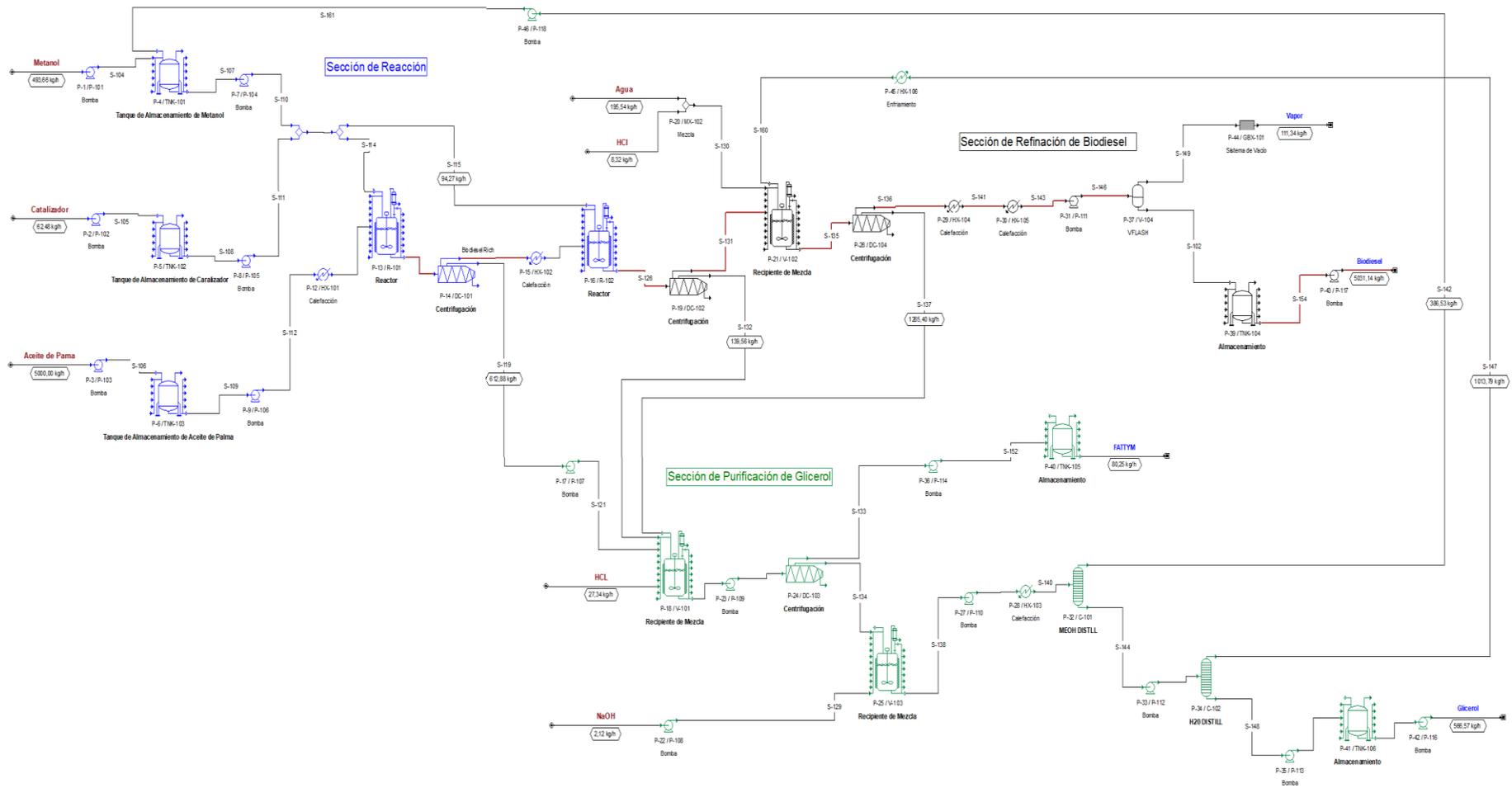


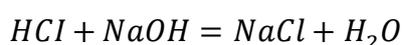
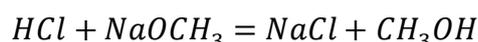
Ilustración 5. Esquema general del diseño in silico del proceso de producción de biodiesel.

Estequiometria del proceso de producción

Estequiometria de masas



Estequiometria molar



4.1.4 Materia prima

Las materias primas utilizadas en el proceso de producción de biodiesel son: cloruro de hidrógeno (HCl), agua, metanol, metóxido de sodio ($NaOch_3$), aceite de palma e hidróxido de sodio ($NaOH$). Se ha seleccionado el aceite de palma como componente de referencia debido a su alto potencial de producción. El metanol es la materia prima para el proceso de transesterificación porque es el más empleado industrialmente. El $NaOCH_3$ se emplea como catalizador con el metanol para la reacción de transesterificación. A continuación, se presenta el consumo de sustancias y materiales que intervienen en el proceso. El HCl para transformar los jabones de glicerol en ácidos libres y $NaOH$ para neutralizar la corriente de glicerol. En la Tabla 7 se muestran las cantidades de materia prima utilizada en el proceso.

Tabla 7. Materia prima para el proceso de producción.

Material	kg/h
HCl	19,14
Agua	218,72
Metanol	540,52
$NaOCH_3$	15,62
Aceite de Palma	5000
$NaOH$	2,12
TOTAL	5796,12

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

En la Tabla 7, se identificaron los materiales al granel necesarios para el proceso de producción. Estos componentes son utilizados en las secciones de reacción, refinación y purificación del biodiesel. Se necesitan 7596,12 kg/h de materia prima de los cuales el 0,3% es HCl, el 4% es agua, el 9% es metanol, 0,3% es NaOCH₃, el 86% es aceite de palma y el 0,04% es hidróxido de sodio.

4.1.5 Descripción de los equipos

En el ANEXO 2. Listado de los equipos se presenta un listado de los equipos utilizados en el desarrollo del proceso de producción donde se puede observar que existe una unidad por cada equipo que no hay unidades en espera ni escalonadas. Los equipos están fabricados con acero inoxidable de cromo-níquel que contiene una cantidad deliberada de molibdeno que aumenta la resistencia a la corrosión general a excepción de los intercambiadores de calor, la caja genérica las columnas de destilación, la mezcladora de flujo y el divisor del mismo que están fabricados con acero al carbono. El costo de la compra de los equipos se basa en el volumen total, el material de construcción y los estándares ASME de los mismos. El tamaño de los equipos se ha determinado de acuerdo a la disponibilidad de la materia y a las operaciones que realiza cada equipo. A continuación, se presenta una descripción específica para cada equipo.

4.1.5.1 Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento se ha utilizado para el almacenamiento continuo de materiales en las diferentes secciones del proceso de producción. Se han utilizado tres tanques en la sección reacción para contener la materia prima, uno en la sección de refinación del biodiesel para contener productos intermedios y dos en la sección de purificación del glicerol para contener productos finales. Entrada predeterminada, abertura, salida por defecto.

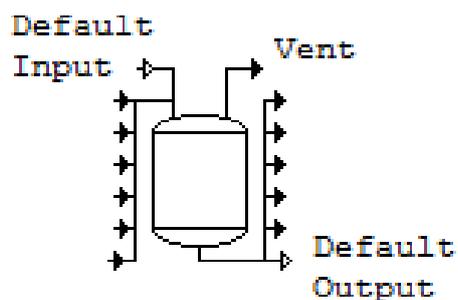


Ilustración 6. Tanque de almacenamiento.

En la Tabla 8 se muestra las características de diseño, así como sus valores predeterminados de los equipos donde se puede identificar que los tanques de mayor volumen son el tanque de almacenamiento de aceite de palma (TNK-103) y el tanque de almacenamiento de biodiesel (TNK-104).

Tabla 8. Características de diseño de los tanques de almacenamiento.

Ítem	Características						
	Reacción		Refinación		Purificación		
	TNK-101	TNK-102	TNK-103	TNK-104	TNK-105	TNK-106	
Factor de instalación	2	2	2	2	2	2	
Factor de mantenimiento	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Factor de asignación	1	1	1	1	1	1	
Tasa de uso	\$/e	100	100	100	100	100	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100	100	100	100	100	100
Material de construcción	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	
De gama baja	0	0	0	0	0	0	
De gama alta	100	150	5000	100000	100	100	
Volumen	21,39	9,63	2834,99	2920,5	6,75	57,13	
Costo base	24000	20000	447000	405000	9100	20000	
Exponente	0,6	0,6	1	1	0,6	0,6	
Volumen	L	27320,7	11342,7	3337783,	3446840,	12136,15	65936,6

Diámetro	m	2,26	1,6	11,23	11,35	1,73	3,04
Altura	m	6,79	5,07	33,69	34,06	5,18	9,11
Presión de diseño	psi	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME
Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.2 Reactor agitado

Un Reactor Agitado se usa para representar un recurso de equipo típicamente usado para albergar un procedimiento de recipiente con un objetivo principal para llevar a cabo una reacción. El procedimiento se puede ejecutar en modo discontinuo o continuo. El volumen máximo de la unidad utilizada para el diseño es de 40,000 L. La relación máxima entre el volumen de trabajo (liquido) del material y el volumen total del recipiente permitido es del 90%.

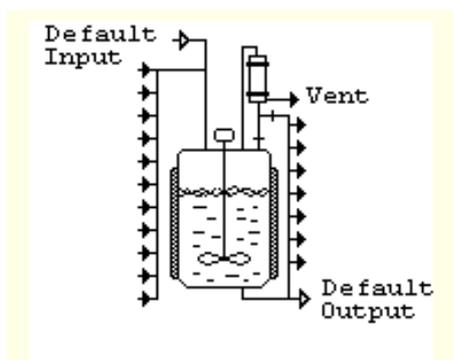


Ilustración 7. Reactor agitado

En el proceso de producción se han utilizado dos reactores para llevar a cabo las reacciones de transesterificación en un proceso continuo. La Tabla 9 muestra las características de diseño del equipo, así como los valores de dichas características.

Tabla 9. Características de diseño de los reactores agitados.

Ítem	Unidades	Características	
		Reacción	
		R-101	R-102
Factor de instalación		2	2
Factor de mantenimiento		0,1	0,1
Factor de asignación de Costos		1	1
Tasa de uso	\$/equipo-h	100	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100	100
Material de Construcción		SS316	SS316
De gama baja		0	0
De gama alta		100	100
Volumen base		7,47	6,91
Costo base		58000	51000
Exponente		0,6	0,6
Volumen	L	8896,31	8094,81
Diámetro	m	1,65	1,6
Altura	m	4,14	4,01
Presión de diseño	psi	22,04	22,04

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME
Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.3 Recipiente de mezcla

Los recipientes de mezclas para líquidos o fluidos consisten en un recipiente o tanque puede ser cerrado o abierto, este mezclador debe estar provisto de un agitador mecánico accionado por un motor eléctrico. En el recipiente de mezcla que se utilizó para el diseño in silico se puede mezclar dos o más flujos masivos y crea un flujo de salida. El rendimiento operativo del paso se calcula en función del flujo salida

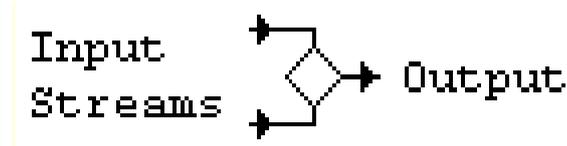


Ilustración 8. Recipiente de mezcla

En el recipiente de mezcla se presentan las reacciones secuenciales a las que tienen lugar en el reactor agitado. En la Tabla 10 se muestran las características de diseño de los equipos.

Tabla 10 Características de diseño de los recipientes de los recipientes de mezcla

Ítem	Unidades	Características		
		Refinación	Purificación	
		V-102	V-101	V-103
Factor de instalación		2	2	2
Factor de mantenimiento		0,1	0,1	0,1
Factor de asignación de Costos		1	1	1
Tasa de uso	\$/equipo-h	100	100	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100	100	100
Material de Construcción		SS316	SS316	SS316
De gama baja		0	0	0
De gama alta		100	100	100
Volumen base		1,69	0,93	0,82
Costo base		33000	6000	6000
Exponente		0,6	0,6	0,6
Volumen	L	1984,27	1022,77	986,82
Diámetro	m	1	0,8	0,8
Altura	m	2,51	2,01	1,99
Presión de diseño	psi	22,04	22,04	22,04

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.4 Decantador centrífugo

La centrifugación es una operación de separación común en las industrias químicas, bioquímica, alimentaria y medioambiental. En el bioprocesamiento, la centrifugación (especialmente pila de discos) se usa principalmente para recuperar y concentrar biomasa (recolección de células), eliminar partículas de desechos celulares después de la interrupción celular, recuperar cuerpos de inclusión y, en general, separar sólidos suspendidos de una solución líquida. La centrifugación también se usa para separar fases líquidas no miscibles que difieren en densidad (por ejemplo, separar gotas de aceite de una fase acuosa).

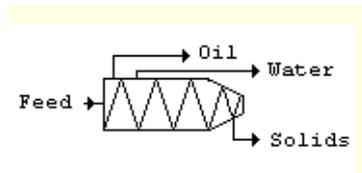


Ilustración 9. Decantador centrífugo

El decantador centrífugo se usa para representar un recurso de equipo decantador típicamente utilizado para realizar un procedimiento de centrifugación con el objetivo principal de llevar a cabo una separación solido- líquido o líquido-líquido basada en la diferencia de densidad entre dos fases. El procedimiento se puede ejecutar en modo por lotes o continuo. En la Tabla 11 se presentan las características de diseño del equipo.

Tabla 11. Características de diseño de los decantadores centrífugos.

Ítem	Características				
	Reacción		Refinación	Purificación	
	DC-101	DC-102	DC-104	DC-103	
Factor de instalación	2	2	2	2	
Factor de mantenimiento	0,1	0,1	0,1	0,1	
Factor de asignación de costos	1	1	1	1	
Tasa de uso	\$/e-h	100	100	100	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100	100	100	100
Material de Construcción	SS316	SS316	SS316	SS316	
Costo base	311000	315000	328000	174000	
De gama baja1	0	0	0.50	0	
De gama alta1	90000	150000	150000	150000	
Flujo volumétrico base	91,92	86,18	101,52	27,97	
Exponente	0,6	0,6	0,6	0,6	
Rendimiento nominal	L/h	6112,08	5987,67	7143,04	2044,84

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.5 Intercambiador de calor

En los sistemas mecánicos, químicos, nucleares y otros, ocurre que el calor debe ser transferido de un lugar a otro, o bien, de un fluido a otro. Los intercambiadores de calor son los dispositivos que permiten realizar dicha tarea. La función de los intercambiadores de

calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan (Llangarí & Solís, 2012).

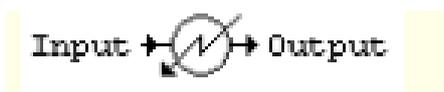


Ilustración 10. Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor en el proceso están diseñados para la función de calefacción y de enfriamiento en el retorno del metanol de la sección de purificación al recipiente de mezcla. En la Tabla 12 se presentan sus características de diseño.

Tabla 12. Características de diseño de los intercambiadores de calor.

Ítem	Unidades	Características					
		Reacción		Refinación		Purificación	
		HX-101	HX-102	HX-104	HX-105	HX-103	HX-106
Factor de		2	2	2	2	2	2
Factor de		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Factor de		1	1	1	1	1	1
Tasa de uso	\$/equipo-	100	100	100	100	100	100
Tasa de	\$/h	100	100	100	100	100	100
Material de		SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316
De gama baja		0	0	0	0	0	0
De gama alta		150	150	110	150	150	150
Área de la		1	3,48	4,5	0,13	1,4	2,9
Costo base		3000	9000	9000	2000	4000	13000
Exponente		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Área de transferencia de calor	m ²	4,1	5,26	5,36	0,87	3,8	3,336

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME
Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.6 Bomba centrífuga

Una bomba es una máquina que transforma energía mecánica en energía hidráulica. Una bomba centrífuga incrementa la energía de velocidad del fluido mediante un elemento rotante, aprovechando la acción de la fuerza centrífuga, y transformándola a energía potencial, aprovechando la acción de la fuerza centrífuga, y transformándola a energía potencial a consecuencia del cambio de sección transversal por donde circula el fluido en la parte estática (Moyano & Eugenia, 2015).

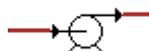


Ilustración 11. Bomba centrífuga

Las bombas centrífugas en cada proceso presentan diferencias el diseño que se encuentran especificadas en la Tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de diseño de las bombas centrífugas.

Ítem	Unidades	Características													
		Reacción					Refinación					Refinación			
		P-101	P-102	P-103	P-104	P-105	P-106	P-111	P-117	P-108	P-109	P-110	P-112	P-114	P-118
Factor de instalación		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Factor de mantenimiento		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Factor de asignación de Costos		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tasa de uso	\$/equipo-h	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Material de Construcción		SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316	SS316
De gama baja		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
De gama alta		320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320

Potencia base	0,07	0,01	0,54	0,12	0,1	0,54	0,6	0,59		0,23	0,23	0,05		0,05
Costo base	500	800	500	500	600	400	500	500	500	500	500	500	500	500
Exponente	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Potencia kW	0,09	0,01	0,76	0,16	0,01	0,76	0,79	0,79	0	0,28	0,27	0,21	0,01	0,07

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME
Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.7 Columna de destilación

Una columna de destilación se utiliza para representar un recurso de equipo que generalmente se utiliza para alojar un procedimiento de destilación con el objetivo principal de llevar a cabo el fraccionamiento de componentes volátiles. El procedimiento puede ejecutarse en modo discontinuo o continuo, dependiendo del modo de operación de la planta.

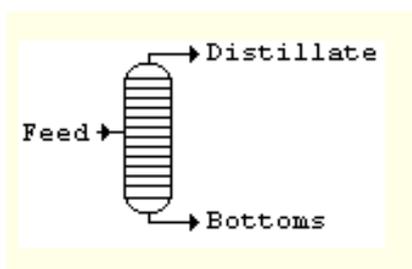


Ilustración 12. Columna de destilación

En la Tabla 14 se muestran las condiciones de operación de los equipos presentes en el proceso de producción. Las columnas de están diseñadas para soportar una presión de 21,76 psi. Tienen 13 etapas de 0,4m cada una. El diámetro total diseñado de la columna es 0,36m y una altura de 5,2m que son especificados por el usuario. El costo base es modificado de acuerdo al diámetro y a la altura de la columna además del material de construcción.

Tabla 14. Condiciones de diseño de las columnas de destilación.

Ítem	Unidades	Características	
		Refinación	
		P-101	P-102
Factor de instalación		2	2
Factor de mantenimiento		0,1	0,1
Factor de asignación de Costos		1	1
Tasa de uso	\$/equipo-h	100	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100	100
Material de Construcción		CS	CS
De gama baja		0	0
De gama alta		100	100
Volumen base		0,38	0,77
Costo base		113000	44000
Exponente		0,6	0,6
Presión de diseño	psi	21,76	21,76
Número real de etapas		13	13
Altura de la columna	m	5,2	5,2
Diámetro de la columna	m	0,36	0,48

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME
Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.8 Tanque flash

El tanque de flash se define como un tanque para la recogida de condensados en una caldera y poder aprovechar el vapor resultante y el agua caliente otro uso es la normalización de la temperatura de los vertidos antes de ser enviados al desagüe.

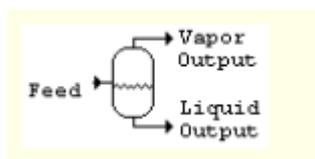


Ilustración 13. Tanque flash

En la Tabla 15 se muestran las características de diseño del recipiente que está diseñado para soportar un volumen de 5744,73L en un diámetro de 1,22m.

Tabla 15. Características de diseño del tambor de flash.

Ítem	Unidades	Características
		Refinación
		V-104
Factor de instalación		2
Factor de mantenimiento		0,1
Factor de asignación de Costos		1
Tasa de uso	\$/equipo-h	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100
Material de Construcción		CS
De gama baja		0
De gama alta		10
Volumen base		4,87
Costo base		15000
Exponente		0,6
Presión de diseño	psi	0,1
Altura de la columna	m	4,89
Diámetro	m	1,22
Volumen	L	5744,73

El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.5.9 Caja genérica

Para el diseño se utiliza una caja genérica continua 1x1 (GBX) para representar un recurso de equipo que generalmente se usa para alijar un procedimiento de paso continuo o de reacción continua con un solo puerto de entrada y un único puerto de salida. El procedimiento se puede ejecutar en modo por lotes o continuo.

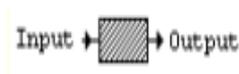


Ilustración 14. Caja genérica

La caja genérica aloja el paso continuo de vapor desde el tambor de flash, tiene un puerto de entrada y uno de salida. En la Tabla 16 se presentan las condiciones de diseño del equipo.

Tabla 16. Condiciones de diseño de la caja genérica.

Ítem	Unidades	Características
		Refinación
		GBX-101
Factor de instalación		2
Factor de mantenimiento		0,1
Factor de asignación de Costos		1
Tasa de uso	\$/equipo-h	100
Tasa de disponibilidad	\$/h	100
Material de Construcción		CS
De gama baja		0
De gama alta		720000
Flujo de masa base		122,18
Costo base		75000
Exponente		0,6
Rendimiento nominal	kg/h	111,34
El equipo está construido de acuerdo con los estándares ASME		

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.6 Balance de masa y energía

El diagrama de operaciones para el proceso de producción como ya se ha mencionado anteriormente en el software SuperPro Designer® para una capacidad de procesamiento 5000 kg/h de aceite crudo de palma africana. A continuación, se presentan los resultados de entradas y salidas de materia y energía por secciones.

4.1.6.1 Sección de reacción

La reacción del aceite de palma con el metanol y el catalizador se realiza en el reactor R-101 con una conversión lograda del 90% en un tiempo de residencia de 1 hora. Los tanques de almacenamiento operan en un régimen permanente, por lo tanto, las entradas son iguales a las salidas y la acumulación de flujo másico es 0. El primer reactor tiene dos corrientes de entrada. En la primera entrada ingresa un flujo másico de 848,41kg/h compuesto por 98% de aceite de metanol y 2% de $NaOCH_3$, la segunda entrada tiene un flujo másico de 5000 kg/h de aceite de palma. El flujo másico resultante está compuesto por 77% de diésel y 8% de glicerol. Resultando un residuo del 15% que contiene materia prima sin reaccionar, la

cual se centrifuga para separarse de la fase rica en glicerol. En el segundo reactor tiene dos corrientes de entrada; la primera corriente tiene un flujo másico de 94,27 kg/h compuesta por el 98% de metanol y el 2% de $NaOCH_3$ y la segunda corriente entrada tiene un flujo másico de 5235,53 kg/h compuesta por 2% de metanol, 10% de aceite de palma, 86% de biodiesel y 2% de glicerina. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el balance de energía de la reacción.

Tabla 17 Resumen de entradas y salidas de la sección de reacción

Equipo Compuesto	Entrada 1 (Kg)	Entrada 2 (Kg)	Salida 1 (Kg)
Tanque de Almacenamiento (TNK)			
TNK-101	S-104	S-161	S-107
Metanol	493,66	386,42	880,08
Agua		0,11	0,11
TNK-102	S-105		S-108
Metanol	46,86		46,86
NaOCH ₃	15,62		15,62
TNK-103	S-106		S-109
Aceite de Palma	5000		5000
Reactor (R)			
R-101	S-114	S-116	S-101
Metanol	834,25		347,78
NaOCH ₃	14,06		14,06
Agua	0,1		0,1
Aceite de Palma		5000	518,27
Diésel			4502,08
Glicerina			466,12
R-102	S-115	S-120	S-126
Metanol	92,69	90,78	132,9
NaOCH ₃	1,56	3,67	5,23
Agua	0,01	0,03	0,04
Aceite de Palma		517,75	51,78
Diésel		4501,63	4969,72
Glicerina		121,67	170,13

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.6.2 Sección de refinación del biodiesel

En la Tabla 18 se presenta el resumen de las entradas y salidas de la sección de refinación del biodiesel. El recipiente de mezcla tiene 3 corrientes de entrada. La primera corriente de entrada comprende un flujo másico de 203,86 kg/h compuesto por el 99% de agua y el 1% de HCl. La segunda entrada comprende un flujo másico de 5394,08kg/h compuesto por el 92% de diésel, el 2% de glicerina, el 1% de aceite de palma, el 1% de metanol y el 4% de HCl, agua, y $NaOCH_3$. Dando como resultado un flujo másico de 6408,01kg/h compuesto por el 78% de diésel, el 19% de agua, el 1% de aceite de palma, el 1% de glicerina y el 1% de metanol. Los tanques de almacenamiento operan en un régimen permanente, por lo tanto, las entradas son iguales a las salidas y la acumulación de flujo másico es 0.

Tabla 18. Resumen de entradas y salidas de materia en la sección de refinación de biodiesel.

Equipo Compuesto	Entrada 1 (Kg)	Entrada 2 (Kg)	Entrada 3 (Kg)	Salida 1 (Kg)
Recipiente de Mezcla (V)				
V-102	S-130	S-131	S-160	S-135
HCl	2,91			0,97
Agua	200,95	0,02	0,04	1214,67
Aceite de Palma		51,72		51,72
Diésel		4969,22		4969,22
Glicerina		93,42	0,05	93,47
Metanol		72,97	0,04	74,72
NaOCH ₃		2,87		3,11
Tanque de Almacenamiento (TNK)				
TNK-104	S-102			S-154
HCl	0,09			0,09
Agua	0,07			0,07
Aceite de Palma	46,55			46,55
Diésel	4968,73			4968,73
Glicerina	8,57			8,57
Metanol	6,85			6,85
NaCl	0,29			0,29

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.6.3 Sección de purificación del glicerol

El recipiente de mezcla recibe tres corrientes de entrada. La primera corriente comprende un flujo másico de 612,88kg/h compuesto por 56% de glicerina, 42% de metanol y 2% de $NaOCH_3$. La segunda corriente esta compuesta por un flujo másico de 139,6 kg/h compuesto por el 55% de glicerina, el 43% de metanol y el 2% de $NaOCH_3$. La tercera corriente de entrada esta compuesta por el 87% de agua, el 7% de glicerina, el 5% de metanol y el 1% de HCl. Dando una corriente resultante de 2028,55 kg/h compuesta por el 55% de agua, el 25% de glicerina, y el 19% de metanol.

El recipiente de mezcla tiene dos corrientes de entrada. La primera corriente de entrada recibe un flujo másico de 2,12 kg/h de $NaOCH_3$. La segunda corriente de entrada comprende un flujo másico de 1964,91kg/h compuesto por el 56% de agua, el 23% de glicerina, el 20% de metanol y el 1% de NaCl. Dando como corriente resultante un flujo másico de 1967,03kg/h compuesto por el 56% de agua, el 23% de glicerina, el 20% de metanol y el 1% de NaCl. La Tabla 19 presenta el resumen de masa y energía.

Tabla 19. Resumen de entradas y salidas de materia en la sección de purificación de glicerol.

Equipo Compuesto	Entrada 1 (Kg)	Entrada 2 (Kg)	Entrada 3 (Kg)	Salida 1 (Kg)
Recipiente de Mezcla (V)				
V-101	S-121	S-132	S-137	S-127
HCl			10,45	1,85
Agua	0,074	0,017	1121,03	1121,12
Aceite de Palma	0,518	0,052	5,17	5,74
Diésel	0,45	0,497	0,5	1,44
Glicerina	344,447	76,712	84,89	506,05
Metanol	257,002	59,922	67,86	392,35
NaOCH ₃	10,389	2,359		
NaCl			2,82	
V-103	S-129	S-134		S-138
NaCl		16,37		19,29
NaOH	2,12			0,12

HCl	1,82	
Agua	1104,68	1105,58
Aceite de Palma	0	0
Diésel	0	0
Glicerina	455,45	455,45
Metanol	386,59	386,59
Tanque de Almacenamiento (TNK)		
TNK-105	S-152	FATTYM
NaCl	0,24	0,24
HCl	0,03	0,03
Agua	16,44	16,44
Aceite de Palma	5,74	5,74
Diésel	1,44	1,44
Glicerina	50,61	50,61
Metanol	5,75	5,75
TNK-106	S-156	S-157
NaOH	0,12	19,29
NaCl	19,29	0,12
Agua	91,75	91,75
Aceite de Palma	0	0
Diésel	0	0
Glicerina	455,4	455,4
Metanol	0	0

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7 Análisis de las condiciones de operación

En esta sección se presentan las condiciones de operación de los equipos utilizados en el proceso de producción de biodiesel. En primer lugar, se presentan las condiciones de los equipos utilizados en el almacenamiento, la reacción y la separación de los fluidos. Luego se realiza la descripción de los equipos de los componentes que realizan los procesos de transferencia e intercambio de calor. El diseño no se ha modelado con el tiempo de configuración de los equipos antes de la operación. A continuación, se presentan las condiciones de operación de cada equipo.

4.1.7.1 Tanque de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento trabajan con operaciones inicializadas por el usuario. En la Tabla 20 se muestra las condiciones de operación en el tanque de almacenamiento la temperatura de salida del contenido después de la operación, el volumen de trabajo del contenido del recipiente, el volumen de trabajo mínimo permitido.

Tabla 20. Condiciones de operación del tanque de almacenamiento.

Sección Condiciones de operación	Unidades	Reacción			Refinación	Purificación	
		P-4	P-5	P-6	P-39	P-40	P-41
Relación de volumen de trabajo a recipiente	%	90	90	90	90	90	90
Trabajo mínimo al volumen total	%	15	15	15	15	15	15
Trabajo máximo al volumen total	%	90	90	90	90	90	90
Temperatura de salida	°C	42,40	25,07	25,02	21,11	25,04	127,79
Presión final	psi	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
Modo térmico	%	15	15	15	15	15	15

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7.2 Reactor

Los reactores reaccionan continuamente con una relación de volumen de trabajo a recipiente del 75% en condiciones adiabáticas a una presión de 64,7 bar. La operación es inicializada por el usuario. En la Tabla 21 se presentan las condiciones de operación de los reactores. Los reactores agitados manejan las transformaciones continuas de los materiales. En un tiempo de residencia del material es de 1h trabajan con un flujo volumétrico de 6648,47L/h dando una relación máxima de volumen de trabajo a recipiente de 88,64L equivalentes al 75% de relación. La temperatura final del flujo después de la primera reacción es de 91,67°C y en la segunda reacción disminuye a 64,75°C bajo condiciones adiabáticas con un consumo

de energía del 15% con una presión final de 64,70 psi en la primera reacción y 14,70 psi en la segunda reacción.

Tabla 21. Condiciones de operación de los reactores.

Sección Condiciones de operación	Unidades	Reacción	
		P-13	P-16
Relación de volumen de trabajo a recipiente	%	75	75
Volumen mínimo total de trabajo	%	15	15
Volumen máximo total de trabajo	%	90	90
Temperatura final	°C	91,67	64,75
Presión final	psi	64,70	14,70
Modo térmico	%	15	15
Tiempo de reacción	min	60	60
Extensión de la reacción	%	89,63	90
Compuesto de referencia de la reacción		Aceite de Palma	Aceite de Palma
Alcance de la reacción	%	89,63	90

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7.3 Recipiente de mezcla

En el recipiente de mezcla tienen lugar las reacciones secuenciales a las que se dan en el reactor agitado. El tiempo de residencia del material es de 0,25h y el flujo volumétrico con el que se alimenta es 1785,85L/h dando una relación máxima de volumen de trabajo a recipiente de 19,86L equivalentes al 90% de relación. La temperatura final del flujo después de la primera reacción es de 35,40°C y en las reacciones de la purificación del glicerol es de 25°C bajo condiciones adiabáticas con un consumo de energía del 15% con una presión final de 14,70 psi. En la Tabla 22 se presentan las condiciones de operación de los equipos en sus rangos específicos.

Tabla 22. Condiciones de operación para el recipiente de mezcla.

Sección Condiciones de operación	Refinación Unidades	Purificación		
		P-21	P-18	P-25
Relación de volumen de trabajo a recipiente	%	90	90	90
Volumen mínimo total de trabajo	%	15	15	15
Volumen mínimo total de trabajo	%	90	90	90
Temperatura final	°C	35,40	25,01	25
Presión final	psi			14,70
Modo térmico	%	15	15	15
Tiempo de reacción	min	60	60	60
Extensión de la reacción especificada	%	100	100	100

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7.4 Decantador centrífugo

El decantador centrífugo realiza el proceso de centrifugación para separar las fases líquidas de las fases aceitosas basándose en la diferencia de densidad de las mismas. Todas las unidades son asépticas. En la Tabla 23 se presentan las condiciones de operación de los equipos.

Tabla 23. Condiciones de operación para el decantador centrífugo.

Sección Condiciones de operación	Reacción Unidades	Refinación		Purificación	
		P-14	P-19	P-26	P-24
Densidad líquida	g/L	1000	1000	1000	1000
Viscosidad líquida	cP	1,5	1,5	1,5	1,5
Diámetro del glóbulo de aceite	micron	20	20	20	20
Densidad del glóbulo de aceite	g/L	900	900	900	900
Eficiencia	%	30	30	30	30
Aceite en la corriente de aceite	g/L	850	850	855	800
Sólidos en la corriente de lodo	g/L	150	150	150	150
Temperatura de salida	°C	25	25	25	25

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7.5 Intercambiador de calor

El intercambiador de calor modela el aumento o la disminución de temperatura en un flujo continuo, el calor es proporcionado por un agente de calentamiento que es definido por el usuario. En la Tabla 24 se presentan las condiciones de operación de los equipos en las secciones de reacción realizan la operación de calefacción y en la sección de purificación de enfriamiento.

Tabla 24. Condiciones de operación para el intercambiador de calor.

Sección Condiciones de operación	Unidades	Reacción		Refinación		Purificación	
		P-12	P-15	P-29	P-30	P-28	P-41
				Calefacción			Enfriamiento
Temperatura de entrada	°C	25	25	25	95,4	25	64,4
Temperatura de salida	°C	60	60	95,42	101,67	80,56	60
Eficiencia	%	100	90	90	85	100	100
Coficiente de		1500	1500	1500	1500	1500	340,70
Agente de calefacción	Watt/m2-	Vapor reciclado	Metanol	Vapor reciclado	150 psi de Vapor	Vapor reciclado	
Agente refrigerante							CT Agua 2

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7.6 Columna de destilación

En la columna de destilación se lleva a cabo el fraccionamiento de materiales, el procedimiento se ejecuta en modo continuo. En el interior de la columna de destilación tienen lugar la eliminación de componentes ligeros de la fase líquida y la condensación de componentes pesados de la fase de vapor. Las columnas de destilación para este proceso de producción tienen una alimentación. En la Tabla 25 se presentan las condiciones de operación de la columna de destilación.

Tabla 25 Condiciones de operación de las columnas de destilación

Sección Condiciones de operación	Unidades	Purificación	
		P-32	P-34
Relación R/Rmin		16,867	1,23
Calidad de alimentación	%	100	100
Theta		0	0
Posición de alimentación	(top tray = 1)	1	1
Temperatura del condensador	°C	64,44	100
Temperatura de la caldera	°C	102,44	127,74
Presión	psi	14,94	14,94
Velocidad lineal	m/s	2,52	2,99
Agente de calefacción (Intercambiador de calor):		150 psi de Vapor	Vapor 1268
Agente de enfriamiento (Condensador):		CT Agua	CT Agua
Clave de luz:		Metanol	Agua
Clave pesada:		Agua	Glicerina
Eficiencia de la etapa	%	40	80
Fracciones de componentes en destilación			
Aceite Palma	%	0	0
Cloruro Sodio	%	0	0
Diésel	%	0	0
Glicerina	%	0	0,01
HCl	%	0	0
Hidróxido Sodio	%	0	0
Metanol	%	99,99	99,99
NaOCH ₃	%	0	0
Nitrógeno	%	0	0
Oxígeno	%	0	0
Agua	%	0,01	91,7

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7.7 Bomba centrífuga

La bomba centrífuga realiza la transferencia continua de fluidos mediante un bombeo centrífugo. En la Tabla 26 se presentan condiciones de operación. La bomba aumenta la presión del flujo másico a 50 psi con una eficiencia del 70%. La operación es inicializada por el usuario.

Tabla 26. Condiciones de operación para bombas.

Condiciones de operación	Unidades	Condición
Eficiencia de bombeo	%	70
Cabezal de presión	psi	50

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

4.1.7.8 Sistema de secador de vacío

El sistema de secador de vacío consta de un tambor de flash que separa los flujos y una caja genérica de una sola entrada y salida que trabajan en un tiempo de residencia de 0,5h con un agente de transferencia de calor de 150 psi de vapor bajo condiciones adiabáticas. A una presión de 0,2 bar. En la Tabla 27 se muestra una lista de las condiciones de operación del sistema.

Tabla 27. Condiciones de operación para el secador de vacío.

Sección	Refinación
Condiciones de operación	Unidades
Tiempo de residencia	h
Trabajo mínimo al volumen total	%
Trabajo máximo al volumen total	%
Temperatura final	°C
Modo	Adiabático
Presión	bar
Agente de transferencia de calor	150 psi de vapor
Fugacidad de vapor	Soave-Redlich-Kwong
Fugacidad líquida	Soave-Redlich-Kwong
Densidad del vapor	Gas ideal
Densidad líquida	Soave-Redlich-Kwong
Entalpía de vapor	Gas ideal
Entalpía líquida	Soave-Redlich-Kwong

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

La temperatura final del contenido después de la operación es de 102,7 °C. Con vapor a 150 psi de presión como agente de transferencia de calor. La fugacidad de vapor y líquida, la densidad y la entalpía líquidas están relacionadas con la ecuación de estado Soave-Redlich-Kwong que se calcula mediante la fórmula:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a(T^{-0.5})}{V_m(V_m + b)}$$

Ecuación 1 Ecuación de estado Soave-Redlich-Kwong

Dónde:

P = presión del gas

R = constante de los gases

T = temperatura

V_m = volumen molar

a = constante de corrección de la atracción potencial de las moléculas mediante la fórmula:

$$a = \frac{1}{9(\sqrt[3]{2} - 1)} \frac{R^2 T_c^{2.5}}{P_c} = 0,42748 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{P_c}$$

Ecuación 2 Constante de corrección de la atracción potencial de las moléculas

b = constante de corrección de volumen mediante la fórmula:

$$b = \frac{\sqrt[3]{2} - 1}{3} \frac{RT_c}{P_c} = 0,08664 \frac{RT_c}{P_c}$$

Ecuación 3 Constante de corrección de la atracción potencial de las moléculas

Dónde:

T_c = temperatura en el punto crítico

P_c = presión en el punto crítico

Las operaciones se han realizado en condiciones adiabáticas es decir que las corrientes de fluidos no realizado un intercambio de calor durante el proceso.

La implementación de este proceso de producción requiere 13,315.244\$ de inversión.

4.2 DISCUSIÒN

Este proyecto de investigación tuvo como objetivo recopilar los datos necesarios para modelar un diseño de un sistema de producción de biodiesel a partir de aceite de palma como una alternativa al uso de combustibles fósiles. Sobre todo, se pretendió investigar la situación de la producción de biodiesel a nivel mundial, regional y local. Además se ha identificado la disponibilidad de materia prima para la producción de este biocombustible en Ecuador.

Los resultados de este proyecto de investigación reflejan que los países europeos lideran la producción mundial de biodiesel debido a los fuertes impulsos frente a los altos precios del diésel, seguido por América Latina que cuenta con plantas de producción en Brasil y Colombia. A diferencia de Ecuador que cuenta con una escasa producción de biodiesel en una sola planta de producción.

En los últimos años la producción de palma africana se ha expandido exponencialmente dando lugar a la producción de 212.068 TM excedentes que son destinadas a la exportación. Por lo tanto y con el fin de dar un valor agregado a esta producción excedente se ha propuesto un sistema de producción de biodiesel a partir de este recurso.

La empresa DANEC cuenta con una alta producción generada por una de sus más grandes extractoras, Palmeras del Ecuador S.A ubicada en el cantón Shushufindi, provincia de Sucumbíos que cuenta con 14.000 has de producción y una capacidad extracción de 75 toneladas fruto/hora teniendo como producción estimada anual de más de 20.000 toneladas de aceite de las cuales se han tomado 5818 toneladas métricas. Por lo que se puede afirmar que si es factible el desarrollo de un proceso tecnológico de producción de biodiesel a partir de aceite de palma en el cantón Shushufindi.

En base a la literatura revisada para la elaboración de este proyecto se menciona que el biodiesel está formado por una mezcla de mono alquil ésteres de ácidos grasos que se

obtienen de la reacción de transesterificación a partir un triglicérido, y un alcohol monovalente, en presencia de un catalizador básico (Benjumea, Agudelo, y Ríos, 2009).

La reacción de transesterificación es el método más utilizado en la actualidad porque es el más económico, además tiene una elevada conversión con pocas reacciones secundarias y un mínimo tiempo de reacción y conversión directa.

En base a lo anterior en el epígrafe 4.1.3 se explica el proceso de producción desarrollado a partir de la mezcla de aceite de palma y metanol en presencia de un catalizador, provocando la reacción de transesterificación. Además, se menciona que el proceso genera glicerol como subproducto y en este sentido la reacción química de biodiesel se ha dividido en tres secciones: reacción, refinación de biodiesel y purificación de glicerol como se presenta en la Ilustración 5.

En la sección de reacción el metanol alimentado al 300% con relación a la cantidad estequiometría molar reacciona con el aceite de palma produciendo biodiesel y glicerol, en la sección de refinación la corriente de biodiesel se separa del de las trazas de aceite de palma, catalizador y glicerol. En la sección de purificación el glicerol se separa del metanol disuelto y las impurezas.

Los equipos para el desarrollo de este proceso están diseñados para una capacidad de procesamiento de 5000kg/h de aceite crudo de palma bajo los estándares de la norma técnica ASME. Están diseñados en acero inoxidable y al carbono. Cabe destacar que en el sistema no existen unidades en espera ni escalonadas, el costo de la compra de las mismas se basa en la capacidad, el material y la estandarización. En el sistema no se ha modelado el tiempo de configuración de ningún equipo.

En comparación con un estudio realizado por (Sacoto, 2018) en la provincia de Esmeraldas concuerda con el resultado de que en Ecuador si existe disponibilidad de materia prima y que el aceite de palma tiene el rendimiento para una producción eficiente.

En otro estudio realizado por (Freire, 2018) que ha realizado optimización del proceso mediante la simulación en Santo Domingo de los Tsachilas a través del software SuperPro Designer V.9.5 en donde se tomó al déficit de procesos de producción como una oportunidad para la implementación de los mismos, además el software permite implementar oportunidades de mejora con las que se incrementa la eficiencia del proceso. De los resultados obtenidos en este estudio se ha determinado la producción anual de 10`247.880 litros de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* en un tiempo de reacción de 90 minutos.

Por último, se recomienda que para estudios posteriores se pueda hacer el mismo diseño del proyecto con otras materias primas disponibles en Ecuador, esto con la finalidad de investigar si es factible la producción de biodiesel a partir de las mismas y garantizar la producción de energías alternativas en el país.

CAPITULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Por medio de la investigación bibliográfica en libros, revistas, tesis, artículos científicos, etc. se recopilaron datos que se utilizaron como base para desarrollar el diseño de la propuesta tecnológica de producción de biodiesel a partir de aceite de palma (*Elaeis guineensis*), donde se conoce que los países europeos lideran la producción de biodiesel, mientras que en nuestro país existe una escasa producción de biodiesel siendo la Empresa “La Fabril” la única productora y exportadora de este tipo de combustible desde el año 2005.
- Al utilizar el biodiesel se disminuye la cantidad de emisiones de CO₂ ya que el CO₂ contenido en los biocombustibles es el que capturaron los cultivos en su ciclo de vida, de tal manera que al quemar el biocombustible se regresa a la atmósfera una cantidad de CO₂ que pertenece a su equilibrio y que será vuelta a capturar por las plantas. Mientras que los combustibles fósiles contienen CO₂ que ha permanecido almacenado en el subsuelo por miles de años, que al ser combustionados el carbono contenido en el combustible pasa a ser parte de la atmósfera aumentando la cantidad de este gas, en la actualidad este CO₂ de origen fósil está generando un desbalance provocando lo que se conoce como calentamiento global.
- Se concluye que el método más utilizado y eficiente para producir biodiesel a partir de aceite de palma africana, se lo realiza mediante el método de la transesterificación, por sus ventajas de costo, tiempo corto de reacción y conversión directa. Donde las materias primas necesarias para el proceso de producción de biodiesel son: cloruro

de hidrógeno (HCl), agua, metanol, metóxido de sodio ($NaOch_3$), aceite de palma e hidróxido de sodio ($NaOH$).

- El diseño in silico de un proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma en el cantón Shushufindi por medio del simulador informático *Superó Designer*, se creó bajo los estándares ASME. El diseño del proceso de producción de biodiesel tiene la capacidad para tratar 5000 kg/h de aceite crudo de palma africana, teniendo como resultado 5031, 14 kg/h de producción de biodiesel.
- Para la modelación del sistema de producción de biodiesel a partir del aceite de palma africana mediante el software de simulador químico SuperPro Designer®, se requirió dividir en tres secciones: reacción, refinación de biodiesel y purificación de glicerol. Los equipos utilizados fueron: tanque de almacenamiento, reactor agitado, recipiente de mezcla, decantador centrifugo, intercambiador de calor, bomba centrifuga, columna de destilación, tanque flash y caja genérica.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda implementar industrias de producción de biodiesel ya que permitirá incrementar la economía de nuestro país y contribuir a disminuir los efectos de la contaminación ambiental global.
- Se recomienda utilizar como materia prima para la producción de biodiesel el aceite de palma ya que es uno de los principales aceites que se comercializan en el mundo, esto permitirá reducir el costo de producción de biodiesel y ser una opción viable para la sustitución de diésel.
- El software Superó Designer, es recomendado porque dispone de herramientas para la estimación de balances de masas y costos, que permite conocer la factibilidad y viabilidad de implementar procesos productivos de biodiesel u otros.

CAPITULO VI

6 BIBLIOGRAFIA

- Acosta, W. (19 de Septiembre de 2019). *Situación actual y perspectivas del cultivo de palma aceitera en el Ecuador*. Obtenido de ANCUPA.
- AEXPALMA. (2017). *Censo Palmero 2017*. Obtenido de Asociación Ecuatoriana de Extractoras de Palma y sus derivados: <http://aexpalma.com/datos-censo-palmero-2017/>
- Aguinaga, D. (2015). Análisis de la cadena productiva palma africana – aceite – biodiesel, para la comercialización progresiva de eco diésel en el país. *Programa de Maestria*. (U. A. Bolivar, Ed.) Quito, Ecuador.
- Alarcón, N., & Guayaquil, R. (2011). *Analisis de alternativas de aceite vegetal para la producción de biodiesel en el Ecuador*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- Arancibia, Y., & Calero, T. (201). *Obtención de biodiesel a partir de aceite de semillas oleaginosas de la provincia de Chimborazo*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Ávila y Lugo, J. (2004). *Introducción a la Economía* (Tercera ed.). Mexico, México: Plaza y Valdés S.A.
- Benavides, A., Benjumea, P., & Pashova, V. (noviembre de 2007). El biodiesel de aceite de higuierilla como combustible alternativo para motores diesel. *DYNA*, 74(153), 141-150.

- Benjumea, P., Agudelo, J., & Corredor, L. (2003). Biodiesel de aceite de palma: una alternativa para el desarrollo del país y para la autosuficiencia energética nacional. *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*(28), 50-61.
- Benjumea, P., Agudelo, J., & Corredor, L. (2003). *Biodiesel de aceite de palma: una alternativa para el desarrollo del país y para la autosuficiencia energética nacional*.
- Benjumea, P., Agudelo, J., & Ríos, A. (2009). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización*. (Primera ed.). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Bermúdez, L., & Carreño, D. (2011). Hacia el uso de la simulación como herramienta para el análisis de proyectos de inversión. *Revista de investigación desarrollo e innovación, 1*(2), 40-52.
- Bermúdez, L., & Carreño, D. (2011). Hacia el uso de la simulación como herramienta para el análisis de proyectos de inversión. *Revista de Investigación en Innovación y Desarrollo Productivo, 1*(2), 40-52.
- BP Statistical. (2019). BP Statistical Review of World Energy. (68). Obtenido de BP Statistical.
- Castellar, G., Angulo, E., & Cardozo, B. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos . *Prospect, 12*(2), 90-104.
- Castro, C., Beltran, L., & Ortiz, J. C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética? *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable, 8*(3), 93-100.
- Cera, C., & Iglesias, E. (2014). Programa de especialización en ingeniería de procesos de refinación de petróleos y petroquímica básica. *Simulación en estado estacionario de la planta de producción de biodiesel y glicerina cruda de la empresa*

Biocombustibles Sostenibles del Caribe S.A mediante el software especializado UNISIM R390. Cartajena de Indias, Colombia: Universidad Buenaventura.

Chacón, L. (2017). *Estudio de los parámetros de reacción para la producción de biodiesel en condiciones no convencionales a partir de aceite de palma.* Latacunga, Cotopaxi, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas.

Chacón, L. (2017). Estudio de los parámetros de reacción para la producción de biodiesel en condiciones no convencionales a partir de aceite de palma. *Trabajo de titulación.* Latacunga, Cotopaxi, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas.

Chaplin, M. (2018). Enzyme Technology. Continuous flow stirred tank reactor. *Reactor Theory and Practice.*

Chavéz, G., Gallegos, R., & Tapia, M. (2010). Proyecto de desarrollo de una Refinería de Biodiesel, por medio de la producción existente de Palma Africana, para su comercialización en el ciudad de Quito. *Tesis.* Guayaquil, Guayas, Ecuador: ESPOL.

Chuquín, D. (2013). *Diseño y simulación de una columna de destilación binaria de etanol-agua para la empresa HETWEEN.* Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Codex Alimentarius. (2016). Norma para Aceites Vegetales Especificados. *CODEX STAN 210.* Recuperado el 1999

Cortes, B., Martinez, A., Rodriguez, M., Rodríguez, A., & Amaury, P. (2018). Simulación de una planta de producción de aceite de moringa empleando el simulador de procesos Superpro Designer. *Tecnología Química.*

Cunill, F., Iborra, M., Tejero, J., Izquierdo, J., & Fité, C. (2010). Reactores Químicos. *Catálisis y Cinética Aplicada*, 1-89.

- DANEC. (2014). *DANEC*. Obtenido de DANEC: <https://www.danec.com/wp-content/uploads/2017/02/INFORME-DE-RESPONSABILIDAD-SOCIAL-2014.pdf>
- FEDEPAL. (2013). Fundación de fomento de las exportaciones de aceite de palma y sus derivados de origen nacional. Obtenido de <http://fedapal.com>
- FEDEPALMA. (2019). *Desafío de sostenibilidad de la agroindustria de la palma de aceite frente al parlamento Europeo*. Obtenido de Federación Nacional de Cultivadores de Aceite de Palma: <http://web.fedepalma.org/>
- Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. (12 de septiembre de 2012). *Cifras informativas del Sector Biocombustibles biodiesel de palma de aceite*. Obtenido de Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia: <http://www.fedebiocombustibles.com>
- Ferrari, L. (2013). Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), 36-40.
- Fontalvo, M., Vecino, R., & Barrios, A. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *12(1)*, 90-98.
- Fontalvo, M., Vecino, R., & Barrios, A. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospect*, 90-98.
- Forero, C. I. (2016). *Hablemos de diseño de industria*. Bogotá: cdd745.2.
- Foster, S., & Elzinga, D. (2018). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible*.

- Freire, C. (2018). *Optimización del proceso de obtención de biodiesel de una empresa, mediante simulación*. Quito, Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- Gesteiro, E., Galera, J., & Gonzales, M. (2018). Aceite de palma y salud cardiovascular: consideraciones para valorar la literatura . *Nutrición hospitalaria* , 1229-1242.
- González, C. (2014). La Fabril llena más tanques con biodiesel. (R. Líderes, Entrevistador)
- Guerrero, M., Hernandis, B., & Agudo, B. (2014). Estudio comparativo de las acciones a considerar en el procesode diseño conceptual desde la ingeniería y el diseño de productos. *INGENIARE. Revista Chilena de Ingeniería*, 22(3), 398-411.
- Llangarí, V., & Solís, G. (2012). Diseño térmico e hidráulico de un intercambiador de coraza y tubos. *Tesis de grado*. Riobamba, Ecuador.
- Medina, E., Chávez, N., & Jáuregui, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*(55), 62-77.
- Mingorance, F., Minelli, F., & Le Du, H. (febrero de 2004). Cultivo de la Palma Africana en El Chocó. (1). (E. Laos, Ed.) Colombia. Obtenido de Human Rights Everywere.
- Moreno, J. (Abril de 2019). Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de aguas amargas proveniente de la refinación del petróleo aplicando el simulador Aspen Plus® . *Trabajo de titulación*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Moyano, J., & Eugenia, N. (2015). Automatización de la adquisiscion de datos en un banco de pruebas de bombas centrífugas instaladas en seria y paralelo. *Tesis de grado*. Riobamba, Ecuador.
- Murillo, J. (Agosto de 2004). Producción de biodiesel a partir de aceite de palma. *PALMAS*, 25(4), 31-32. Recuperado el Agosto de 2003

- Murillo, J. (2004). Producción de biodiesel a partir de aceite de palma. *PALMAS*, 25(4).
- Pacheco, M. (28 de Marzo de 2019). Monto de subsidios de los combustibles sube 22% en Ecuador. *EL COMERCIO*.
- Paredes, V. (2015). *Estado del desarrollo de biocombustibles en Ecuador* . Obtenido de www.olade.org
- Peña, E., Pérez, A., Miranda, A., & Sánchez, J. (diciembre de 2008). Modelado de un reactor químico tipo CSTR y evaluación de control predictivo aplicando Matlab-Simulink. *Revista INGENIERA UC*, 15(3), 97-112. Obtenido de revistaing@uc.edu.ve
- Pérez, A., Montero, G., Ayala, R., Coronado, M., García, C., & Campbell, H. (2015). Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diesel-biodiesel. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(1).
- ProEcuador. (2013). Biocombustibles ProEcuador. *Biocombustibles*, 1-26.
- Ramos, F., Díaz, M., & Villar, M. (2016). *Biocombustibles*. Obtenido de Repositorio Institucional CONICET digital [b: ri.conicef.gov.ar](http://ri.conicef.gov.ar)
- Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente* (Primera ed.). Catalunya: Ediciones UPC.
- Riera, P., García, D., Kristöm, B., & Brännlund, R. (2016). *Manual de ECONOMÍA AMBIENTAL Y DE LOS RECURSOS NATURALES* (Tercera ed.). Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Rincón, S., & Martínez, D. (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *PALMAS*, 30(2), 11-23.

- Robalino, C. (2009). *Elaboración de un manual de operación de un reactor experimental de transesterificación para la obtención de biodiesel proveniente de aceite vegetal*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral .
- Rodriguez, J., & Fernando, V. (1994). *Análisis y diseño de un separador centrífugo de sólidos para el jugo de caña en el ingenio cauca* . Obtenido de Corporación Universitaria Autónoma de Occidente. División Ingenierías.
- Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat*, 104(2), 331-335.
- Rosero, J. P. (Diciembre de 2010). Caracterización del sector de la Palma aceitera en Ecuador. *Caracterización del sector de la Palma aceitera en Ecuador*. Zamorano, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana.
- Ruck, G., Sedano, D., & Tolentino, S. (2007). *Balance de materia y energía*. Obtenido de Universidad Nacional de Callao.
- Sacoto, M. (2018). *Régimen económico -plan de inversión de una planta refinadora de aceite de palma africana en la ciudad de Esmeraldas*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- Salinas, E., & Gasca, V. (septiembre-octubre de 2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*(157), 75-82.
- Salinas, E., & Gasca, V. (2009). Los biocombustibles. *El cotidiano*(157), 75-82. Obtenido de www.redalyc.org
- Sequeira, A., Polich, N., Morales, W., & Chamorro, E. (2011). Primeros pasos en la Obtención de biodiesel utilizando un reactor continuo de construcción sencilla. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.

- Sierra, J., L. S., & Olivero, J. (Mayo-Agosto de 2017). Potencial económico de la palma aceitera (*Eleais guinnensis* Jacq). *Agronomía Mesoamericana*, 2(28), 523-534. doi:10.155177/ma.v28i2.25927
- Tejada, C., Tejada, L., Villabona, A., & Monroy, L. (2013). OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE DIFERENTES TIPOS DE GRASA RESIDUAL DE ORIGEN ANIMAL. *Luna Azul*(36), 10-25.
- Toselli, L. A., Monesterolo, V. M., & Beltran, R. A. (2009). Aplicación del Simulador ChemCADTM en la Enseñanza en Carreras de Ingeniería. *Formacion Universitaria*, 19-24. Obtenido de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062009000300004>
- Valdés, O., & Palacios, O. (2 de febrero de 2016). Evolución y situación actual de plantaciones para biocombustibles perspectivas y retos para México. *Agroproductividad*, 9(2), 33-41.
- Vázquez, D. (2014). *Biodiesel a partir de palma de aceite en el transporte mexicano*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vega, O. (2010). *Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel*. Obtenido de www.iica.int.
- Velasquez, M. (2018). *Simulación a partir de parámetros en la elaboración de biodiesel a partir de aceite de algodón (Gossypium herbaceum) y su analisis económico - ambiental IQUITOS 2011*. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
- Villegas, L. (2007). "Simulación en HYSYS de los procesos productivos de ENAP MAGALLANES". *Trabajo de titulación*. Chile.

CAPITULO VII

7 ANEXOS

ANEXO 1. Propiedades de algunos aceites vegetales

Tipo de aceite	Especie	Densidad(g/cm^3)	Punto de inflamación ($^{\circ}C$)	Viscosidad cinética (cst a $40^{\circ}C$)	Acidez (KOH/g)
	Soya	0,91	254	32,9	0,2
Aceite comestible	Girasol	0,92	274	32,6	0,15
	Palma africana	0,92	267	39,6	0,1
	Maíz	0,91	277	34,9	0,11
Aceite no comestible	Jatropha curcas	0,92	225	29,4	28
	Palanga	0,90	221	72,0	
	Mango marino	0,92	.	29,6	

Fuente: (Castellar, Angulo, & Cardozo, 2014)

ANEXO 2. Listado de los equipos

Nombre	Tipos	Unidades	En espera /Escalonado	Tamaño/ Volumen	Unidades	Material de Construcción	Costo de la Compra (\$/Unidad)
HX-101	Intercambiador de calor	1	0/0	4,10	m^2	CS	9000
R-101	Reactor agitado	1	0/0	8,89	m^3	SS316	80000
DC-101	Decantador centrífugo	1	0/0	6,11	l/h	SS316	410000
TNK-101	Tanque de almacenamiento	1	0/0	27,32	m^3	SS316	34000
TNK-103	Tanque de almacenamiento	1	0/0	3337,7	m^3	SS316	653000
TNK-102	Tanque de almacenamiento	1	0/0	11,34	m^3	SS316	27000
R-102	Reactor agitado	1	0/0	8,09	m^3	SS316	70000
DC-102	Decantador centrífugo	1	0/0	5,98	m^3/h	SS316	427000
DC-104	Decantador centrífugo	1	0/0	7,14	m^3/h	SS316	448000
V-102	Reactor agitado	1	0/0	1,98	m^3	SS316	45000
V-101	Reactor agitado	1	0/0	1,02	m^3	SS316	8000
DC-103	Decantador centrífugo	1	0/0	2,04	m^3/h	SS316	243000
V-103	Reactor agitado	1	0/0	0,98	m^3	SS316	9000
C-101	Columna de destilación	1	0/0	0,53	m^3	CS	172000
C-102	Columna de destilación	1	0/0	0,95	m^3	CS	62000
HX-105	Intercambiador de calor	1	0/0	0,88	m^2	CS	8000
V-104	Tambor de Flash	1	0/0	5,74	m^3	CS	21000
HX-103	Intercambiador de calor	1	0/0	3,80	m^2	CS	9000
HX-102	Intercambiador de calor	1	0/0	5,26	m^2	CS	14000
HX-104	Intercambiador de calor	1	0/0	5,37	m^2	CS	12000
P-101	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,09	kW	SS316	7000
P-104	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,16	kW	SS316	7000
P-102	Bomba centrífuga	1	0/0	0,01	kW	SS316	10000
P-105	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,01	kW	SS316	7000

P-103	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,76	<i>kW</i>	SS316	8000
P-106	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,76	<i>kW</i>	SS316	6000
P-118	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,07	<i>kW</i>	SS316	8000
TNK-104	Tanque de almacenamiento	1	0/0	3446,84	<i>m³</i>	SS316	593000
P-117	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,79	<i>kW</i>	SS316	8000
P-111	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,79	<i>kW</i>	SS316	8000
TNK-106	Tanque de almacenamiento	1	0/0	65,93	<i>m³</i>	SS316	27000
P-116	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,05	<i>kW</i>	SS316	5000
P-113	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,07	<i>kW</i>	SS316	8000
P-109	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,28	<i>kW</i>	SS316	7000
P-108	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,00	<i>kW</i>	SS316	6000
P-110	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,27	<i>kW</i>	SS316	,000
P-114	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,01	<i>kW</i>	SS316	6000
TNK-105	Tanque de almacenamiento	1	0/0	12,13	<i>m³</i>	SS316	□
MX-102	Mezcladora	1	0/0	203,86	<i>kg/h</i>	CS	10000
P-107	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,08	<i>kW</i>	SS316	8000
P-112	Bomba Centrífuga	1	0/0	0,21	<i>kW</i>	SS316	15000
GBX-101	Caja Genérica	1	0/0	111,34	<i>kg/h</i>	CS	88000
HX-106	Intercambiador de Calor	1	0/0	3,36	<i>m²</i>	CS	18000
MX-101	Mezcladora	1	0/0	942,39	<i>kg/h</i>	CS	0
FSP-101	Divisor de Flujo	1	0/0	942,39	<i>kg/h</i>	CS	0

Elaborado por: Jacqueline Pinto y Bayron Tacuri

ANEXO 3. Componentes de entrada para el proceso de producción de biodiesel

Componente	Componentes físicos básicos				Propiedades críticas				Otras propiedades de los componentes		
	MW (g/gmol)	Tb (C)	Tfreez (C)	DHform (J/gmol)	Tc (C)	Pc (bar)	Zc	Omega	Coefficiente de volumen	Parte/tamaño (micras)	Constante de Henry (10 ⁴ m ³ -atm/gmol)
Aceite Palma	256.43	351	-273.15	0.00	984.98	2.69	0.11	1.18	1	0.00	0.00
Cloruro	58.45	1,464.85	800.80	-411,120.00	3,126.85	355.00	0.33	0.19	1	0.00	0.00
Diésel	296.49	343.85	0.00	0.00	490.85	12.63	0.21	1.05	1	0.00	0.00
Glicerina	92.09	287.85	18.18	-669,600.00	576.85	75.00	0.28	0.51	1	0.00	0.00
HCl	36.47	84.95	-	-92,310.00	51.55	83.10	0.25	0.13	1	0.00	0.00
Hidróxido	40.01	1,556.85	322.85	-425,930.00	2,546.85	250.00	0.21	0.00	1	0.00	0.00
Metanol	32.04	64.75	-97.68	-239,100	239.42	80.90	0.22	0.56	1	0.00	0.05
NaOCH3	54.02	68.20	-95.20	-646,133.00	234.25	29.69	0.26	0.30	1	0.00	0.00
Nitrógeno	28.02	-195.76	-	0.00	-146.90	34.65	0.29	0.04	1	0.00	0.00
Oxígeno	32	-182.84	-	0.00	-118.39	51.81	0.29	0.03	1	0.00	0.00
Agua	18.02	100	0.00	-285,830.00	374.19	221.20	0.24	0.34	1	0.00	0.00

Elaboración de los autores;2019