

**ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE
PALMA: UN ACERCAMIENTO A LA INGENIERÍA DETALLADA**

SILVIA JULIANA MARTINEZ ALVAREZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

PAMPLONA, COLOMBIA

2019

**ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITE DE
PALMA: UN ACERCAMIENTO A LA INGENIERÍA DETALLADA**

SILVIA JULIANA MARTINEZ ALVAREZ

Trabajo presentado como requisito para optar al título de

INGENIERA QUÍMICA

Director

M.Sc. Daissy Lorena Restrepo Serna

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

PAMPLONA, COLOMBIA

2019

Dedicatoria

A mi madre por ser mi guía, mi apoyo, mi ejemplo y mi amor. No me alcanzará la vida para pagarle todo lo que me ha dado. Cuando sea grande quiero ser como ella.

A mi padre, mi mayor ejemplo de fuerza, constancia y pasión. A pesar de sus errores para mí siempre será el mejor hombre del mundo.

Los amo con el alma y espero que la vida me dé la oportunidad de hacerlos sentir orgullosos de mí.

Agradecimientos

Gracias principalmente a Dios por darme la vida y mil oportunidades de vivirla.

Gracias a mis padres Yane y Arlex por ser todo lo que siempre he necesitado y todo lo que me han enseñado, sin ustedes no habría llegado a este momento de mi vida.

A mis hermanos Julio y Natalia porque siempre han sido mi motivación, mi fuerza para superar todos los obstáculos que se me han presentado, sueño con verlos en la cima del mundo y aunque no lo digo con frecuencia los amo con todo mi corazón.

Gracias a mis abuelos Toño y Milla por apoyarme siempre, por estar para mí cuando los necesité, nunca podré pagarles todo lo que han hecho por mí.

Finalmente, agradezco a las personas que hicieron parte de esta etapa en mi vida.

Claudia mi alma gemela, Johana mi amiga fiel de mil batallas, Juan Camilo mi amigo incondicional y Jorge mi inefable amor. Siempre los voy a querer con todo mi corazón.

RESUMEN

Una de las energías renovables más prometedoras del siglo XXI es el biodiesel, el cual es producido a través de una reacción química llamada transesterificación en donde reaccionan glicéridos con alcoholes. En Colombia la alternativa más utilizada como materia prima para su fabricación es el aceite extraído de la palma aceitera africana (*Elaeis Guineensis*), cultivada en las zonas rurales de varias de sus regiones.

El presente proyecto de ingeniería se enfocó en dos etapas, la primera fue el diseño conceptual de una planta de extracción de aceite de la palma africana y su conversión a biodiesel, en esta fase se evaluó la viabilidad técnica y económica mediante el uso de un software de tratamiento de datos, para así, pasar a la siguiente etapa en la cual se aplicó el desarrollo de la ingeniería detallada donde algunos parámetros fueron el eje central en la obtención más refinada del diseño, esta fase también fue evaluada y a partir de los resultados se obtuvo un proyecto viable.

La capacidad de producción de la planta fue calculada para dos toneladas de racimos de fruto fresco cada hora y mediante el uso de la matriz ELECTRE se determinó que de las opciones para la ubicación de la planta el municipio de Gamarra-Cesar resultó adecuado. Este proyecto ofrece una guía para futuras investigaciones con respecto a este tema.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	16
3.1. Objetivo general.....	16
3.2. Objetivos específicos	16
4. ALCANCES Y LIMITACIONES	17
4.1. Alcances	17
4.2. Limitaciones.....	17
5. MARCO TEORICO.....	18
5.1. Biodiésel	18
5.1.1. Métodos de producción	19
5.1.2. Materias primas.....	21
5.1.3. Biodiésel en Colombia.....	25
5.2. Metodologías de diseño.....	28
5.2.1. Diseño conceptual.....	28
5.2.2. Diseño detallado.....	29
5.3. Análisis de procesos	29
6. MARCO LEGAL	30
7. METODOLOGÍA.....	31
7.1. Estudio técnico	32
7.1.1. Descripción de materia prima.....	32
7.1.2. Tamaño	36

7.1.3.	Selección de la técnica de extracción	38
7.1.4.	Descripción de proceso.....	39
7.1.5.	Mejoras del proceso.....	41
7.1.6.	Descripción y dimensionamiento de equipos	42
7.1.7.	Rendimiento de proceso	46
7.1.8.	Estudio económico.....	54
7.1.9.	Localización de la planta.....	47
8.	RESULTADOS.....	59
8.1.	Viabilidad técnica.....	59
8.2.	Viabilidad económica.....	63
8.3.	Localización de la planta.....	60
8.3.1.	Gamarra, Cesar.....	61
8.4.	Distribución de la planta.....	62
9.	CONCLUSIONES.....	65
	REFERENCIAS	66
	ANEXOS.....	73
	Anexo I: Diagrama de proceso de flujo de bloques	73
	Anexo II: Diagrama de flujo de proceso (PFD)	74
	Anexo III: Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)	78
	Anexo IV: Costo de equipos	84
	Anexo V: Flujo de caja de ingeniería conceptual.....	85
	Anexo VI: Flujo de caja de ingeniería detallada.....	86
	Anexo VII: Matriz decisional método ELECTRE	87

Anexo VIII: Imágenes de los cultivos seleccionados para la disposición de la materia prima.....	90
Anexo IX: Imágenes del terreno seleccionado para la construcción de la planta.	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del biodiésel	19
Tabla 2. Materias primas para la producción de biodiésel	22
Tabla 3. Normatividad en relación con el aceite de palma y el biodiesel en Colombia.	30
Tabla 4. Composición química estandarizada de los racimos de fruta (RFF)	32
Tabla 5. Propiedades físicas y termodinámicas	33
Tabla 6. Propiedades físicas y termodinámicas	33
Tabla 7. Propiedades físicas y termodinámicas	34
Tabla 8. Propiedades físicas y termodinámicas	35
Tabla 9. Lista de equipos	42
Tabla 10. Corrientes de proceso y rendimientos	46
Tabla 11. Parámetros de inversión y precios utilizados en el análisis económico. 55	
Tabla 12. Costos de utilidades de la fase conceptual y detallada	57
Tabla 13. Comparación de ingresos por ventas para las fases conceptual y detallada.	63
Tabla 14. Comparación de estudios económicos para las etapas conceptual y detallada.	64
Tabla 15. Descripción de las corrientes de proceso.	75
Tabla 16. Descripción de las corrientes de proceso.	76
Tabla 17. Descripción de corrientes de proceso.	77
Tabla 18. Dimensionamiento de los equipos.	79
Tabla 19. Descripción de las corrientes de proceso.	80
Tabla 20. Descripción de las corrientes de proceso.	81
Tabla 21. Descripción de las corrientes de proceso.	82
Tabla 22. Descripción de las corrientes de proceso.	83

Tabla 23. Costos de los equipos de proceso fase detallada.....	84
Tabla 24. Flujo de caja de la ingeniería conceptual.....	85
Tabla 25. Flujo de caja de ingeniería de detalle.....	86
Tabla 26. Criterios para el análisis ELECTRE	87
Tabla 27. Alternativas y criterios de selección.....	87
Tabla 28. Índice de concordancias.....	88
Tabla 29. Índice de discordancia.....	88
Tabla 30. Dominancia agregada.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema para la reacción de transesterificación paso a paso.	21
Figura 2. Fruto de la palma africana.	32
Figura 3. Municipios palmeros en el departamento del Cesar.	48
Figura 4. Mapa del cultivo de palma africana en Morales, Bolívar.	49
Figura 5. Cultivo de palma africana en Aguachica, Cesar.	49
Figura 6. Cultivo de palma africana en Besote, La Gloria, Cesar.	50
Figura 7. Ubicación de los cultivos y vías de acceso.	51
Figura 8. Ubicación del predio seleccionado para la construcción de la planta.	60
Figura 9. Terreno donde se construirá la planta de producción de biodiesel a partir de aceite de palma.	60
Figura 10. Vista general de la planta.	62
Figura 11. Diagrama de proceso de flujo de bloques.	73
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso.	74
Figura 13. Diagrama de flujo de tubería e instrumentación.	78
Figura 14. Cultivo ubicado en Morales, Bolívar.	90
Figura 15. Cultivo ubicado en La Gloria, Cesar.	90
Figura 16. Cultivo ubicado en Aguachica, Cesar.	91
Figura 17. Fruto de palma aceitera.	91
Figura 18. Vista lateral del terreno seleccionado.	92
Figura 19. Vista lateral del terreno seleccionado.	92

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Demanda de Biodiésel en Colombia.	37
Gráfica 2. Comparación entre la fase conceptual y detallada de los costos de materias primas.	56
Gráfica 3. Comparación entre la fase conceptual y detallada de los costos de materias primas.	56
Gráfica 4. Diagrama de flujo de caja acumulado descontado para la etapa conceptual.	58
Gráfica 5. Diagrama de flujo de caja acumulado descontada para la etapa de detalle.	58

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es uno de los problemas más importantes a resolver para todas las naciones del mundo, por lo tanto, es importante tener clara una idea de los cambios que se pueden realizar en las políticas de gobierno, como la implementación de nuevas energías limpias y renovables.

Uno de los planteamientos con más investigación ha sido el cambio de combustibles convencionales, a base de fósiles por energías renovables. El biodiésel es una de las energías renovables más prometedoras de este siglo [1]. Su producción es un campo de investigación importante debido a la relevancia que gana con el alza del precio del petróleo y sus ventajas ambientales [2]. La forma de producción más empleada es a través de una reacción química reversible llamada transesterificación en donde reaccionan glicéridos (aceites y grasas) con alcoholes de cadena corta [3].

A partir de este proceso se deben analizar las opciones de materia prima disponibles en Colombia, para lo cual la palma aceitera (*Elaeis Guineensis*) es una opción prometedora, ya que una hectárea de palma aceitera produce entre 10 y 35 toneladas de "racimo de fruta fresca (FFB)" por año de donde se extrae el aceite [4].

En Colombia al cierre de 2017 la obtención de aceite de palma crudo fue de 1.627.552 toneladas. Se evidenció un crecimiento de 42 % frente a lo reportado en el año anterior (481.350 más que las 1.146.203 toneladas registradas en 2016) [5].

Teniendo en cuenta esta perspectiva de mercado nacional, el presente proyecto de ingeniería es un proceso por el cual se aportan los datos técnicos y económicos que facilitan establecer los costes de construcción y explotación [6] de una planta de extracción de aceite de palma para su posterior conversión a biodiésel realizando el

diseño conceptual con el fin de identificar la viabilidad técnica y económica del proyecto, el cual marcará la pauta para el desarrollo de la ingeniería detallada, donde se representan los datos finales para la construcción y producción de la planta.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Desde el año 2005 en Colombia comenzaron a usarse biocombustibles con el objetivo de disminuir las emisiones contaminantes generadas por los combustibles tradicionales. Una de las alternativas propuestas es el uso de biodiésel producido a partir del aceite de palma extraído de la palma africana [7]. Así, el cultivo de palma se empezó a desarrollar como una actividad viable para la generación de empleo y riqueza social [8].

En la actualidad la palma de aceite de Colombia es la oleaginosa más productiva del planeta, por cada hectárea sembrada se produce entre 6 y 10 veces más aceite que las demás, reportando en el año 2017 una cantidad de 8'027.867 toneladas de racimos de fruto de palma y 1'627.552 toneladas de aceite de palma crudo producido [9]. En cuanto al biodiésel, 6 empresas lo producen, de las cuales cinco de ellas reportaron a la Federación de Biocombustibles en 2016 una producción de 447.768 toneladas [7]. En el departamento del Cesar para el año 2017 se alcanzó una producción de aceite de palma crudo de 300.425 toneladas, lo que equivale al 18,46 % de la producción Nacional, teniendo 9 núcleos palmeros [10], de los cuales solo una planta, cuenta con un complejo agroindustrial integrado, donde se encuentran plantaciones, planta extractora, planta refinería y planta de producción de biodiesel [11].

En la literatura son pocos los trabajos que se pueden encontrar sobre la ingeniería de detalle de un proceso tal como la producción de biodiésel, en la mayoría de los casos, los diferentes estudios se enfocan en el análisis de diseño conceptual del mismo. Por esto, se abordan desafíos mediante la promoción de un proyecto que vaya más allá de la ingeniería conceptual en el proceso de producción de biodiésel. Este proyecto se centra en realizar una aproximación al diseño detallado de una planta de producción de biodiésel a partir de aceite de palma en el departamento del Cesar y con esto aportar crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y el bienestar social de la región.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Diseñar un proceso para la producción de biodiésel a partir de palma de aceite, considerando aspectos desde la ingeniería conceptual hasta concebir un acercamiento a la ingeniería de detalle.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de la producción de biodiésel a partir de aceite de palma en Colombia y en el departamento del Cesar.
- Desarrollar la etapa de ingeniería conceptual de la planta de producción de biodiésel a partir de aceite de palma.
- Determinar la viabilidad del proyecto realizando un análisis tecno-económico de la etapa conceptual del proyecto.
- Rediseñar el proceso considerando aspectos de la ingeniería detallada.
- Realizar el análisis tecno-económico al diseño que considera la ingeniería de detalle.

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

4.1. Alcances

Con este proyecto se pretende obtener un acercamiento al diseño detallado de una planta de producción de biodiesel, de acuerdo a los criterios para los cuales está en capacidad de desarrollar un profesional de la ingeniería química, como la planificación, diseño y optimización del proceso, la factibilidad económica y técnica, así como la selección y dimensionamiento de los equipos.

4.2. Limitaciones

Este proyecto es un estudio de investigación no experimental, por lo tanto, análisis técnico, económico, diseño de proceso y selección de equipos se basan en artículos, libros, bases de datos y todo tipo de documentos avalados por plataformas reconocidas.

En el dimensionamiento de los equipos de proceso no se tendrán en cuenta equipos auxiliares del proceso como válvulas, bombas, tanques de almacenamiento de reactivos o productos, entre otros. Esto debido a la extensión del trabajo.

El diseño realizado solo se centra en la extracción de aceite de palma y su conversión a biodiesel, sin tener en cuenta los subproductos del proceso, como el aceite que se puede obtener de las semillas de la palma y el tratamiento de los residuos que se generan.

5. MARCO TEORICO

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano, producidos a partir de materia orgánica llamada biomasa [12]. Pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, siendo los dos últimos los que proporcionan mayores beneficios en términos ambientales. En el caso de los biocombustibles líquidos considerados en todo el mundo se clasifican en las siguientes categorías: (a) aceites vegetales y biodiésel, (b) bioalcoholes y (c) aceites biocrudis y bio-sintéticos. La producción y uso de biodiésel es una alternativa con grandes ventajas ambientales, debido a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y su biodegradabilidad [13].

5.1. Biodiésel

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) ha establecido al biodiésel como "ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales". Es decir, un combustible alternativo de combustión limpia hecho con grasa o aceite (como el de soya o de palma) que se ha sometido a un proceso químico para extraerle la glicerina. Se puede mantener en su estado puro indicado B100 o de la forma BXX, donde XX representa el porcentaje de mezcla en el diésel [14].

El término 'bio' hace referencia al componente orgánico que presenta este combustible, lo que lo hace renovable y beneficioso para el cuidado del medio ambiente, ya que una de sus propiedades es la capacidad de reducir las emisiones de gas invernadero y disminuir el uso de combustibles derivados del petróleo [15].

Algunas de las ventajas del uso de este tipo de combustible es que su producción se da de fuentes renovables, posee un punto de inflamación mayor a 100 °C lo que hace que sea más fácil su manipulación y transporte, incrementa la combustión de los motores diésel, reduciendo la formación de ceniza, se degrada de 4 a 5 veces

más rápido que el diésel fósil, puede ser usado en la mayoría de los motores diésel, especialmente en los nuevos diseños, entre otras [16].

Tabla 1. Propiedades del biodiésel

Característica	Unidades	Colombia-NTC 5444
Contenido de éster	% m/m, mín.	96,5
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0,86-0,9
Viscosidad a 40 °c	cSt	1,9-6
Punto de inflamación	°C, mín.	120
Azufre	% m/m, máx.	-
Contenido de agua	Mg/kg, máx.	500
Glicerina libre	% m/m, máx.	0,02
Glicerina total	% m/m, máx.	0,25
Índice de acidez	mgKOH/g, máx.	0,5
Contaminación total	Mg/kg, máx.	24
Residuo carbonoso	% m/m, máx.	0,3
Cont. Diglicérido	% m/m, máx.	0,2
Cont. Triglicérido	% m/m, máx.	0,2
Fósforo	Mg/kg, máx.	10

Fuente: Lombana et al [17].

5.1.1. Métodos de producción

Son diversas tecnologías las que se pueden utilizar en la obtención de biodiésel principalmente microemulsión, pirólisis, dilución y transesterificación [18].

La transesterificación es el paso clave y más importante para obtener el combustible. Este método, generalmente se lleva a cabo mediante catálisis homogénea utilizando una base catalítica fuerte [19]. Cuando se utiliza como materia prima aceites vegetales puros se debe tener en cuenta que estos se componen por una gran cantidad de ácidos grasos saturados e insaturados [20], los cuales reaccionan con el catalizador álcali y reduce su eficacia. Por lo tanto es necesario realizar un pretratamiento llamado esterificación donde estos ácidos grasos reaccionan para formar triglicéridos [21].

5.1.1.1. Esterificación

El proceso de esterificación consiste en formar triglicéridos haciendo reaccionar ácidos grasos con un alcohol en presencia de un catalizador químico ácido (normalmente ácidos inorgánicos fuertes) [22]. Por ejemplo, el aceite de palma crudo está compuesto en su mayoría por ácido palmítico [20] el cual reacciona en presencia de ácido sulfúrico con tres moléculas de glicerol para formar agua y un triglicérido simple llamado tripalmitina.

5.1.1.2. Transesterificación

La transesterificación es un proceso en el cual un monoalcohol actúa como reactivo nucleofílico en la esterificación de un ácido; los triglicéridos se desdoblán en los monoalquilésteres de sus ácidos grasos constituyentes y en glicerol. De dicha reacción se puede inferir, grosso modo, que el grupo hidroxilo del alcohol se une al triglicérido para formar la glicerina, mientras que el grupo alquílico determina el tipo de alquilésteres formados [22], [23]. Comprende tres reacciones consecutivas que comienzan desde triglicéridos a diglicéridos, diglicéridos a monoglicéridos y desde monoglicéridos a glicerol. En general, el rendimiento de la reacción está influenciado por diversos parámetros, como el tipo de alcohol, la relación molar de alcohol a aceite, el contenido de ácidos grasos libres y agua, la temperatura de reacción, la duración de la reacción y el tipo de catalizador [1].

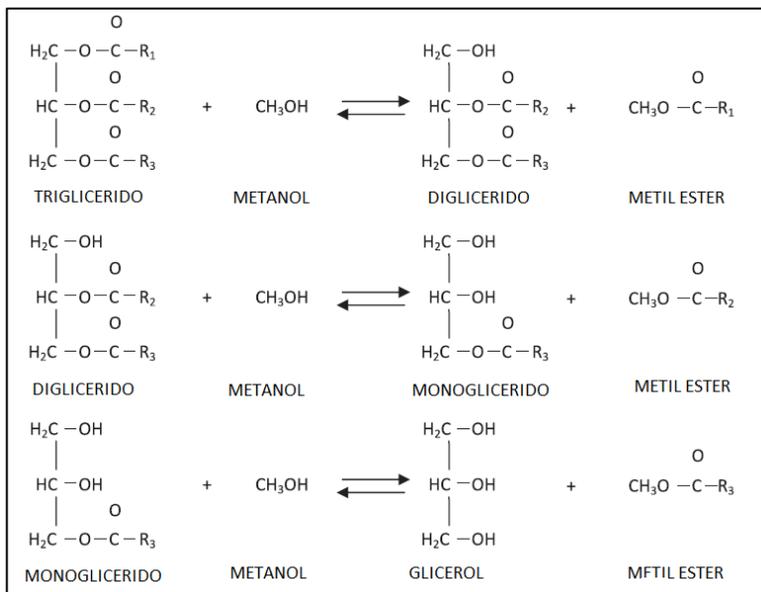


Figura 1. Esquema para la reacción de transesterificación paso a paso.

Fuente. Issariyakul, T et al [1].

5.1.2. Materias primas

La transesterificación para obtener biodiésel emplea como insumos principales algún tipo de aceite o grasa, un alcohol preferiblemente con un solo grupo hidroxilo y un catalizador.

5.1.2.1. Aceites y grasas

Cualquier fuente renovable de triglicéridos es materia prima apta para la producción de biodiésel. En la tabla 1 se puede observar la clasificación para aceites y grasas de acuerdo a su origen, ya sea animal o vegetal.

Tabla 2. Materias primas para la producción de biodiésel

Materia prima		Ejemplos		
		Nombre común	Nombre científico	
Origen vegetal	Aceites convencionales	Colza	<i>Brassica napus</i>	
		Soya	<i>Glycine max</i>	
		Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	
		Palma	<i>Elais Guineensis</i>	
	Aceites alternativos	Cardo	<i>Cynara cardunculus</i>	
		Piñón	<i>Jatropha curcas</i>	
		Mostaza etíope	<i>Brassica carinata</i>	
		Camelina	<i>Camelina sativa</i>	
		Caucho	<i>Hevea brasiliensis</i>	
		Coco	<i>Cocos nucifera</i>	
		Higuerilla	<i>Ricinus communis</i>	
		Cártamo o alazor	<i>Carthamus tinctorius</i>	
			<i>Pongamia pinnata</i>	
		Linaza	<i>Linum usitatissimum</i>	
	Aceites de frituras usados (aceites fritos)			
	Subproductos de la industria de aceites comestibles			
Subproductos de la industria papelera				
Aceite de microalgas				
Origen animal	Cebo de res, manteca de cerdo, aceite de pescado y subproductos de la industria avícola			

Fuente: Benjumea, P; et al [22].

La mayoría de países pioneros en la producción de biodiésel se enfocan en la obtención de este biocombustible a partir de aceites vegetales con amplia disponibilidad local. En países de la Unión Europea se utilizan aceites de semillas oleaginosas como la colza y el girasol; en Estados Unidos y Argentina, aceite de soya, y en países tropicales como Malasia, Indonesia, Ecuador y Colombia la opción inmediata ha sido el aceite del fruto de la palma. Estos aceites son altamente demandados en el mercado alimentario, por esto, presentan una gran desventaja, los precios por tonelada suelen ser más elevados que los del petróleo crudo [22].

Entre los aceites convencionales, el de palma es el que posee el mayor contenido global de ácidos grasos saturados y de ácidos grasos saturados de cadena intermedia. Es un aceite de naturaliza altamente saturada, además de poseer un alto contenido de estabilizantes naturales, lo que hace que sea químicamente más estable que los otros tipos de aceites convencionales. Además, de las almendras de este fruto se obtiene el aceite de palmiste, altamente valorado en la industria alimenticia y en la oleoquímica. Este aceite tiene composición similar al aceite de coco, caracterizándose por contenidos altos de ácidos grasos saturados de cadena media, así como ácidos grasos saturados de cadena más corta [22].

Paralelo a la utilización de los aceites vegetales convencionales, se viene desarrollando investigaciones con el objetivo de evaluar la factibilidad de producir biodiésel a partir de aceites vegetales alternativos.

En particular, los aceites de higuera o ricino y de piñón revisten gran interés en países del suroriente asiático y de centro y sur América. Una de las ventajas del uso de estos aceites es que no pueden usarse con fines alimenticios, debido a que contienen compuestos tóxicos, esto hace que el precio disminuya en gran proporción frente al precio de petróleo crudo. La mayor dificultad con estos aceites alternativos es la poca experiencia que se tiene con su cultivo a escala industrial, pues en la mayoría de los casos corresponden a cultivos silvestres [22].

5.1.2.2. Alcoholes

Los alcoholes más utilizados en el proceso de transesterificación para producir biodiésel son el metanol y el etanol, particularmente el metanol presenta propiedades físico-químicas que permiten conversiones de equilibrio mayores, requiere menor tiempo de reacción y temperaturas más bajas [18], asimismo se ve favorecida la formación de metil ésteres (biodiésel del metanol) con una viscosidad menor que los provenientes del etanol facilitando la combustión en motores diésel principalmente en climas fríos [16].

Por otro lado, el etanol es más soluble en el aceite permitiendo que sea más fácil la transferencia de masa en la reacción. La mayor ventaja que presenta frente al metanol es que es un derivado de fuentes renovable, lo que lo hace más amigable con el medio ambiente [16].

5.1.2.3. Catalizador

Uno de los parámetros más importantes es el catalizador, este determina el resultado del proceso y depende en gran medida del tipo y la calidad de la materia prima. Gran parte de los procesos comerciales emplean el uso de catalizadores de base homogénea debido al corto tiempo de reacción, al alto rendimiento, baja temperatura y el beneficio económico [24].

Los catalizadores se clasifican como alcalinos, ácidos, enzimas o catalizadores heterogéneos, entre los cuales son más efectivos los catalizadores alcalinos como el hidróxido de sodio, el metóxido de sodio, el hidróxido de potasio, el metóxido de potasio, entre otros [25].

Cuando el aceite posee gran cantidad de ácidos grasos libres como en el caso de los aceites vegetales puros la esterificación catalizada por ácidos es la adecuada. Estos ácidos pueden ser ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico o ácido sulfónico orgánico [26].

En la transesterificación álcali de aceites vegetales puros son varios los autores que afirman que el uso de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio al 1% en peso con respecto al aceite vegetal da como resultado conversiones altas y mejores propiedades del biodiésel [3], [26].

5.1.3. Biodiésel en Colombia

El etanol, utilizado como biocombustible constituyó un antecedente importante para la posterior producción de biodiésel en Colombia. El uso del alcohol carburante o etanol en este país se remonta a comienzos del siglo XX, cuando su producción estaba en manos del Estado. Durante varias décadas, este alcohol se destinaba únicamente a la elaboración de bebidas alcohólicas. Los bajos precios del petróleo que existían en esa época, así como la escasa conciencia ecológica orientada a la utilización de combustibles amigables con el medio ambiente hacían que fuese difícil que el etanol compitiera con el combustible fósil [17].

En el año 2001 el Congreso de la Republica promulgó la Ley 693 con la cual se decretó que las gasolinas tendrían que contener componentes oxigenados tales como alcoholes carburantes, en la cantidad y calidad que establezca el Ministerio de Minas y Energía [27]. Posteriormente, con la promulgación de la Ley 939 de 2004, se autorizó la mezcla de biocombustibles de origen vegetal o animal con el ACPM. Adicionalmente, a través de esta ley se establecieron una serie de incentivos tributarios, tales como la exención del impuesto a las ventas para el biodiésel y del impuesto global del ACPM, y la exención de renta líquida por un período de 10 años a las nuevas plantaciones de palma de aceite, cacao, caucho, cítricos y frutales [28].

De igual forma, el Gobierno Nacional implementó un conjunto de instrumentos de política orientados a la promoción de los biocombustibles a través del Plan Nacional de Desarrollo (PND), del establecimiento de un marco normativo y del desarrollo de incentivos tributarios y financieros. Estableció que el Gobierno nacional promovería la competencia entre los diferentes biocombustibles y le asignó al Ministerio de Minas y Energía-MME las funciones de: “evaluar la viabilidad y la conveniencia de liberar los precios de los biocombustibles y de eliminar aranceles a estos productos”. Además, se estableció en todo el país que el porcentaje de la mezcla de gasolina contenga un 10% de alcohol carburante y el diésel contenga 5% de biodiésel [29].

De ahí en adelante el uso de biodiésel ha ido en aumento debido a los impactantes cambios climáticos que se sienten en todas partes del mundo, António Guterres, Secretario General de la ONU, convocó a cada uno de los líderes mundiales para acudir a Nueva York el 23 de septiembre de 2020 con planes concretos y realistas para mejorar sus contribuciones en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [30], por esto varios países han enfocado su atención en vías legislativas y/o regulatorias que promueven un mayor uso de combustible de biodiésel. En Colombia, el congreso nacional aprobó el 13 de mayo de 2014 la ley 1715 [31] por medio de la cual se propuso una serie de acciones orientadas a impulsar el desarrollo y fortalecimiento del sector de biocombustibles en el país, tales como el porcentaje de las mezclas de biocombustibles con combustibles fósiles.

Con este conjunto de leyes, decretos, normas y resoluciones se ve amparada la producción e implementación de biocombustibles en Colombia, además de una serie de parámetros técnicos y de calidad para la producción del mismo.

La producción de biodiésel en Colombia está dividida en tres sectores, agrícola, industrial y de servicios.

Al sector agrícola pertenecen los cultivadores de palma de aceite, los cuales poseen desde pequeñas parcelas con métodos artesanales de cultivo hasta grandes extensiones de hectáreas con tecnología avanzada. Durante la última década el cultivo se ha expandido cerca del 10% promedio anual siendo el de mayor dinamismo del sector agropecuario [32]. En la fase industrial se tiene como primera instancia la extracción del aceite en las plantas. Según Fedepalma, actualmente en Colombia la tecnología que se emplea para la extracción del aceite de palma consiste en un proceso mecánico [33].

Una parte clave de la fase industrial es la producción del biodiésel, la cual se viene desarrollando en el país diez años atrás, de acuerdo con esto, las tecnologías disponibles han sido poco estudiadas dando como resultado una única ruta de proceso en Colombia para la producción de biocombustibles de primera generación, la transesterificación de aceites vegetales. Dicho proceso puede variar teniendo en cuenta la forma de catálisis a realizar, por ejemplo, se puede utilizar catálisis homogénea o catálisis heterogénea, esta última posee ventajas como altos rendimientos de conversión y mayor calidad de glicerina obtenida.

Retomando la distribución de las etapas de producción del biodiésel en Colombia, la fase de servicios está conformada por distribuidores mayoristas, que son aquellas plantas en donde se realiza la mezcla de biodiésel con diésel fósil. Las refinerías en las cuales, en muchos casos, se efectúa un porcentaje del total de mezcla establecido, y por los distribuidores minoristas o estaciones de servicio que son quienes venden el diésel mezclado a los consumidores finales [17].

5.2. Metodologías de diseño

Al hablar del diseño de procesos son diversos los métodos que se han propuesto para desarrollar este tipo de tareas, una vez construido el marco conceptual, se decide el enfoque que habrá de adoptarse en la investigación y el alcance del estudio. Sea para el desarrollo de un nuevo proyecto o de una planta industrial, estos métodos conllevan una serie de pasos o etapas con las cuales se facilita el tránsito por el proceso en busca de soluciones adecuadas. El uso de estas metodologías de trabajo no es restrictivo, por el contrario, deben ser adaptadas a cada situación y a cada profesional de diseño en particular [34].

El investigador debe encontrar la forma de responder de manera práctica y concreta las preguntas que se ha planteado y cumplir los objetivos. Lo que implica, seleccionar y desarrollar uno o más diseños de investigación para aplicarlos al contexto particular del estudio [35].

5.2.1. Diseño conceptual

El diseño conceptual es la etapa inicial de la ingeniería de un proyecto, en la que se define un grupo de operaciones que permite lograr el manejo o la transformación de las materias primas en productos u obras deseadas. Para esto el punto de partida son los estudios de preinversión, que en alguna forma definen la profundidad de la decisión técnica del proyecto. Dentro del diseño conceptual se desarrolla y profundiza la ejecución de un plan de metodológico con el fin de definir costos de proyecto, tiempos de ejecución y funcionamiento y calidad del producto [36].

5.2.2. Diseño detallado

Cuando se tiene una idea clara del proyecto de ingeniería a desarrollar se debe comprender una etapa de sucesión al diseño conceptual, la cual incluye las estimaciones de costos y el análisis económico de opciones; esta etapa intermedia al diseño conceptual y detallado, es fundamental para pasar a la fase final de un proyecto de ingeniería.

El diseño detallado consta de determinar las especificaciones técnicas definitivas de la elaboración de planos gráficos, diagramas, maquetas con todo el respaldo documentario; diseño y dimensionamiento de las obras principales y complementarias, es decir, las características a nivel de detalle de ingeniería civil, instrumentación y controles, eléctricas, mecánicas y todo lo que conforme el proyecto [36].

5.3. Análisis de procesos

Para entender mejor el análisis de procesos se debe tener en cuenta que conlleva un acto de realizar una revisión exhaustiva aplicando ciertos métodos científicos al reconocimiento y definición de problemas, esto con el fin de comprender completamente un proceso y así obtener el mejor resultado posible de dicho proceso e incrementar su eficiencia [37].

Para realizar el análisis de un proceso se requiere conocimientos de fenómenos de transporte, operaciones unitarias, balances, economía, optimización, control, etc.

El objetivo a conseguir es suministrar una base conceptual de como un proceso químico pasa de ser una simple idea a ser una realidad, estudiando todo lo que acontece en el mismo y hallando los valores de las variables de proceso [38].

6. MARCO LEGAL

Es necesario considerar las normas legales vigentes para especificaciones de biodiesel y aceite de palma, las cuales son expedidas por el ministerio de agricultura y desarrollo rural, ministerio de minas y energía, federación nacional de cultivadores de palma de aceite y federación nacional de biocombustibles de Colombia.

Tabla 3. Normatividad en relación con el aceite de palma y el biodiesel en Colombia.

Tipo	Número	Año	Contenido
Resolución	40213	2019	Por la cual se establece el ingreso al productor de alcohol carburante y del biocombustible para uso en motores diesel que regirá a partir del 9 de marzo de 2019.
Resolución	40400	2019	Por la cual se establece la metodología de referencia para el cálculo del valor del Ingreso al Productor del Biocombustible para uso en motores diesel.
Resolución	FEP 194	2019	Por la cual Fedepalma, como entidad administradora del fondo de estabilización de precios para el palmiste, aceite de palma y sus fracciones informa el valor de las cesiones y compensaciones de estabilización del mes de marzo de 2019.
Resolución	40184	2018	Por la cual se modifica la Resolución 18 2142 de 2007, en relación con el porcentaje de mezcla de biocombustibles para uso en motores diésel, en Bogotá D.C. centro del país y llanos orientales (B10).
Ley	1715	2014	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

Fuente: Federación Nacional de Biocombustibles en Colombia [31], [39], [40], [41]. Federación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera [42].

7. METODOLOGÍA

Para abordar un tema como lo es la ejecución de un proyecto que vaya más allá de la ingeniería conceptual en el proceso de producción de biodiésel, se deben tener en cuenta diversos métodos para desarrollar este tipo de tareas, una vez construido un marco conceptual, fue necesario decidir el enfoque en la investigación y el alcance del proyecto de una manera práctica y concreta, esto con el fin de cumplir los objetivos planteados.

La etapa inicial del proyecto fue la ingeniería conceptual en donde a partir de varias opciones se seleccionaron todos los requerimientos de materia prima y de diseño de proceso, con el objetivo de desarrollar un conjunto de operaciones que permitiesen lograr la transformación de las materias primas en productos.

La simulación del proceso se realizó mediante el uso de un software, donde se describen tres fases para la producción de biodiésel a partir del aceite extraído del fruto de la palma aceitera, de las cuales la primera es la extracción del aceite, la segunda es la transformación del aceite de palma a biodiésel y finalmente su purificación. Cabe resaltar que el proceso de extracción de aceite es similar para las diferentes plantas extractoras en Colombia, difiriendo principalmente en la capacidad de procesamiento.

Dentro del diseño conceptual de este proceso fue definido el tamaño y la capacidad de la planta, se realizó el cálculo para determinar el rendimiento del proceso y el estudio económico.

Continuo a esto se realizó la etapa final de ingeniería del proyecto la cual consta de parámetros asociados al diseño básico y detallado, como lo son la incorporación de detalles que mejoren el proceso, rendimiento del proceso, localización de la planta, distribución, descripción y dimensionamiento de equipos y estudio económico.

7.1. Estudio técnico

7.1.1. Descripción de materia prima

7.1.1.1. Fruto de la palma.

Los frutos de la palma se agrupan en racimos llamados corozo, son frutos simples compuestos por el exocarpio el cual es un tejido ceroso que cubre una pulpa denominada mesocarpio y la semilla en cuyo interior se aloja una almendra denominada endocarpio.



Figura 2. Fruto de la palma africana.

Fuente: Federación de Cultivadores de Palma aceitera [43].

El aceite es extraído del mesocarpio el cual cuenta con una composición equilibrada entre ácidos grasos saturados e insaturados, con proporciones de ambos cercanas al 50% [20].

Tabla 4. Composición química estandarizada de los racimos de fruta (RFF)

Componente	Valor (%)
Humedad	35,44
Celulosa	20,99
Hemicelulosa	11,75
Aceite	31,79

Fuente: Aristizabal, V; et al [44].

7.1.1.2. Hexano

El hexano es un líquido incoloro con un olor parecido al del petróleo. Es menos denso que el agua e insoluble en ella, sus vapores son más densos que el aire [45].

Tabla 5. *Propiedades físicas y termodinámicas*

Fórmula	C ₆ H ₁₄
Peso molecular	86,17 g/mol
Punto de ebullición	69 °C
Punto de fusión	-95,6 °C
Densidad (g/ml)	0.66 (a 20 °C)
Presión de vapor (a 15,8 °C)	100 mm de Hg
Temperatura de autoignición	223 °C

Fuente: Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo [45].

7.1.1.3. Glicerol (Glicerina cruda)

Líquido amarillo-anaranjado a temperatura ambiente. Ligero olor a aceite de fritura. Almacenar el producto en contenedores cerrados en un área fresca, seca, aislada y bien ventilada, lejos de fuentes de ignición y materiales incompatibles. Este producto puede soportar elevadas temperaturas y/ o presiones [46].

Tabla 6. *Propiedades físicas y termodinámicas*

Fórmula	C ₃ H ₈ O ₃
Familia química	CAS 56-81-5
Punto de ebullición	Superior a 204°C a 1760 mm Hg
Punto de fusión	-1°C
Densidad (g/ml)	1,26 (a 20 °C)
Presión de vapor (a 72 °C)	inferior a 1 mmHg
Temperatura de autoignición	429°C aprox.

Fuente: Biocombustibles sostenibles del caribe S.A. [46].

7.1.1.4. Ácido sulfúrico

Corrosivo a todas las partes del cuerpo. Veneno. Peligroso si se inhala o se traga. Causa quemaduras severas a la piel y los ojos cuando está concentrado, por encima del 50%, absorbe la humedad de la piel, produciendo quemaduras similares al fuego. Olor irritante suave. Tóxico para los peces y otros animales acuáticos. Es un líquido, viscoso su coloración varía de incoloro (Puro) café o negro (Impuro). Reacciona violentamente con el agua y productos alcalinos, produciendo vapores y proyecciones calientes corrosivas. No es inflamable, pero reacciona con los metales para formar gas hidrógeno [47].

Tabla 7. Propiedades físicas y termodinámicas.

Fórmula	H ₂ SO ₄
Familia química	CAS 7664-93-9
Punto de ebullición	Se descompone a 340 °C, generando gases tóxicos (SO ₃) y vapor de agua (H ₂ O).
Peso molecular	98,07
Punto de fusión	3°C, 98%
Presión de vapor (a 20 °C)	No es considerable 0,001
Solubilidad	Extremadamente soluble en agua, genera calor de disolución.

Fuente: Química Básica Colombiana S.A. [47].

7.1.1.5. Metanol

A temperatura ambiente se presenta como un líquido ligero, incoloro, inflamable y tóxico. Almacenar en un área limpia, seca y bien ventilada. Manténgase lejos de oxidantes fuertes [48].

Tabla 8. Propiedades físicas y termodinámicas

Fórmula	CH ₃ OH
Familia química	CAS 67-56-1
Punto de ebullición	64°C
Punto de fusión	-98°C
Densidad (g/cm ³)	0,791 - 0,793
Presión de vapor (a 20 °C)	97 mmHg
Temperatura de autoignición	455°C - ASTM E-659

Fuente: GTM Colombia S. A. [48].

7.1.1.6. Hidróxido de Sodio

También conocido como sosa cáustica es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe humedad del aire (higroscópico). El hidróxido de sodio es muy corrosivo, generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50%.

Tabla 9. Propiedades físicas y termodinámicas

Fórmula	NaOH
Familia química	CAS 1310-73-2
Punto de ebullición	1388 °C
Punto de fusión	318 °C
Densidad (g/cm ³)	2,1
Presión de vapor (a 20 °C)	6,3 mmHg

Fuente: Ascanio Química [49].

7.1.2. Tamaño

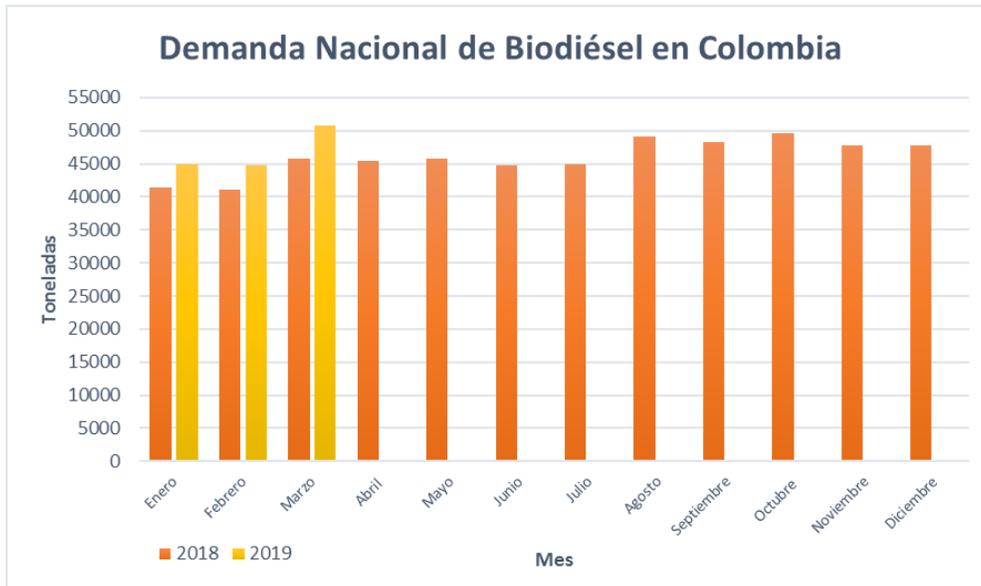
En el cálculo del tamaño de la planta se analiza la distribución de producción mensual de fruto de palma que se da en el departamento del Cesar (Colombia). Este departamento se destacó en el año 2017 por tener 70.611 hectáreas de palma en producción en sus diferentes municipios. Para el mismo año se alcanzó las 300.425 toneladas de aceite de palma crudo producido, posicionándose como el departamento más importante de la costa Caribe y el segundo a nivel nacional después del Meta [50], [10].

En cuanto a la capacidad de producción de biodiésel en Colombia, existen 6 plantas de producción las cuales actualmente tienen una capacidad total de 506.000 toneladas/año como se observa en la tabla 10, por otra parte, el presidente de la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia afirmó que la demanda estimada de Biodiésel para el año 2018 fue de 551.695 toneladas y hasta el mes de marzo del año 2019 ha sido de 140.593,25 toneladas, como se ilustra en la gráfica 1 la demanda de biodiésel mes a mes [51].

Tabla 10. Capacidad de producción de biodiesel en Colombia.

Región	Empresa	Capacidad (T/año)
Norte, Codazzi	Oleoflores	70.000
Norte, Santa Marta	Odín Energy	36.000
Norte, Santa Marta	Biocombustibles Sostenibles del Caribe	100.000
Oriental, Facatativá	Bio D	100.000
Central, B/bermeja	Ecodiesel de Colombia	100.000
Oriental, San Carlos de Guaroa, Meta	Aceites Manuelita	100.000
Total		506.000

Fuente: Federación de Biocombustibles de Colombia [52].



Gráfica 1. Demanda de Biodiésel en Colombia.

Fuente: Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia [53].

A partir de los datos mencionados anteriormente de oferta y demanda, son requeridos aproximadamente 50.000 toneladas al año del biocombustible. Esto conlleva a la necesidad de crear nuevas plantas de producción de biodiesel con el fin de cubrir la demanda total nacional.

La capacidad de la planta se calculó teniendo en cuenta la producción quincenal de los cultivos a los cuales se tiene acceso, donde la planta procesará una cantidad de 2 toneladas de racimos de fruta fresca cada hora en un lapso de tiempo anual de 8.000 horas de operación, excluyendo el mantenimiento de equipos y arranque de planta. Con estas cifras el valor aproximado de biodiesel producido es 4.278,24 toneladas al año, lo que cubriría el 0.77% de la demanda anual en el país.

7.1.2.1. Capacidad de producción

En este punto, se establece la opción para la producción de biodiesel con las mejores condiciones de rendimiento fruto-Biodiesel además de la disponibilidad de materia prima en el mercado (fruto de palma). Con base en estos aspectos se define que la planta de producción de biodiesel tendrá una capacidad de producción que equivale a 16.000 toneladas de RFF al año.

7.1.3. Selección de la técnica de extracción

Existen dos técnicas de extracción para aceites vegetales con resultados ventajosos para obtener un alto índice de rendimiento, extracción mecánica y extracción química, cuando se trata de semillas es más eficiente retirar el aceite por medio de la extracción con solvente, pero como es el caso de fruto de la palma africana, se selecciona el método de extracción mecánica utilizando un equipo de prensado, ya que facilita la purificación del aceite y es eficiente [54].

El sistema de extracción mecánica consiste en extraer la fracción líquida de la masa de frutos que sale del digestor y que está compuesta por aceite de pulpa de palma, por agua y por una cierta cantidad de sólidos que quedan en suspensión en el agua. La masa desaceitada (torta) la cual está compuesta por fibra y nueces, pasa al proceso de desfibración. Los frutos digeridos son prensados dentro de la canasta por acción de dos tornillos sinfín de paso regresivo, girando paralelamente en sentido contrario. La contrapresión la ejerce cada tornillo, el uno contra el otro mutuamente y que trabajan además contra unas piezas cónicas colocadas en los extremos de la canasta y operadas hidráulicamente [55].

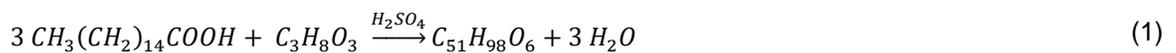
7.1.4. Descripción de proceso

La primera fase del proceso consiste en la extracción del aceite de palma a partir de los racimos de fruta fresca, esta consta de cinco etapas, esterilización, desfrutado, digestión, prensado y purificación.

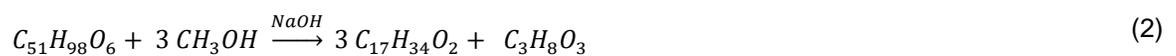
La esterilización es la primera etapa, donde ingresan los racimos en un tanque vertical para ser sometidos a la acción del vapor saturado a 4 bar y 150 °C, la corriente resultante de este proceso ingresa a la sección de desfrutado donde por medio de un tambor rotatorio se da la separación de los racimos en frutos sueltos y raquis (racimo vacío), próximo a esto en el proceso de digestión los frutos nuevamente son calentados a 95°C dentro de un tanque con chaqueta y agitación, esto con el fin de desprender la pulpa de las nueces (semillas), dicha pulpa es direccionada hacia el equipo de prensado donde se extrae el aceite, el cual es purificado pasando por un equipo de evaporación (Flash) operado a 150°C y 1 bar.

En la fase de transformación de aceite a biodiésel se debe disminuir la temperatura del aceite proveniente del evaporador a 65°C, esto es necesario para obtener altas conversiones en los reactores. Dicha fase consiste en tres etapas, esterificación de los ácidos grasos libres para obtener triglicéridos, transesterificación de los triglicéridos para obtener biodiésel y purificación.

Antes de realizar la esterificación se mezclan la corriente de aceite crudo, catalizador de ácido sulfúrico y una corriente de glicerol, esta mezcla ingresa en un reactor CSTR con una temperatura de 60°C y tiempo de residencia de una hora y media, donde se da la reacción (1); la energía de activación y el factor de frecuencia de la esterificación de ácido palmítico se establecieron en 30.1 kJ / mol y 1.2×10^4 (m³ / kmol)² / min, respectivamente [21].



La siguiente etapa de este proceso, es la transesterificación, la cual también es realizada en un reactor CSTR a temperatura de 60°C y tiempo de residencia de una hora, el modelo cinético utilizado fue el reportado por L.I. Orifici, et al.[56] quienes estudiaron la reacción con aceite crudo de palma e hidróxido de sodio como catalizador, donde el factor de frecuencia y la energía de activación de la ecuación de Arrhenius son $A = 9.1534 \times 10^6 \text{ l / (gmol-s)}$ y $E_a = 60701 \text{ kJ / kmol}$ [56].



Del reactor de transesterificación deriva una corriente que contiene biodiésel e impurezas las cuales fueron retiradas mediante un proceso de purificación.

La purificación inicia haciendo pasar la corriente mencionada anteriormente por un tren de decantadores, donde en el primer decantador ingresa agua caliente como solvente a 60°C, en una de las corrientes salientes del decantador se obtiene biodiesel con una pureza del 0.997 y la otra pasa al segundo decantador donde ingresa hexano con el fin de separar el glicerol producido en la reacción de transesterificación, de este decantador salen dos corrientes una con gran cantidad de residuos y otra con glicerol e impurezas, para finalizar el proceso se purifica el glicerol en una torre de destilación de 10 platos que opera a presión atmosférica.

En el diagrama de flujo de procesos (PFD) se indica el flujo general del proceso y los equipos principales de la planta ([ver anexos](#)).

7.1.5. Mejoras del proceso

El objetivo de realizar una mejora del proceso es producir más gastando menos recursos, es decir, aumentar la eficiencia de la planta de producción de biodiesel disminuyendo los costos de materias primas o haciendo integraciones energéticas que eviten la pérdida de utilidades.

El proceso mejorado mencionado anteriormente se describe de la misma forma, seccionándolo en dos fases, donde la primera consiste en la extracción del aceite de palma. Inicialmente se divide la corriente de agua en dos una para servicios y otra para el proceso, la de proceso ingresa dentro de un horno con el fin de elevar la temperatura del agua de 15 a 150 °C y 4 bares de presión. Este vapor de baja también es dividido en dos corrientes donde una se dirige al proceso de esterificación y otra al proceso de digestión.

Además, se integró una centrifugadora después del proceso de compresión para así aumentar la separación del aceite ya que esta corriente a salir de la prensa contiene trazas de sólidos y otras impurezas.

Por otro lado, el agua seccionada para servicios es dirigida a los intercambiadores de calor E-101, E-103 y E-104, para servir como agua de refrigeración. La corriente resultante del intercambiador E-101 mantiene una temperatura elevada la cual se hace circular hacia el intercambiador E-102 con el fin de hacer un aprovechamiento energético, la misma corriente saliente de este intercambiador se envía al decantador S-101 para utilizarse como solvente y así purificar el biodiesel producido en otra sección de la planta.

Otro cambio en el diseño fue realizar la recirculación del glicerol obtenido hacia el reactor de esterificación R-101, así, se consiguió disminuir la cantidad de materia prima utilizada en el proceso.

Estos cambios se muestran en la figura 13 ([ver anexos](#)) donde se presenta el diagrama de tuberías e instrumentación (Pi&D), una vista mejorada del proceso.

7.1.6. Descripción y dimensionamiento de equipos

Los equipos utilizados en el proceso se describen en la tabla 11 donde se puede observar el nombre de cada uno de ellos y el tipo de equipo, los datos de dimensionamiento se encuentran descritos en la tabla 20 para el diagrama de tuberías e instrumentación (Pi&D) en el [anexo III](#).

Tabla 11. Lista de equipos.

Cantidad	Nombre	Equipos
1	FIL-101	Filtro de tambor rotatorio
1	FIL-102	Prensa
1	H-101	Caldera Acuotubular
2	S-101 S-102	Decantador
2	V-101 V-102	Vessels
1	C-101	Centrifuga
1	EV-101	Columna Flash
2	R-101 R-102	Reactor CSTR
1	T-101	Columna de destilación
4	E-101 E-102 E-103 E-104	Intercambiador de calor tubo y carcasa

Fuente: Autor.

7.1.6.1. Extracción del aceite de palma

7.1.6.1.1. Almacenamiento

El proceso inicia desde que los camiones ingresan a la planta con los racimos de fruto, estos son pesado en una balanza al ingresar y al salir, esto con el fin de saber cuánta cantidad de fruto contienen. El fruto es descargado en unas tolvas de almacenamiento, las cuales están dotadas de unas compuertas dosificadoras directamente conectadas al sistema de transporte neumático.

El almacenamiento de reactivos se hace en tanques de acero de tapa removible con un sistema de tubería para el ingreso y salida de materia prima.

7.1.6.1.2. Sistema automatizado de esterilización vertical

El sistema de transporte neumático de tipo REDLER dirige el fruto hacia un recipiente cilíndrico (V-101) con accionamiento hidráulico para la apertura/cierre de sus tapas y controlado por un sistema automatizado, el sistema se complementa con un diseño fiable de distribución de vapor, el cual proviene de una caldera acuotubular (H-101) de tipo Fraser y tamaño mediano, que consiste básicamente de un domo (tambor) de vapor y agua y de un conjunto de dos bancos de tubos de evaporación, cada uno con doble colector, conectados al domo mediante tubos de circulación, los cuales actúan como alimentadores.

7.1.6.1.3. Desfrutado

En esta sección de la planta son separados los frutos y el raquis de los racimos esterilizados, esto se da por la acción de un tambor rotatorio (FIL-101), el mecanismo funciona como una jaula que gira sobre un eje central y forma el cilindro con una serie de barrotes colocados longitudinalmente.

7.1.6.1.4. Digestión

Los frutos pasan a un equipo (V-102) donde son recalentados y la pulpa es desprendida de las nueces y macerada preparándose para la extracción por prensado, este equipo es un recipiente cilíndrico verticales provistos de un eje central con brazos de agitación y maceración.

7.1.6.1.5. Prensado

La etapa de prensado es la más importante en la primera fase del proceso, debido a que es donde se extrae el aceite de la pulpa del fruto, este lleva impurezas como agua y cierta cantidad de sólidos que quedan en suspensión en el agua. El equipo utilizado en esta etapa es una prensa de tornillos sinfín continuas (FIL-102), compuesta por una canasta perforada horizontal de forma cilíndrica doble y por dos tornillos del tipo de sinfín, la masa resultante de compuesta por fibra y nueces, pasa a otra etapa la cual no se menciona en este proyecto.

7.1.6.1.6. Eliminación de residuos

La corriente líquida saliente del equipo de prensado pasa a una centrifugadora (C-101) con el fin de separar las impurezas solidas y algunos líquidos presentes en la corriente y seguido a esto se elimina el agua sobrante por medio de una columna de evaporación Flash (EV-101).

7.1.6.2. Producción de biodiesel

7.1.6.2.1. Esterificación

La reacción de esterificación se realiza en un reactor (R-101) continuo de tanque agitado (CSTR) donde ingresan la corriente de aceite crudo, glicerol y catalizador (H_2SO_4 al 96%), el reactor posee una chaqueta que mantiene la temperatura dentro del reactor, esto para que la reacción alcance su máxima conversión.

7.1.6.2.2. Transesterificación

Al igual que en el caso de la esterificación la reacción ocurre en un reactor (R-102) continuo de tanque agitado (CSTR) donde ingresan la corriente saliente del reactor R-101, una corriente de metanol y otra de catalizador (NaOH al 5 %), una chaqueta se encarga de mantener la temperatura de operación del reactor.

7.1.6.3. Purificación del biodiesel

7.1.6.3.1. Biodiesel

Del reactor de transesterificación surge el biodiesel que contiene gran cantidad de impurezas, las cuales son eliminadas dentro de un decantador (S-101) que utiliza como solvente agua caliente, este es un recipiente ubicado en posición vertical.

7.1.6.3.2. Glicerol

La purificación de la corriente de glicerol se realiza en un decantador (S-102) de la corriente saliente del S-101 el cual utiliza como solvente Hexano también es un recipiente cilíndrico ubicado en forma vertical de donde sale una corriente dirigida a una torre de destilación de platos perforados tipo SIEVE (T-101).

7.1.7. Rendimiento de proceso

El rendimiento del proceso se estimó en función de aspectos importantes identificados como es la capacidad máxima de producción de la planta. Este análisis tuvo dos enfoques, el primero fue la fase conceptual del proyecto y seguidamente la fase detallada, los datos se ven reflejados en la tabla 12. Este análisis se realizó con la ayuda de un software donde se ejecutó la simulación de las etapas conceptual y detallada, para así obtener los datos de flujos de materia para finalmente determinar el rendimiento.

Tabla 12. Corrientes de proceso y rendimientos.

Descripción de corriente	Flujo de materia (kg/h)		
	Ing. Conceptual	Ing. Detalle	
Fruto de palma	2000	2000	
Aceite	511,18	556,68	
Biodiesel	473,9	534,78	
	Ing. Conceptual	Ing. Detalle	
	% Rendimiento	% Rendimiento	
RFF-Biodiesel	23,69	RFF-Biodiesel	26,74
RFF-Aceite	25,56	RFF-Aceite	27,83
Aceite-Biodiesel	92,71	Aceite-Biodiesel	96,06

Fuente: Autor.

7.1.8. Localización de la planta

El estudio de la localización contempla alternativas que permitan establecer un juicio comparativo que se ajuste a las características necesarias de ubicación de la planta. Para obtener una localización adecuada de la planta se debe dividir esta sección en dos aspectos, macrolocalización y microlocalización, con ello, será definida la ubicación aproximada de la planta [57].

7.1.8.1. Macro localización

En esta primera etapa es seleccionada el área general en el cual se ubicará el proyecto, esto dependiendo de dos indicadores, la disponibilidad de la materia prima principal y la cercanía al mercado.

El proyecto está limitado para una ubicación en el departamento del Cesar teniendo en cuenta la infografía presentada por la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma) en donde se reportan los municipios palmeros para este departamento.

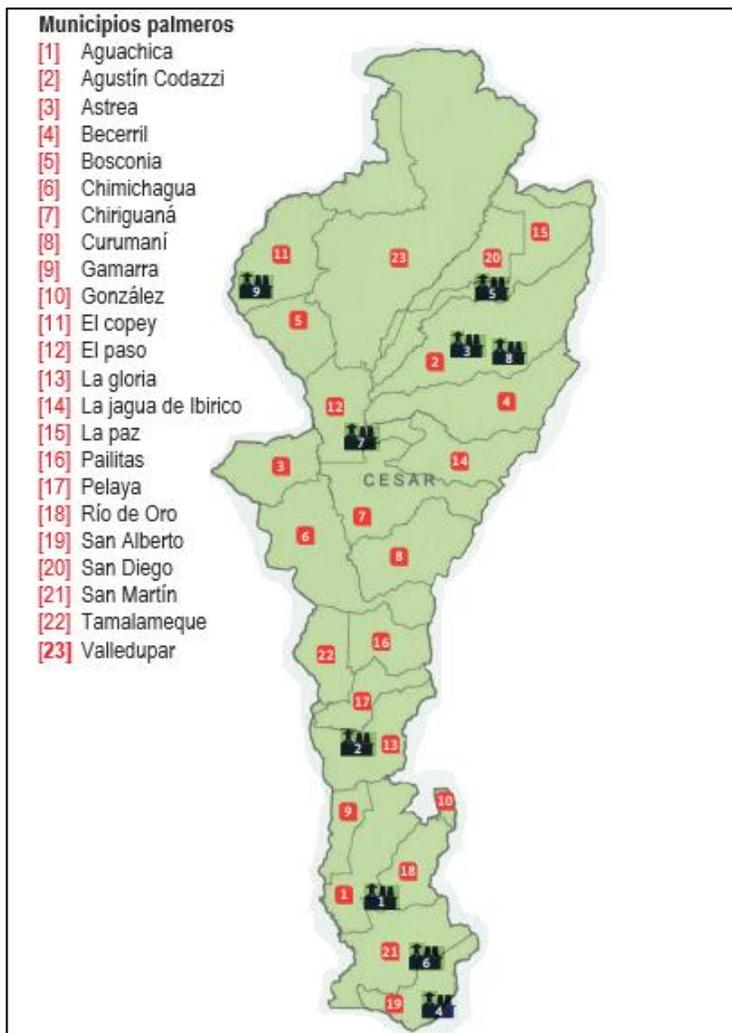


Figura 3. Municipios palmeros en el departamento del Cesar.

Fuente: Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma), 2018.

Con el fin de seleccionar uno de estos municipios como el indicado para ubicar la planta se tendrán en cuenta dos consideraciones tales como: proximidad a las materias primas y requerimientos de infraestructura industrial.

La materia prima con la que se cuenta para cubrir la capacidad de producción de la planta se ubica en tres lugares diferentes, los cuales se presentan en las figuras 4, 5 y 6.



Figura 4. Mapa del cultivo de palma africana en Morales, Bolívar.

Fuente: Google Maps, imágenes ©2019 CNES / Airbus, Datos del mapa.



Figura 5. Cultivo de palma africana en Aguachica, Cesar.

Fuente: Google Maps, Imágenes ©2019 DigitalGlobe, Datos del mapa.

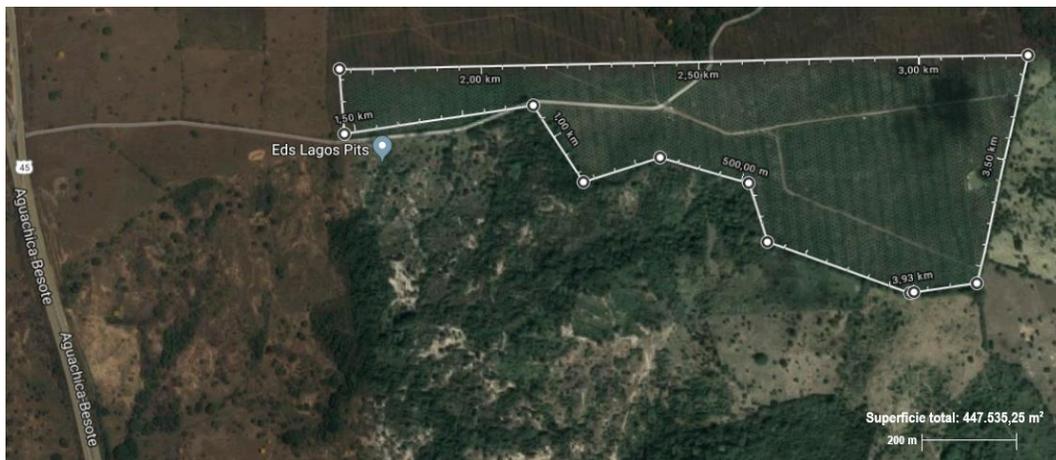


Figura 6. Cultivo de palma africana en Besote, La Gloria, Cesar.

Fuente: Google Maps, Imágenes ©2019 DigitalGlobe, Datos del mapa.

7.1.8.1.1. Proximidad a las materias primas

El principal factor que se debe tener en cuenta es la cercanía de los cultivos al municipio que se seleccionará para ubicar la planta, esto, debido a que en la cosecha del fruto de la palma aceitera, la lipasa (fermento) se activa con mayor rapidez y hace que el proceso de acidificación del fruto se acelere considerablemente, influyendo en la calidad del aceite, ya que a mayor acidez la calidad del aceite es más baja [43].

A partir de la ubicación de los cultivos mostrada en la figura 6, se redujo el número de municipios como alternativas para la macrolocalización de la planta a tres municipios palmeros aledaños a dichos cultivos, tales como Aguachica, Gamarra y La Gloria.

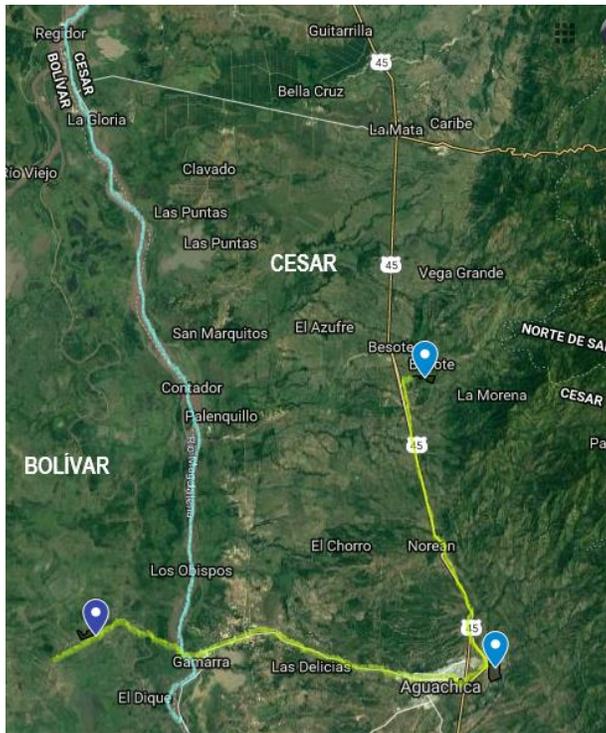


Figura 7. Ubicación de los cultivos y vías de acceso.

Fuente: Google Maps, Imágenes ©2019 DigitalGlobe, Datos del mapa.

7.1.8.2. Micro localización

El objetivo de este análisis es mediante el uso del método ELECTRE determinar cuál alternativa es la más factible dentro de la macrolocalización, con lo que es posible obtener una ubicación específica. En los requerimientos de infraestructura industria, se consideran cuatro criterios: facilidades de transporte, cercanía de mercados, disponibilidad de agua y eliminación de desechos.

7.1.8.2.1. Facilidades de transporte

Es necesario contar con rutas de acceso a la planta en buenas condiciones con el fin de que la materia prima y los productos lleguen a su destino en óptimas condiciones. Este es un aspecto que causa gran impacto dentro del análisis, debido a que por cuestiones de calidad del aceite el fruto no debe ser sometido a cambios por las condiciones de transporte, los municipios seleccionados poseen una red de vías de acceso que cuentan con carreteras asfaltadas, con tramos en buen y mal estado.

7.1.8.2.2. Cercanía al mercado

Los mercados con demanda de biodiesel con los cuales se facilita la comercialización son las plantas de Ecopetrol S.A. ubicadas en Ayacucho, La Gloria, Cesar y Barrancabermeja, Santander.

Las tres alternativas de municipios seleccionados para la posible ubicación de la planta son relativamente cercanas a la ubicación de estos mercados.

7.1.8.2.3. Disponibilidad de energía eléctrica y otras fuentes de energía

Los municipios seleccionados pertenecen al sur del Cesar, por esto la empresa de servicios públicos que abastece la energía eléctrica y gas natural son Centrales Eléctricas de Norte de Santander (Grupo EPM) y Gas Natural del César S. A. por tal razón no es un aspecto relevante para el análisis.

7.1.8.2.4. Disponibilidad de agua

El abastecimiento de agua a la planta es el criterio más importante, debido a que el proceso requiere de grandes cantidades de dicho fluido. Para el municipio de Aguachica la empresa de tratamiento y suministro de agua potable es Empresa de Servicios Públicos de Aguachica (ESPA), en el municipio de Gamarra es la Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado (Empugam S.A.S) y en el municipio de La Gloria es la Empresa De Servicios Públicos La Gloria (Empogloria ESP), para el análisis se debe tener en cuenta que Aguachica presenta graves problemas con el abastecimiento del fluido.

7.1.8.2.5. Eliminación de desechos

El proceso genera desechos que son procesados y convertidos en nuevos productos que posteriormente se comercializan. Los efluentes de desecho que no se pueden reutilizar son sometidos a los debidos protocolos como lo indica la Comisión Técnica Nacional Intersectorial para la Salud Ambiental CONASA, la cual promueve y divulga la información sobre salud ambiental, integrada mediante el Sistema Único de Información en Salud Ambiental, SUIA.

De las alternativas el municipio con un control más riguroso en cuanto al plan de cuidado ambiental es Aguachica.

7.2. Estudio económico

Para el desarrollo de un proyecto existen varios aspectos clave, uno de ellos es determinar la viabilidad económica del proyecto. A continuación, se presenta una evaluación económica para la fase conceptual y otra para la fase detallada del proyecto, esto con la ayuda de un software basado en criterios de estimación de costos de capital (CAPEX), estimación de costos operativos (OPEX) y curvas de flujo de efectivo de inversión, con esto, fue evaluado el impacto económico para un ciclo de vida proyectado de 10 años con el método de depreciación de la línea recta. En la tabla 13 se aprecian los parámetros de inversión, los precios de materia prima y utilidades, estos valores fueron estimados con base en juicio de expertos, e información de proyectos anteriores en que han intervenido los autores del mismo.

Fue necesario fijar un precio de venta de biodiesel para realizar el análisis económico en este proyecto, debido a que en Colombia existe entidades reguladoras como la Federación Nacional de Biocombustibles y la Federación de Cultivadores de Palma aceitera, las cuales modifican mensualmente los precios del biodiesel y del fruto de la palma.

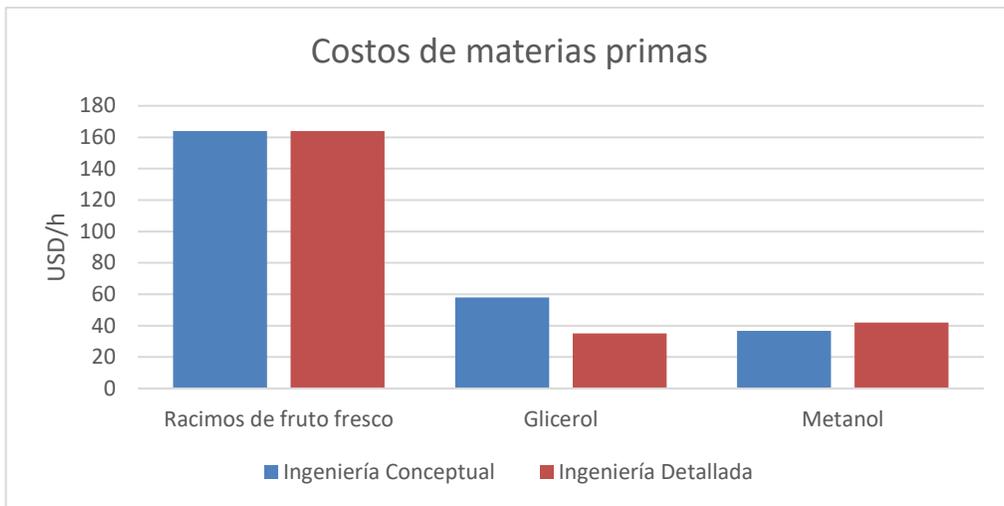
Tabla 13. Parámetros de inversión y precios utilizados en el análisis económico.

Ít	Unidad	Valor	Referencia
Parámetros de inversión			
Tasa de impuesto	%	25	[58]
Tasa de interés	%	17	
Materia prima			
Racimos de fruto de palma	USD/kg	0,082	[59]
Glicerol	USD/kg	1	[60]
Ácido sulfúrico	USD/kg	0,094	[58]
Metanol	USD/kg	0,35	[61]
Hidróxido de sodio	USD/kg	0,05	
Hexano	USD/kg	0,46	
Utilidades			
Vapor LP	USD/Ton	1,57	[62]
Agua potable	USD/m3	1,25	[58]
Combustible	USD/MMBTU	7,21	
Electricidad	USD/kWh	0,1	
Operación			
Operador	USD/h	2,14	[58]
Supervisor	USD/h	4,29	

Fuente: Autor.

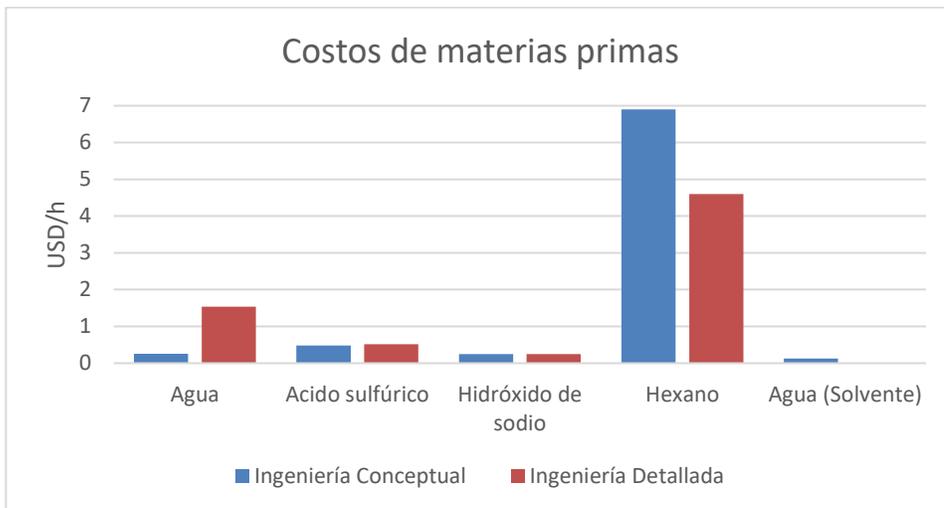
7.2.1. Costos de inversión

La estimación de costos del proyecto se dividió en fases internas de inversión que se muestran en las gráficas de costos de materias primas y la tabla 14 utilidades, valores calculados teniendo en cuenta la tabla 13, este análisis se realizó mediante el uso de un software que se basa en los criterios del capítulo de contabilidad de costos y estimación de costos de capital del libro *Product and Process Design Principles* [63].



Gráfica 2. Comparación entre la fase conceptual y detallada de los costos de materias primas.

Fuente: Autor.



Gráfica 3. Comparación entre la fase conceptual y detallada de los costos de materias primas.

Fuente: Autor.

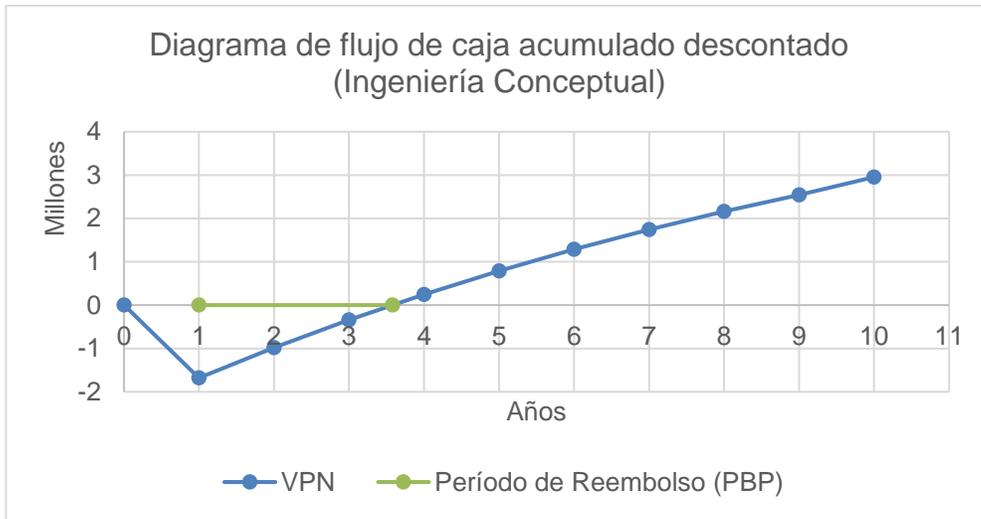
Tabla 14. Costos de utilidades de la fase conceptual y detallada.

INGENIERÍA CONCEPTUAL				
Descripción	Equipo	Flujo	Unidades	Costos (USD/h)
Electricidad	T-101-reflux pump	0,19	KWh	0,0266
Electricidad	FIL-101	2,22	KWh	0,3108
Electricidad	C-101	15,01	KWh	2,1014
Agua de enfriamiento	T-101-cond	12,246115	m3/h	0,388202
Agua de enfriamiento	E-103	2,627124	m3/h	0,08328
Agua de enfriamiento	E-102	6,895857	m3/h	0,218599
Agua de enfriamiento	E-101	5,974537	m3/h	0,189393
Vapor baja (hps)	E-104	0,008869	ton/h	0,013924
Combustible	H-101	0,161249	MW	4,602046
INGENIERÍA DETALLADA				
Electricidad	T-101-reflux pump	0,19	KWh	0,019
Electricidad	FIL-101	2,22	KWh	0,222
Electricidad	C-101	15,01	KWh	1,501
Agua de enfriamiento	T-101-cond	13,648515	m3/h	0,432658
Combustible	H-101	0,577359	MW	4,162758

Fuente: Software de procesamiento de datos.

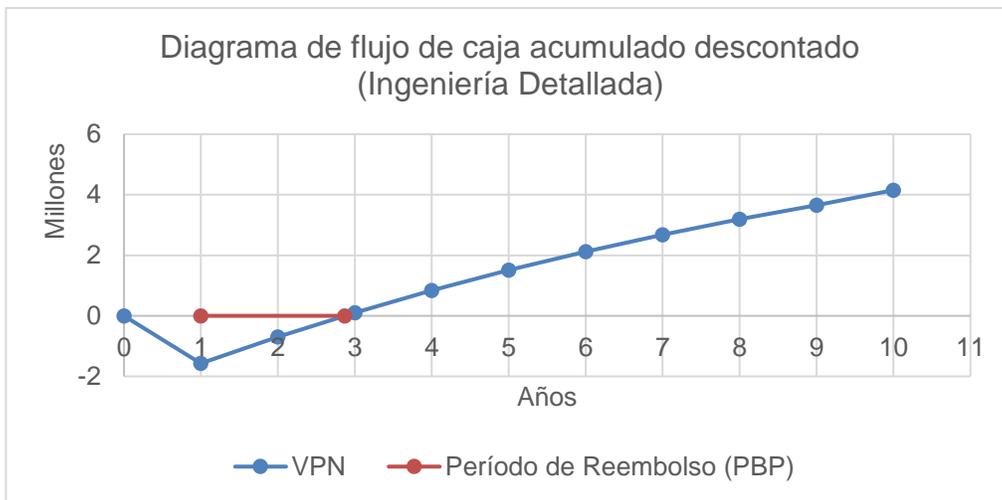
7.2.2. Evaluación financiera

El análisis financiero se basa en el cálculo de conceptos financieros tales como el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y período de recuperación descontado. En las gráficas 4 y 5 son comparados dos de estos criterios para la fase conceptual y detallada del proyecto.



Gráfica 4. Diagrama de flujo de caja acumulado descontado para la etapa conceptual.

Fuente: Autor.



Gráfica 5. Diagrama de flujo de caja acumulado descontada para la etapa de detalle.

Fuente: Autor.

8. RESULTADOS

8.1. Viabilidad técnica

8.1.1. Rendimiento del proceso

Con los resultados arrojados por el software se obtuvieron los rendimientos de los procesos diseñados mostrados en la tabla 12 donde son comparados los rendimientos de Fruto-Aceite extraído, Aceite extraído-Biodiesel y Fruto-Biodiesel. En uno de los casos se aprecia que el rendimiento de aceite de palma con respecto al biodiesel es del 96%, un indicador que demuestra en gran medida la viabilidad técnica del proyecto. Esta afirmación tiene validez y es soportada por registros que otorgan organizaciones reconocidas como lo es la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, la cual establece que el rendimiento del aceite de palma en biodiésel es uno a uno [52]. Para afianzar la viabilidad económica de este proyecto se observa que el rendimiento de Fruto-Aceite extraído alcanza el 27,83%, lo que evidencia resultados óptimos, debido a que éste se ubica por encima de rendimientos promedio de aceite de palma extraído reportados en la literatura, como lo referencia el informe titulado: evolución del sector palmicultor, el cual establece que el rendimiento promedio de extracción de aceite con respecto a la palma africana corresponde al 25% [64]. Los resultados analizados anteriormente permiten el desarrollo de la evaluación económica del proyecto, con el fin de obtener una aproximación de los recursos necesarios para la ejecución del mismo.

8.1.2. Localización de la planta

Mediante el uso del método de decisión multicriterio ELECTRE se determinó que la ubicación óptima para la planta es en el municipio de Gamarra, Cesar (ver anexos), el terreno se indica en las figuras 8 y 9, el cual posee una superficie total de 107.768 m², este fue seleccionado por poseer una extensión suficiente para el montaje de la planta y tener un acceso directo a las vías del tren y carretera nacional, lo que es ventajoso para el transporte de algunos insumos.

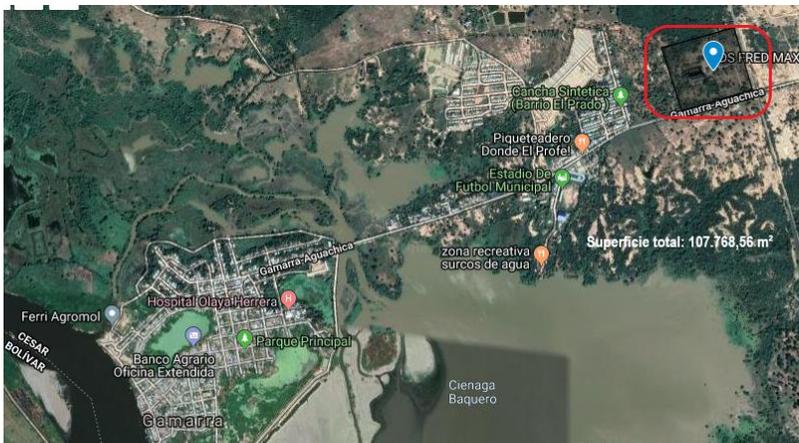


Figura 8. Ubicación del predio seleccionado para la construcción de la planta.

Fuente: Google Maps, imágenes ©2019 CNES / Airbus, Datos del mapa.

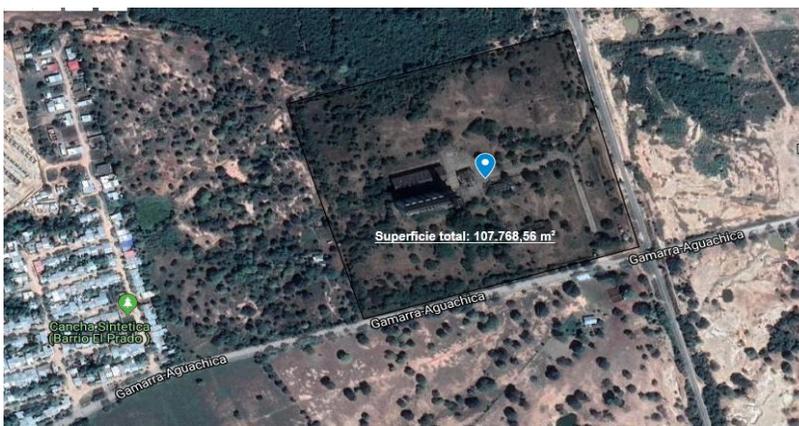


Figura 9. Terreno donde se construirá la planta de producción de biodiesel a partir de aceite de palma.

Fuente: Google Maps, imágenes ©2019 CNES / Airbus, Datos del mapa.

8.1.2.1. **Gamarra, Cesar**

El terreno fue seleccionado por cumplir con varios de los criterios de selección mencionados en la sección de criterios a evaluar. Este municipio está localizado al sur occidente del Departamento del Cesar, limita al norte con el Municipio de la Gloria, al sur y al oriente con el Municipio de Aguachica y al occidente con el río Magdalena que lo separa del Municipio de Morales – Bolívar, [65], esto hace que cumpla en gran medida con el criterio de proximidad a la materia prima principal, que es el fruto de la palma aceitera, debido a que la ubicación de los tres cultivos se encuentra en zonas aledañas y de fácil acceso a este municipio. Otro criterio es la facilidad de transporte debido a que su cabecera municipal se encuentra comunicada por carretera con la troncal de oriente (cabecera municipal de Aguachica) en una distancia de 15 Km la cual es un importante corredor de la Red Nacional de Vías de Colombia. Además, el alto requerimiento de agua para el proceso hace que este sea el criterio más importante a evaluar, criterio que este municipio cumple debido a que hidrográficamente está localizado en la margen derecha de la principal arteria fluvial del país el río Grande de la Magdalena y tiene afluente como las quebradas de Buturama, la Dorada, Noréan, San Antonio, Caimán, Pital, los cuales desembocan en las diferentes ciénagas del municipio, estando estas comunicadas por caños entre las que se destacan Caño tortuga, Caño Pital, Caño Rabón, Caño Zulia, Caño Danta y Caño Sinaí [65].

El río Magdalena baña al municipio en una extensión de 30 Km. y sirve de límite al Departamento del Bolívar. Su principal Puerto es Capulco localizado en la cota 501 [65].

8.1.3. Distribución de la planta

En la figura 10 se presenta una vista preliminar del proceso de producción de biodiesel, dentro de la cual se indica una aproximación a la ordenación de espacios necesarios para el almacenamiento de reactivos y productos, equipos y respectivas líneas de producción, zona administrativa y de control, servicios para el personal, entre otros aspectos.

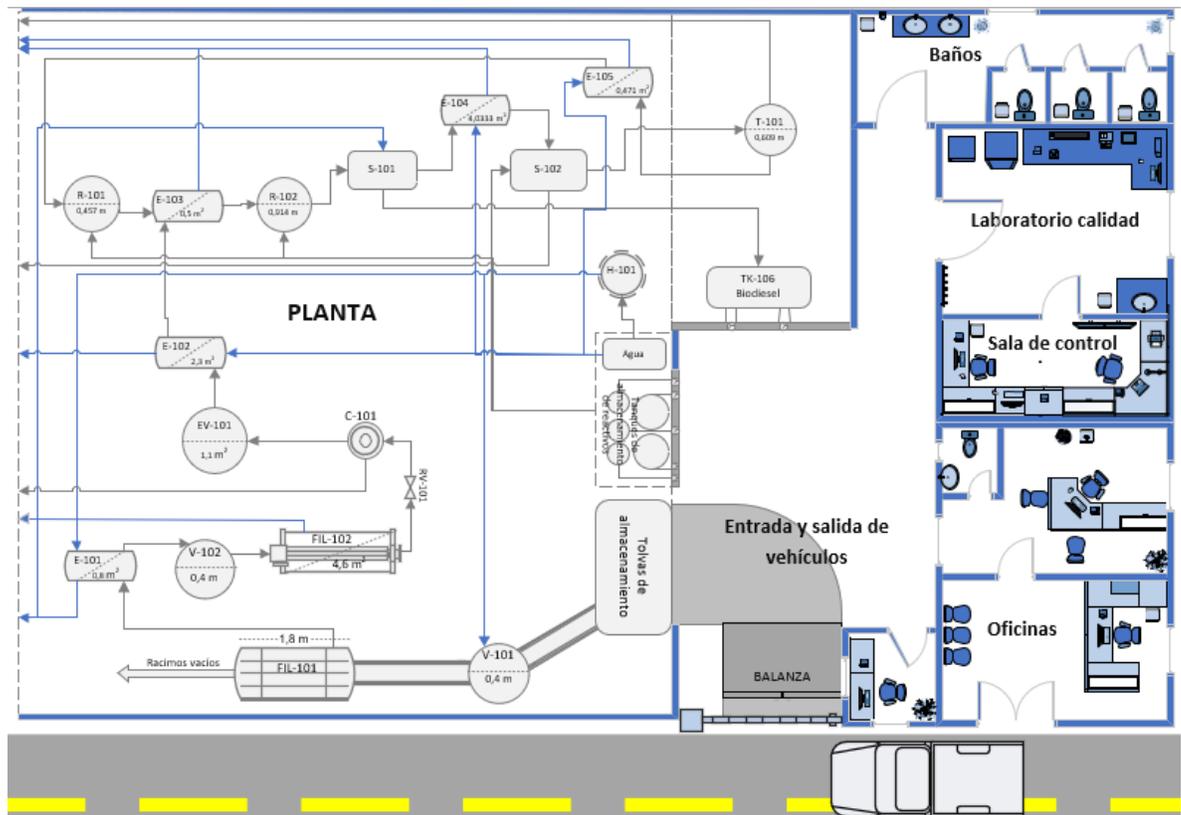


Figura 10. Vista preliminar del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de palma.

Fuente: Autor.

8.2. Viabilidad económica

Al comparar las etapas de diseño en las gráficas 2 y 3, se ve como varía de forma significativa los costos de las materias primas utilizadas, esto debido a optimizaciones realizadas al proceso, con el fin de mejorar las condiciones del proceso y obtener una mayor cantidad de producido de biodiesel.

En la tabla 14 se observan los datos de gastos de utilidades de la planta, donde se puede determinar que al realizar mejoras en el proceso como el aprovechamiento energético en varios intercambiadores se reducen estos costos y se aumenta la viabilidad económica de la planta.

Tabla 15. Comparación de ingresos por ventas para las fases conceptual y detallada.

	INGENIERÍA CONCEPTUAL		INGENIERÍA DETALLADA	
Costo de materias primas por hora	267	USD/h	248	USD/h
Costo total de materias primas	2.130.000	USD/año	1.980.000	USD/año
Venta de productos por hora	450	USD/h	449	USD/h
Ventas totales de productos	3.600.000	USD/año	3.590.000	USD/año
Nombre del producto	Biodiesel		Biodiesel	
Flujo del producto	474	kg/h	535	kg/h
Tasa de producto principal por período	3.790.000	kg/año	4.280.000	kg/año

Fuente: Autor.

El valor presente neto (VPN) es el valor actual de los flujos futuros de efectivo descontado. Este criterio se presenta en las gráficas 4 y 5 donde después del primer año la pendiente para ambas es positiva lo que indica que el proyecto generará capital más allá del retorno de la inversión, además se puede observar que el periodo de retorno para la fase final (detallada) del proyecto disminuye con respecto a la fase conceptual por aproximadamente un año de diferencia.

Tabla 16. Comparación de estudios económicos para las etapas conceptual y detallada.

	ING. CONCEPTUAL	ING. DETALLADA
Costo total Operacional (USD/año)	2.420.000	2.240.000
Costos de mantenimiento (USD/año)	1.760	1.760
Cargos operativos (USD/año)	15.360	12.860
Tasa interna de retorno (%)	54%	71%
Beneficio bruto (USD/año)	1.180.000	1.350.000

Fuente: Autor.

La tasa interna de retorno (TIR) es la tasa de descuento en la que se iguala el valor de la inversión (pagos) con el valor de los flujos de tesorería futuros (cobros) [66].

Teniendo en cuenta los porcentajes de TIR el proyecto evaluado devuelve el capital invertido más una ganancia adicional, lo que indica que, para ambos casos evaluados en la tabla 16, ingeniería conceptual y detallada que el proyecto es rentable.

Además, se puede decir que analizando la literatura como el proyecto realizado por Edwin Alberto Bulla llamado *“Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura”* [16] en donde el autor reporta un TIR a 10 años de 13,4% con un periodo de reembolso de 6 años, este no presenta resultados tan ventajosos a nivel económico debido a que al utilizar el aceite de fritura en la producción de biodiesel las conversiones no son tan elevadas.

9. CONCLUSIONES

El método de extracción del aceite debe ser seleccionado dependiendo del tipo de materia prima, debido a que una buena selección influirá en el rendimiento del proceso.

Se obtuvieron rendimientos de proceso favorables debido a que se realizó la integración de equipos no convencionales basados en referencias bibliográficas, las cuales se enfocaban en mejorar el proceso de extracción de aceite de palma.

Se establece que dependiendo del proceso diseñado y de la materia prima seleccionada el proyecto reflejará un aumento o disminución del lucro, como se evidencia en los resultados económicos, donde el aceite de palma presenta una tasa interna de retorno de 71% y un periodo de reembolso de 3 años, a diferencia de lo descrito en la literatura para el aceite de frituras, el cual presentó una tasa interna de 13,4% y un periodo de reembolso de 6 años.

Para obtener un resultado más refinado del proceso se diseñaron y evaluaron diferentes propuestas de las cuales fue seleccionada la que condujera a obtener una mayor eficiencia, esto se ve reflejado en la disminución del costo de producción o costo operacional, incidiendo directamente en el beneficio bruto con un aumento estimado de 170.000 \$USD.

Se debe tener en cuenta que la viabilidad económica reportada se ve afectada por los precios del petróleo, debido a que Colombia por ser un país en vía de desarrollo debe mantener fijos los precios al consumidor final de combustibles como gasolina y diesel, haciendo variaciones en los precios de biodiesel y directamente afectando el sector agrícola.

REFERENCIAS

- [1] T. Issariyakul and A. K. Dalai, "Biodiesel from vegetable oils," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 446–471, Mar. 2014.
- [2] D. Huang, H. Zhou, and L. Lin, "Biodiesel: an Alternative to Conventional Fuel," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 1874–1885, Jan. 2012.
- [3] T. Issariyakul and A. K. Dalai, "Comparative kinetics of transesterification for biodiesel production from palm oil and mustard oil," *Can. J. Chem. Eng.*, 2012.
- [4] P. Singh Nee Nigam and A. Pandey, *Biotechnology for agro-industrial residues utilisation: Utilisation of agro-residues*. 2009.
- [5] Fedepalma, "Producción mensual de aceite de palma crudo."
- [6] "Ingesol | Ingeniería de proyectos." [Online]. Available: <http://www.ingesol.net/web/es/ingenieria.html>. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [7] "Etanol y biodiésel en Colombia," 2017. [Online]. Available: <http://www.motor.com.co/actualidad/industria/etanol-biodiesel-colombia/29097>. [Accessed: 23-Feb-2019].
- [8] "La Industria Biodiesel en Colombia - ANEIA - Universidad de Los Andes." [Online]. Available: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2014/03/10/la-industria-biodiesel-en-colombia/>. [Accessed: 23-Feb-2019].
- [9] Federación nacional de cultivadores de palma de aceite, "La palma de aceite en Colombia," 2018. [Online]. Available: <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>. [Accessed: 23-Feb-2019].
- [10] Federación nacional de cultivadores de palma de aceite, "Infografía del Cesar," p. 7688, 2018.
- [11] OLEOFLORES S.A., "Productos: Biodiesel." [Online]. Available:

<https://www.oleoflores.com/products/biodiesel>. [Accessed: 12-Jun-2019].

- [12] C. Á. Maciel, “Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional.”
- [13] M. Fatih Demirbas, M. Balat, and H. Balat, “Biowastes-to-biofuels,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 4, pp. 1815–1828, Apr. 2011.
- [14] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Ceniceros, and M. Natarajan, “Review of biodiesel composition, properties, and specifications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 143–169, Jan. 2012.
- [15] “ASTM International - Standards Worldwide.” [Online]. Available: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html. [Accessed: 20-May-2019].
- [16] E. A. Bulla Pereira, “Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura,” *Univ. Nac. Colomb.*, pp. 1–214, 2014.
- [17] J. Lombana, J. Vega, E. Britton, and S. Herrera, *Análisis del sector biodiésel en Colombia y su cadena de suministro*, no. January 2016. 2015.
- [18] C. Tejada Tovar, L. Tejada Benítez, ; Ángel, V. Ortiz, ; Luis, and M. Rodríguez, “OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE DIFERENTES TIPOS DE GRASA RESIDUAL DE ORIGEN ANIMAL EXTRACTING BIODIESEL FROM DIFFERENT TYPES OF ANIMAL ORIGIN RESIDUAL FAT.”
- [19] D. L. Manuale, G. C. Torres, C. R. Vera, and J. C. Yori, “Study of an energy-integrated biodiesel production process using supercritical methanol and a low-cost feedstock,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 140, pp. 252–261, Dec. 2015.
- [20] Fundación española de aceite de palma sostenible, “Los ácidos grasos más presentes en el aceite de palma son el palmítico y el oleico - Aceite de palma sostenible.” [Online]. Available: <https://aceitedepalmasostenible.es/los->

acidos-grasos-mas-presentes-aceite-palma-palmitico-oleico/. [Accessed: 29-May-2019].

- [21] D. D. Chabukswar, P. K. K. S. Heer, and V. G. Gaikar, "Esterification of palm fatty acid distillate using heterogeneous sulfonated microcrystalline cellulose catalyst and its comparison with H₂SO₄ catalyzed reaction," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 22, pp. 7316–7326, 2013.
- [22] P. N. Benjumea Hernandez, J. R. Agudelo Santamaria, and L. A. Rios, *Biodiesel: produccion, calidad y caracterizacion*. Editorial Universidad de Antioquia, 2009.
- [23] Morrison Robert T & Boyd Robert N., "Estructuras y propiedades, Química orgánica," *Química Orgánica*, 1998.
- [24] F. Ma and M. A. Hanna, "Biodiesel production: a review," *Bioresour. Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 1–15, Oct. 1999.
- [25] F. Ma and M. A. Hanna, "Biodiesel production: a review 1."
- [26] L. C. Meher, D. Vidya Sagar, and S. N. Naik, "Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 10, no. 3, pp. 248–268, 2006.
- [27] Congreso de la República de Colombia, "LEY 693 DE 2001 (septiembre 19)," 2001.
- [28] Congreso de la República de Colombia, "LEY 939 DE 2004," 2004.
- [29] Consejo Nacional de Política Económica y Social and República de Colombia, "LINEAMIENTOS DE POLÍTICA PARA PROMOVER LA PRODUCCIÓN SOSTENIBLE DE BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA," 2008.
- [30] Organización Naciones Unidas, "Cambio Climático," 2019.
- [31] CONGRESO DE COLOMBIA, "LEY 1715 DE 2014," 2014.

- [32] J. Mesa Dishington Presidente Ejecu and vo D. Bogotá, “La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia,” 2013.
- [33] Federación nacional de cultivadores de palma de aceite, “Extracción de aceite de palma y nuevos criterios de procesamiento | Revista Palmas.” [Online]. Available:
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/310>.
[Accessed: 11-Jun-2019].
- [34] Renzo Boccoardo, “Creatividad en la ingeniería de diseño,” *Universidad Simón Bolívar*, 2006. [Online]. Available:
https://books.google.com.co/books?id=9QfSinuNUrUC&pg=PA47&dq=metodologia+de+diseño&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj9_NeiqlzjAhWirFkKHV_YDs wQ6AEISDAG#v=onepage&q&f=false. [Accessed: 28-Jun-2019].
- [35] M. M. Gómez, *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Editorial Brujas, 2006.
- [36] J. J. Miranda Miranda, *El desafío de la gerencia de proyectos alcance tiempo presupuesto calidad*. MM editores, 2004.
- [37] D. M. Himmelblau and K. B. Bischoff, *Análisis y simulación de procesos*. Reverté, 1976.
- [38] J. Costa López, *Curso de química técnica : introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte en la ingeniería química*. Reverté, 1984.
- [39] ministerio de minas y energía, “Resolución número 40184 de 27 feb 2018,” 2018.
- [40] ministerio de minas y energía, “Resolución Número 40213 de 2019.” 2019.
- [41] Federación nacional de cultivadores de palma de aceite, “Resolución Número 40400 de 2019.” 2019.

- [42] “Resolución FEP 194- marzo 2019.pdf.” .
- [43] Federación nacional de cultivadores de palma de aceite, “Extracción de Aceite de Palma,” pp. 1–7, 2019.
- [44] V. Aristizabal M, C. A. García V, and C. A. Cardona A, “Integrated Production of Different Types of Bioenergy from Oil Palm Through Biorefinery Concept,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 7, no. 4, pp. 737–745, 2016.
- [45] Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, “n-HEXANO.”
- [46] Biocombustibles sostenibles del caribe S.A., “HOJA DE SEGURIDAD GLICERINA CRUDA MIN.80%.”
- [47] Química Básica Colombiana S.A., “Hoja de seguridad para el Ácido Sulfúrico,” 2016.
- [48] GTM Colombia S. A., “Metanol Ficha de datos de seguridad,” 2016.
- [49] Ascanio Química, “Ficha de Seguridad SOSA CÁUSTICA,” 2011.
- [50] Federación nacional de cultivadores de palma de aceite, “La palma de aceite en Colombia (Fedepalma),” 2018. [Online]. Available: <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>. [Accessed: 11-Jun-2019].
- [51] Katherin Alfonso, “Producción nacional de biodiésel podría atender la demanda del biocombustible,” 2017. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/economia/produccion-nacional-de-biodiesel-podria-atender-la-demanda-del-biocombustible-2552357>. [Accessed: 11-Jun-2019].
- [52] “Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia.” [Online]. Available: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-2357.htm>. [Accessed: 12-Jul-2019].

- [53] Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, “Demanda Nacional de Biodiésel.” [Online]. Available: <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-produccion-titulo-Biodiesel.htm>. [Accessed: 11-Jun-2019].
- [54] A. E. Bailey, *Aceites y grasas industriales*. Reverté, 2001.
- [55] Federación nacional de cultivadores de palma de aceite, “PRENSADO,” pp. 1–4, 2019.
- [56] L.I. Orificia, b C.D. Bahla, M.C. Gelya, A. Bandonic, and and A.M. Pagano, “MODELING AND SIMULATION OF THE BIODIESEL PRODUCTION IN A PILOT CONTINUOUS REACTOR,” 2013.
- [57] R. Valbuena Alvarez, *La evaluación del proyecto en la decisión del empresario*. Facultad de Economía, UNAM, 2000.
- [58] J. A. Dávila, V. Hernández, E. Castro, and C. A. Cardona, “Economic and environmental assessment of syrup production. Colombian case,” *Bioresour. Technol.*, vol. 161, pp. 84–90, Jun. 2014.
- [59] R. M. Laura, “Liquidación de fruto.” Gamarra, Cesar, p. 1, 2019.
- [60] RWCHEM, “Cost no 56-81-5 Glycerin glycerol,” *Alibaba*, 2019. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-supply-best-price-cas-no_60555593437.html?spm=a2700.7724838.2017115.40.7b4a312aY6Y6xh&s=p. [Accessed: 16-Jul-2019].
- [61] Chemicals commodity and product finder, “ICIS,” 2014. [Online]. Available: <https://www.icis.com/explore/chemicals/channel-info-chemicals-a-z/>. [Accessed: 16-Jul-2019].
- [62] C. D. Botero, D. L. Restrepo, and C. A. Cardona, “A comprehensive review on the implementation of the biorefinery concept in biodiesel production plants,”

Biofuel Res. J., 2017.

- [63] S. Warren, S. J.D., L. Daniel R, and W. Soemantri, *PRODUCT AND PROCESS DESIGN PRINCIPLES*, Tercera ed. 2009.
- [64] CAROLINA; MUJICA GRANADOS, “EVOLUCIÓN DEL SECTOR PALMICULTOR,” Bucaramanga, 2010.
- [65] Alcaldía Municipal de Gamarra en Cesar, “Gamarra-Nuestro municipio.” [Online]. Available: <http://www.gamarra-cesar.gov.co/municipio/nuestro-municipio>. [Accessed: 10-Jul-2019].
- [66] T. Richard, B. Richard, W. Wallace, S. Joseph, and B. Debangsu, *Analysis, Synthesis and desing of chemical processes*. 2012.
- [67] R. María del Carmen and F. Gabriela Mónica, “UNA METODOLOGÍA DE AYUDA A LA DECISIÓN MULTICRITERIO (MÉTODOS ELECTRE) CON APLICACIÓN A PROBLEMAS MEDIOAMBIENTALES,” 2018.

ANEXOS

Anexo I: Diagrama de proceso de flujo de bloques

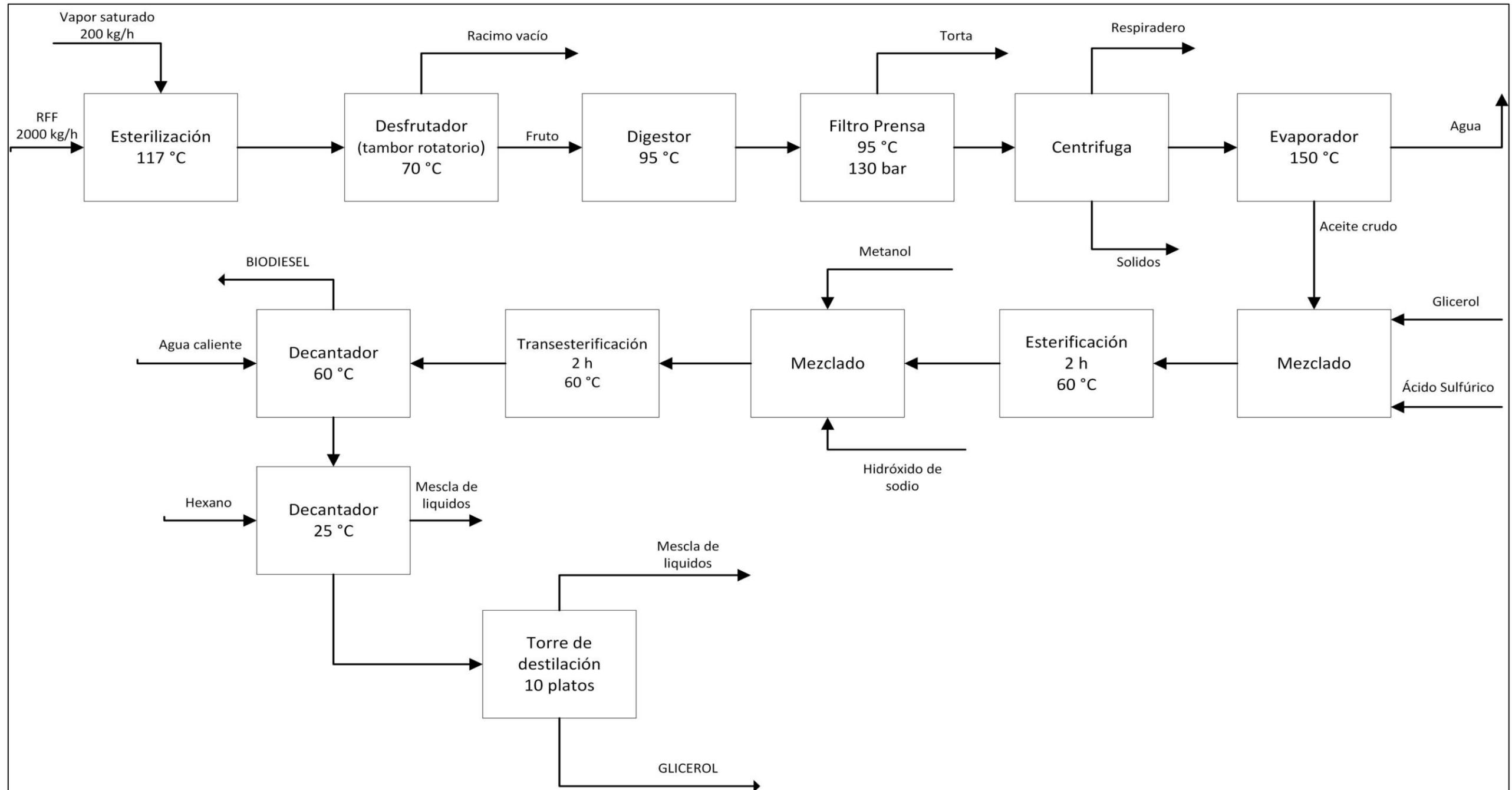


Figura 11. Diagrama de proceso de flujo de bloques.

Fuente: Autor.

Anexo II: Diagrama de flujo de proceso (PFD)

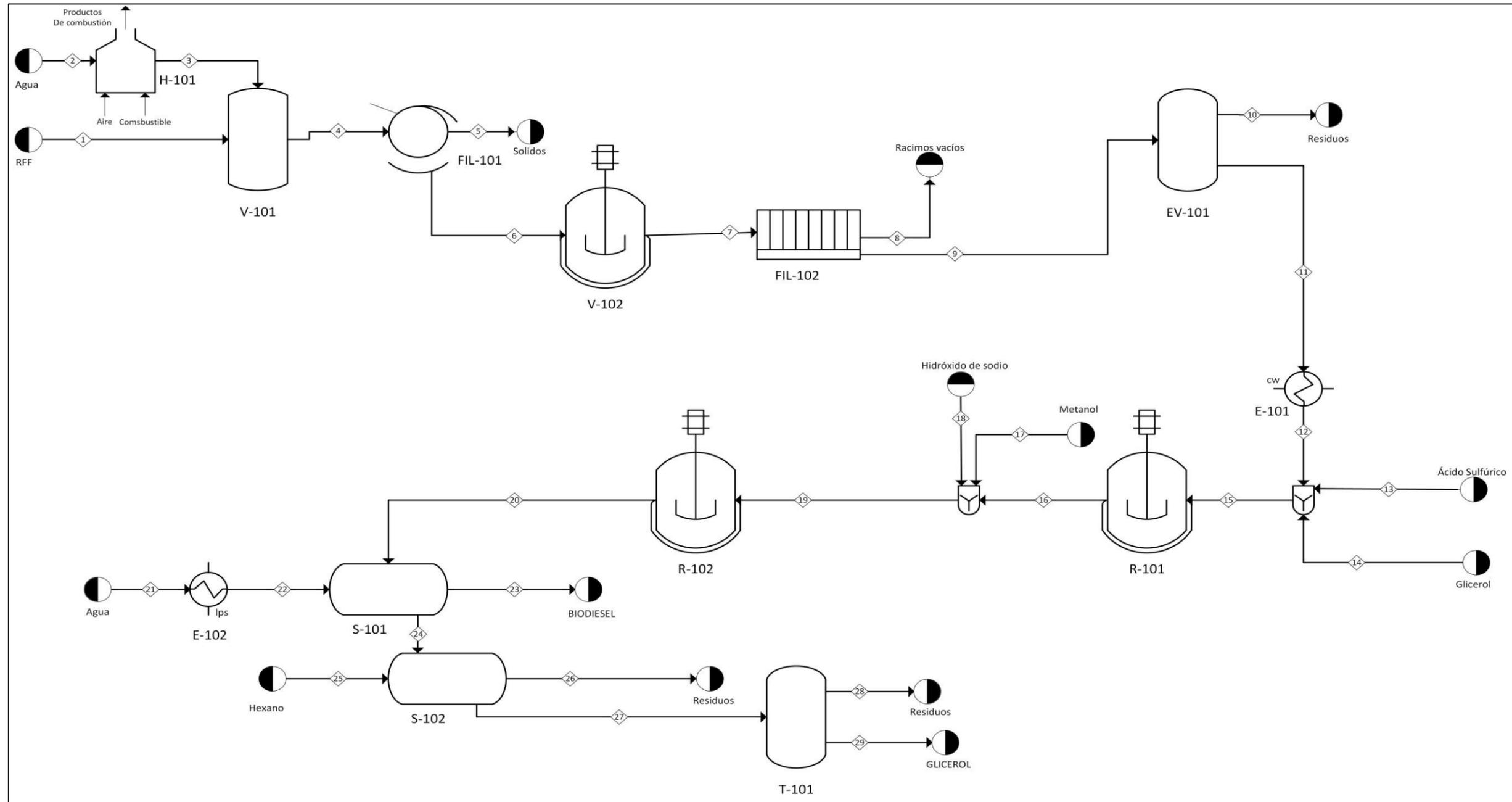


Figura 12. Diagrama de flujo del proceso.

Fuente: Autor.

Tabla 17. Descripción de las corrientes de proceso.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	25	25	147,7	70	70	70	95	92,05	95,00
Presión (bar)	1,01	1,01	4,46	1,01	1,01	1,01	1,01	130	1,01
Fracción de Vapor	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Fracción de Líquido	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Fracción de Sólido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal de moles (kmol/h)	41,84	11,10	11,10	52,94	5,29	47,64	47,64	4,76	42,88
Caudal de masa (kg/h)	1344,94	200	200	1544,94	154,49	1390,45	1390,45	139,04	1251,40
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tripalmitina (Aceite)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celulosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	39,36	11,10	11,10	50,46	5,05	45,41	45,41	4,54	40,87
Hidróxido de sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido sulfúrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido palmítico (Aceite)	2,48	0	0	2,48	0,25	2,23	2,23	0,22	2,01
Fracción de Vapor	0			0	0	0	0	0	0
Fracción de Líquido	0			0	0	0	0	0	0
Fracción de Sólido	1			1	1	1	1	1	1
Flujo (kmol/h)	4,36955	0	0	4,37	3,44	0,93	0,93	0,09	0,83
Flujo (kg/h)	655,06	0	0	655,06	516,02	139,04	139,04	13,90	125,14
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tripalmitina (Aceite)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celulosa	2,59	0	0	2,590	2,040	0,550	0,550	0,055	0,495
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidróxido de sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	1,78	0	0	1,78	1,40	0,38	0,38	0,04	0,34
Ácido sulfúrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido palmítico (Aceite)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLUJO TOTAL (kg/h)	2000	200	200	2200	670,51	1529,49	1529,49	152,95	1376,54

Fuente: Autor.

Tabla 18. Descripción de las corrientes de proceso.

	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Temperatura (°C)	150	150	65	25	25	61,07	60	25	25	50,64	60
Presión (bar)	1	1	1,01	1,01	1,01	1,01	1	1,01	1	1	1,01
Fracción de Vapor	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción de Líquido	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Sólido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal de moles (kmol/h)	40,33	2,55	2,55	0,05	0,63	3,23	3,23	3,28	5,40	11,90	11,90
Caudal de masa (kg/h)	730,26	521,14	521,14	5,11	58	584,25	584,25	105	100	789,25	789,25
Flujos de componentes individuales (kmol/h)											
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,75
Tripalmitina (Aceite)	0	0	0	0	0	0	0,62	0	0	0,62	0,04
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	3,28	0	3,28	1,53
Celulosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	40,32	0,55	0,55	0	0	0,55	2,43	0	5,27	7,70	7,70
Hidróxido de sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0,13	0,13
Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerol	0	0	0	0	0,63	0,63	5,48E-03	0	0	5,48E-03	0,59
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido sulfúrico	0	0	0	0,05	0	0,05	0,05	0	0	0,05	0,05
Ácido palmítico (Aceite)	0,02	1,99	1,99	0	0	1,99	0,12	0	0	0,12	0,12

Fuente: Autor.

Tabla 19. Descripción de corrientes de proceso.

	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Temperatura (°C)	25	60	70	70	25	25	25	99,71	290,78
Presión (bar)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción de Líquido	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Sólido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal de moles (kmol/h)	5,55	5,55	1,77	15,68	0,17	1,89	13,97	13,28	0,70
Caudal de masa (kg/h)	100	100	474,37	414,88	15	129,16	300,72	241,24	59,48
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	1,750239	1,64E-08	0	1,64E-08	9,77E-17	0	0
Tripalmitina (Aceite)	0	0	4,38E-12	0,04	0	0,04	2,44E-10	2,95E-66	2,44E-10
Metanol	0	0	2,91E-10	1,53	0	1,53	7,18E-09	7,18E-09	1,64E-15
Celulosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	5,55	5,55	1,51E-03	1,32E+01	0	9,18E-10	13,25	1,32E+01	7,01E-04
Hidróxido de sodio	0	0	0,01	0,11	0	0,02	0,10	5,41E-66	0,10
Hexano	0	0	0	0	0,17	0,17	9,39E-13	0,00E+00	0
Glicerol	0	0	3,41E-11	0,59	0	3,43E-11	0,59	0,0261792	5,63E-01
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido sulfúrico	0	0	5,04E-03	0,05	0	6,75E-03	0,04	1,77E-03	0,04
Ácido palmítico (Aceite)	0	0	1,29E-11	0,12	0	0,12	7,20E-10	2,57E-16	7,20E-10

Fuente: Autor.

Anexo III: Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

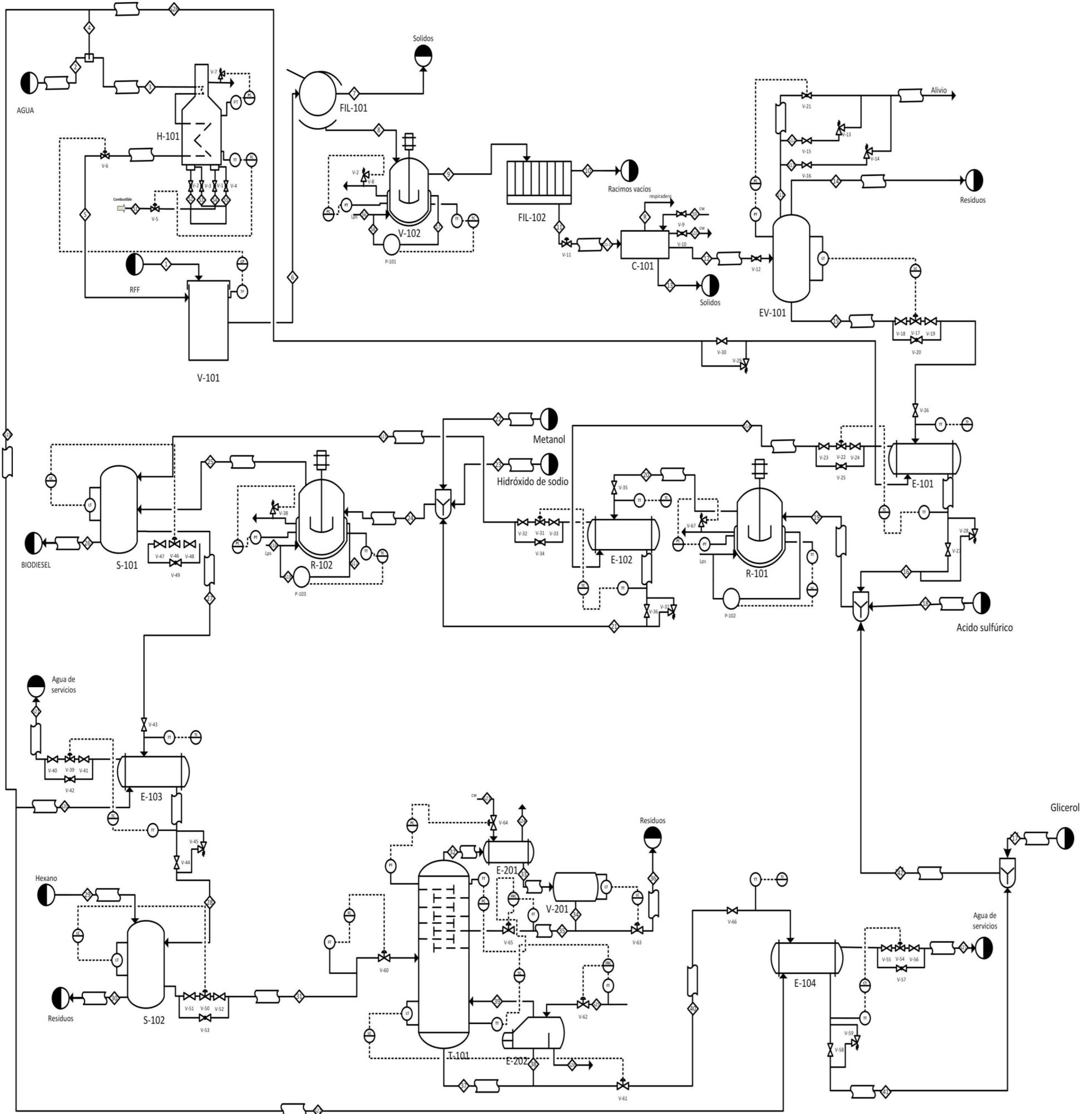


Figura 13. Diagrama de flujo de tubería e instrumentación.

Fuente: Autor.

Tabla 20. Dimensionamiento de los equipos.

FIL-101		FIL-102		H-101		S-101	
Equipo de desfrutado		Prensa		Generación de vapor de baja		Decantador para eliminar impurezas del biodiesel	
Presión (Bar)	1	Material	A285C	Tipo	Fraser	Temperatura (°C)	70
Temperatura (°C)	70	Superficie (m2)	4,6452	Presión (Bar)	4,46	Presión (Bar)	1
Diámetro del tambor (m)	1,2192	Presión (Bar)	130	Temperatura (°C)	147,7	Tipo de cabeza	TORI
Longitud del tambor (m)	1,8288	Temperatura (°C)	92	Duty (W)	146647,67	Diámetro (m)	1,0668
Superficie (m2)	92,903	Peso total (kg)	430	Combustible	GLP	Altura (m)	3,81
Material	A285C			Material	A 214	Material de la carcasa	A 516
V-101		V-102		T-101		S-102	
Recipiente de esterilización vertical		Recipiente digestor		columna de destilación para purificar el glicerol		Decantador para eliminar impurezas del glicerol	
Presión (Bar)	1	Presión (Bar)	1	Diámetro (m)	0,6096	Temperatura (°C)	25
Temperatura (°C)	116,8	Temperatura (°C)	95	Altura (m)	10,516	Presión (Bar)	1
Diámetro (m)	0,457	Diámetro (m)	0,457	Presión (Bar)	1	Tipo de cabeza	ELLIP
Altura (m)	2,59	Altura (m)	2,438	Temperatura (°C)	290,78	Diámetro (m)	1,0668
Material de la carcasa	A285C	Material de la carcasa	A285C	Numero de platos	10	Altura (m)	3,81
Orientación	Vertical	Orientación	Vertical	Tipo de platos	SIEVE	Material de la carcasa	A 516
				Etapa de flujo de entrada	8		
				Relación de reflujo molar	0,01		
R-101		R-102		EV-101		C-101	
Reactor de esterificación		Reactor de transesterificación		Columna Flash para eliminar impurezas del aceite extraído		Centrifuga para eliminar impurezas del aceite extraído	
Material de la carcasa	A285C	Material de la carcasa	A285C	Modelo de artículo	FLASH	Tipo de artículo	ATM SUSPEN
Temperatura (°C)	60	Temperatura (°C)	60	Tipo de cabeza	ELLIP	Diámetro (mm)	610
Tiempo de residencia (h)	2	Tiempo de residencia (h)	2	Presión (Bar)	1	Capacidad (m3)	0,056634
Capacidad (l)	2742,22853	Capacidad (l)	2242,2588	Temperatura (°C)	150	Material	A285C
Diámetro (m)	1,0668	Diámetro (m)	1,0668	Fración de vapor	0,94063	Potencia del conductor (KW)	15
Altura (m)	4,572	Altura (m)	4,4196	Volumen de líquido (m3)	3,4055		
Orientación	Vertical	Orientación	Vertical	Material de la carcasa	A 516		
DATOS DE LA CHAQUETA		DATOS DE LA CHAQUETA		Diámetro del recipiente (m)	1,0668		
Tipo de chaqueta	FULL	Tipo de chaqueta	FULL	Altura (m)	3,81		
Material de la chaqueta	A285C	Material de la chaqueta	A285C	Especiación del anillo de refuerzo (mm)	468,75		
Temperatura de la chaqueta (°C)	125	Temperatura de la chaqueta (°C)	125				
Grosor de la chaqueta (mm)	8	Grosor de la chaqueta (mm)	8				
E-101		E-102		E-103		E-104	
Tipo	BEM	Tipo	BEM	Tipo	BEM	Tipo	BEM
Área de transferencia de calor (m2)	2,2014	Área de transferencia de calor (m2)	0,471	Área de transferencia de calor (m2)	4,0333	Área de transferencia de calor (m2)	0,471
Duty (W)	33929,63802	Duty (W)	5648,74	Duty (W)	13733,04188	Duty (W)	7064,39
Presión (Bar)	1	Presión (Bar)	1	Presión (Bar)	1	Presión (bar)	1
Carcasa		Carcasa		Carcasa		Carcasa	
Temperatura (°C)	150	Temperatura (°C)	60	Temperatura (°C)	60	Temperatura (°C)	325,8
Fase	L	Fase	L	Fase	L	Fase	L
Material de la carcasa	A285C	Material de la carcasa	A285C	Material de la carcasa	A285C	Material de la carcasa	A285C
Longitud de la carcasa (m)	6	Longitud de la carcasa (m)	6	Longitud de la carcasa (m)	6	Longitud de la carcasa (m)	6
Diámetro de la carcasa (mm)	100	Diámetro de la carcasa (mm)	50	Diámetro de la carcasa (mm)	100	Diámetro de la carcasa (mm)	50
Tubos		Tubos		Tubos		Tubos	
Temperatura (°C)	99,6	Temperatura (°C)	99,6	Temperatura (°C)	55,563	Temperatura (°C)	99,6
Fase	L	Fase	L	Fase	L	Fase	L
Material del tubo	A 214	Material del tubo	A 214	Material del tubo	A 214	Material del tubo	A 214
Longitud del tubo extendida (m)	6	Longitud del tubo extendida (m)	6	Longitud del tubo extendida (m)	6	Longitud del tubo extendida (m)	6
Diámetro exterior del tubo (mm)	25	Diámetro exterior del tubo (mm)	25	Diámetro exterior del tubo (mm)	25	Diámetro exterior del tubo (mm)	25
Número de tubos por carcasa	5	Número de tubos por carcasa	1	Número de tubos por carcasa	4	Número de tubos por carcasa	1

Fuente: Autor.

Tabla 21. Descripción de las corrientes de proceso.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura (°C)	25	15	15	15	148	70	70,00	95	95
Presión (bar)	1	1	1	1	4	1	1	1	1
Fracción de Vapor	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Fracción de Líquido	1	1	1	1	0	1	1	1	1
Fracción de Sólido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal de moles (kmol/h)	41,84	65,50	38,97	26,53	11,11	52,94	5,29	47,65	47,65
Caudal de masa (kg/h)	1344,94	1180	702,1	477,9	200,10	1545,04	154,50	1390,54	1390,54
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tripalmitina (Aceite)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celulosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	39,36	65,50	38,97	26,53	11,11	50,46	5,05	45,42	45,42
Hidróxido de sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido sulfúrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido palmítico (Aceite)	2,48	0	0	0	0	2,48	0,25	2,23	2,23
Fracción de Vapor	0					0	0	0	0
Fracción de Líquido	0					0	0	0	0
Fracción de Sólido	1					1	1	1	1
Flujo (kmol/h)	4,37					4,37	3,44	0,93	0,93
Flujo (kg/h)	655,06					655,06	516,01	139,05	139,05
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0					0	0	0	0
Tripalmitina (Aceite)	0					0	0	0	0
Metanol	0					0	0	0	0
Celulosa	2,59					2,59	2,04	0,55	0,55
Agua	0					0	0	0	0
Hidróxido de sodio	0					0	0	0	0
Hexano	0					0	0	0	0
Glicerol	0					0	0	0	0
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	1,78					1,78	1,40	0,38	0,38
Acido sulfúrico	0					0	0	0	0
Ácido palmítico (Aceite)	0					0	0	0	0
FLUJO TOTAL (kg/h)	2000	1180	702,1	477,9	200,10	2200,10	670,51	1529,59	1529,59

Fuente: Autor.

Tabla 22. Descripción de las corrientes de proceso.

	10	11	11-1.	12	13	14	15	16	17
Temperatura (°C)	92,05	92,05	95,00	95,00	95,00	150	150	65	25
Presión (bar)	130	130	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Vapor	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Fracción de Líquido	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Fracción de Sólido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal de moles (kmol/h)	0,48	47,17	47,17	46,70	0,47	43,93	2,77	2,77	0,38
Caudal de masa (kg/h)	13,91	1376,63	1376,63	1362,86	13,77	795,35	567,52	567,52	35
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tripalmitina (Aceite)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Metanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celulosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0,45	44,96	44,96	44,51	0,45	43,91	0,60	0,60	0
Hidróxido de sodio	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerol	0	0	0	0	0	0	0	0	0,38
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido sulfúrico	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido palmítico (Aceite)	0,02	2,21	2,21	2,19	0,02	0,02	2,17	2,17	0
Flujos de componentes individuales (kg/h)									
Fracción de Vapor	0	0	0		0				
Fracción de Líquido	0	0	0		0				
Fracción de Sólido	1	1	1		1				
Flujo (kmol/h)	0,01	0,92	0,92		0,83				
Flujo (kg/h)	1,39	137,66	137,66		124,03				
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	0		0				
Tripalmitina (Aceite)	0	0	0		0				
Metanol	0	0	0		0				
Celulosa	0,01	0,54	0,54		0,49				
Agua	0	0	0		0				
Hidróxido de sodio	0	0	0		0				
Hexano	0	0	0		0				
Glicerol	0	0	0		0				
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0,00	0,37	0,37		0,34				
Acido sulfúrico	0	0	0		0				
Ácido palmítico (Aceite)	0	0	0		0				
FLUJO TOTAL (kg/h)	15,30	1514,29	1514,29	1376,49	137,80	795,35	581,15	581,15	35

Fuente: Autor.

Tabla 23. Descripción de las corrientes de proceso.

	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Temperatura (°C)	25	60,04	60	60	25	25	50,41	60	60
Presión (bar)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción de Líquido	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Sólido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal de moles (kmol/h)	0,05	4,09	4,09	13,24	3,75	5,40	13,24	13,24	2,15
Caudal de masa (kg/h)	5,11	662,99	662,99	882,99	120	100	882,99	882,99	564,66
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	0	0	0	0	0	0	0	2,08E+00	2,08E+00
Tripalmitina (Aceite)	0	0,00	0,72	0,72	0	0	0,72	2,34E-02	2,47E-12
Metanol	0	0,00	0,00	3,75	3,75	0	3,75	1,67E+00	3,06E-10
Celulosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	0	0,60	2,75	8,02	0	5,27	8,02	8,02	0,00
Hidróxido de sodio	0	0,51	0,51	0,64	0	0,13	0,64	0,64	0,06
Hexano	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Glicerol	0	0,74	0,02	0,02	0	0	0,02	0,72	0,00
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ácido sulfúrico	0,05	0,07	0,07	0,07	0	0	0,07	0,07	0,01
Ácido palmítico (Aceite)	0	2,17	0,02	0,02	0	0	0,02	0,02	0,00
FLUJO TOTAL (kg/h)	5,11	676,62	676,62	896,62	120	100	896,62	896,62	578,29

Fuente: Autor.

Tabla 24. Descripción de las corrientes de proceso.

	27	28	29	30	31	36	40	41	42
Temperatura (°C)	60	30	25	25	25	100,33	321,34	25	25,00
Presión (bar)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fracción de Líquido	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fracción de Sólido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal de moles (kmol/h)	19,58	19,58	0,12	1,90	17,79	16,90	0,89	0,89	1,27
Caudal de masa (kg/h)	471,25	471,25	10	91,89	389,37	334,01	55,36	55,36	90,36
Flujos de componentes individuales (kmol/h)									
Palmitato de metilo (Biodiesel)	1,97E-08	1,97E-08	0	1,97E-08	1,57E-16	0	0	0	0
Tripalmitina (Aceite)	2,34E-02	2,34E-02	0	2,34E-02	1,86E-10	2,59E-55	1,86E-10	1,86E-10	1,86E-10
Metanol	1,67E+00	1,67E+00	0	1,67E+00	9,76E-09	9,76E-09	9,63E-16	9,63E-16	9,63E-16
Celulosa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agua	16,51	16,51	0	9,64E-10	1,65E+01	1,65E+01	1,74E-04	1,74E-04	1,74E-04
Hidróxido de sodio	0,58	0,58	0	6,43E-02	5,12E-01	1,51E-59	5,12E-01	5,12E-01	5,12E-01
Hexano	0	0	0,12	0,12	2,25E-12	0	0	0	0
Glicerol	0,72	0,72	0	2,77E-11	0,716	0,36	0,36	0,36	0,74
Ácido glutárico (Hemicelulosa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Acido sulfúrico	0,06	0,06	0	0,01	0,06	0,04	0,02	0,02	0,02
Ácido palmítico (Aceite)	0,02	0,02	0	0,02	1,94E-10	5,13E-13	1,93E-10	1,93E-10	1,93E-10
FLUJO TOTAL (kg/h)	471,25	471,25	10	91,89	389,37	334,01	55,36	55,36	90,36

Fuente: Autor.

Anexo IV: Costo de equipos

Tabla 25. Costos de los equipos de proceso fase detallada.

Equipo	Descripción	Costo directo total	Costo de equipo
		(USD)	(USD)
C-101	ECT BATCH AUTO	165200	99000
E-101	DHE TEMA EXCH	52900	8600
E-102	DHE PRE ENGR	4400	1300
E-103	DHE TEMA EXCH	51200	8100
E-104	DHE TEMA EXCH	147300	72500
E-105	DHE TEMA EXCH	78700	8100
EV-101-flash vessel	DVT CYLINDER	135000	22000
FIL-101	DF ROTY DRUM	161700	93800
FIL-102	EF LEAF WET	42100	29600
H-101	EFU BOX	279900	172700
R-101	DAT REACTOR	261500	100500
R-102	DAT REACTOR	257100	96400
S-101	DVT CYLINDER	116600	17800
S-102	DVT CYLINDER	125100	22000
T-101-bottoms Split	C	0	0
T-101-cond	DHE TEMA EXCH	51400	8700
T-101-cond acc	DHT HORIZ DRUM	116900	17300
T-101-overhead Split	C	0	0
T-101-reflux pump	DCP CENTRIF	30600	4400
T-101-tower	DTW TOWER	246700	30700
V-101	DAT MIXER	148100	40600
V-102	DAT REACTOR	189800	45200

Fuente: Autor.

Anexo V: Flujo de caja de ingeniería conceptual

Tabla 26. Flujo de caja de la ingeniería conceptual.

Año		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R (Ingresos)	Costo/Periodo	0	- 1,97E+06	1,38E+06	1,48E+06	1,60E+06	1,72E+06	1,85E+06	1,99E+06	2,14E+06	2,29E+06	2,46E+06
DEP (Gastos de Depreciación)	Costo/Periodo	0	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080
E (Ganancias antes de impuestos)	Costo/Periodo	0	- 2,07E+06	1,27E+06	1,38E+06	1,50E+06	1,62E+06	1,75E+06	1,89E+06	2,03E+06	2,19E+06	2,35E+06
IMPUESTO (Impuestos)	Costo/Periodo	0	0	420483	456230	494217	534572	577429	622931	671227	722475	776840
NE (Ganancias Netas)	Costo/Periodo	0	- 2,07E+06	853709	926286	1,00E+06	1,09E+06	1,17E+06	1,26E+06	1,36E+06	1,47E+06	1,58E+06
TED (Ganancias Totales)	Costo/Periodo	0	- 1,97E+06	954789	1,03E+06	1,10E+06	1,19E+06	1,27E+06	1,37E+06	1,46E+06	1,57E+06	1,68E+06
TEX (Gastos Totales (Excluye Impuestos y Depreciación))	Costo/Periodo	0	3,13E+06	2,60E+06	2,69E+06	2,78E+06	2,88E+06	2,98E+06	3,08E+06	3,19E+06	3,30E+06	3,41E+06
CF (Flujo de caja para Proyecto)	Costo/Periodo	0	- 1,97E+06	954789	1,03E+06	1,10E+06	1,19E+06	1,27E+06	1,37E+06	1,46E+06	1,57E+06	1,99E+06

Fuente: Autor.

Anexo VI: Flujo de caja de ingeniería detallada

Tabla 27. Flujo de caja de ingeniería de detalle.

Año		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R (Ingresos)	Costo/Periodo	0	-1,84E+06	1,56E+06	1,68E+06	1,80E+06	1,93E+06	2,06E+06	2,21E+06	2,36E+06	2,53E+06	2,70E+06
DEP (Gastos de Depreciación)	Costo/Periodo	0	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080	101080
E (Ganancias antes de impuestos)	Costo/Periodo	0	-1,94E+06	1,46E+06	1,58E+06	1,70E+06	1,83E+06	1,96E+06	2,11E+06	2,26E+06	2,42E+06	2,60E+06
IMPUESTO (Impuestos)	Costo/Periodo	0	0	365103	393757	424160	456411	490615	526880	565322	606062	649228
NE (Ganancias Netas)	Costo/Periodo	0	-1,94E+06	1,10E+06	1,18E+06	1,27E+06	1,37E+06	1,47E+06	1,58E+06	1,70E+06	1,82E+06	1,95E+06
TED (Ganancias Totales)	Costo/Periodo	0	-1,84E+06	1,20E+06	1,28E+06	1,37E+06	1,47E+06	1,57E+06	1,68E+06	1,80E+06	1,92E+06	2,05E+06
TEX (Gastos Totales (Excluye Impuestos y Depreciación))	Costo/Periodo	0	3,00E+06	2,40E+06	2,48E+06	2,57E+06	2,66E+06	2,75E+06	2,85E+06	2,95E+06	3,05E+06	3,16E+06
CF (Flujo de caja para el Proyecto)	Costo/Periodo	0	-1,84E+06	1,20E+06	1,28E+06	1,37E+06	1,47E+06	1,57E+06	1,68E+06	1,80E+06	1,92E+06	2,36E+06

Fuente: Autor.

Anexo VII: Matriz decisional método ELECTRE

Inicialmente se realizó una tabla (28) con los criterios seleccionados para la evaluación, posterior a esto se evaluaron dichos criterios en la tabla 29. Cada uno de los criterios son descritos en la sección de micro localización.

Tabla 28. Criterios para el análisis ELECTRE

Criterio 1	Facilidades de transporte
Criterio 2	Cercanía al mercado
Criterio 3	Disponibilidad de agua
Criterio 4	Eliminación de desechos

Fuente: Autor.

Tabla 29. Alternativas y criterios de selección.

Alternativas	Criterios			
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Aguachica	5	4	2	5
Gamarra	4	4	5	4
La Gloria	3	5	4	2
Pesos	0,3	0,2	0,4	0,1
Delta	2	1	3	3

Fuente: Autor.

Con la construcción de la tabla se asigna a cada criterio un valor de peso, donde estos pesos son crecientes en relación con la importancia del criterio, es decir, el criterio más importante tiene el peso más alto en la tabla y la suma de estos pesos completan un 100% o como se muestra en la tabla 29 un 1.

Continuo a esto se valoró cada criterio siendo 1 la más baja calificación y 5 la más alta, con estos datos se realiza la fila delta, la cual consiste en la resta de la calificación más alta con la más baja.

Para construir la relación de superación en primer lugar habrá que calcular los índices de concordancia. Cada criterio tiene asignado un peso que será mayor cuanto mayor sea la importancia del criterio [67].

El índice de concordancia de cada par ordenado (P_i, P_j) se define como:

$$C(P_i, P_j) = \frac{1}{W} \sum_{k / C_k(P_i) \geq C_k(P_j)} w_k$$

Donde $W = \sum_{k=1}^5 w_k$, siendo $C_k(P_i)$ la evaluación del proyecto P_i bajo el criterio C_k

El índice de discordancia se define de la manera siguiente:

$$D(P_i, P_j) = 0 \quad \text{si} \quad C_k(P_i) \geq C_k(P_j), \text{ para todo } k = 0, 1, 2, \dots, 6$$

$$D(P_i, P_j) = \frac{1}{d} \left\{ \max_{(P_i, P_j) / C_k(P_j) - C_k(P_i)} (C_k(P_j) - C_k(P_i)) \right\} \quad \text{si } C_k(P_i) < C_k(P_j), \text{ para}$$

algún para algún par ordenado de proyectos (P_i, P_j)

Siendo d la máxima diferencia para cualquier criterio y cualquier par de proyectos.

Así para calcular dichos índices, introducimos los valores de las tablas anteriores en la definición, y obtenemos las matrices de concordancia y discordancia [67].

Tabla 30. Índice de concordancias.

Concordancia	Aguachica	Gamarra	La Gloria	Dominancia filas
Aguachica	-	0,6	0,4	Gamarra
Gamarra	0,6	-	0,8	Aguachica-La gloria
La Gloria	0,6	0,2	-	Aguachica
Umbral	0,5333333333			

Fuente: Autor.

Tabla 31. Índice de discordancia.

Discordancia	Aguachica	Gamarra	La Gloria	Dominancia columnas
Aguachica	-	1	1	Gamarra
Gamarra	0,5	-	1	0
La Gloria	1	0,666666667	-	0
Umbral	0,6			

Fuente: Autor.

Y por último se construye la matriz de dominancia agregada (conc-disc) [67], en donde se obtienen una jerarquía de las opciones, siendo la numero 1 mejor selección.

Tabla 32. Dominancia agregada.

	Dominancia filas	Dominancia columnas	diferencia (F-C)	Jerarquía
Aguachica	1	1	0	3ro
Gamarra	2	0	2	1ro
La Gloria	1	0	1	2do

Fuente: Autor.

Anexo VIII: Imágenes de los cultivos seleccionados para la disposición de la materia prima.



Figura 14. Cultivo ubicado en Morales, Bolívar.



Figura 15. Cultivo ubicado en La Gloria, Cesar.



Figura 16. Cultivo ubicado en Aguachica, Cesar.



Figura 17. Fruto de palma aceitera.

Anexo IX: Imágenes del terreno seleccionado para la construcción de la planta.



Figura 18. Vista lateral del terreno seleccionado.



Figura 19. Vista lateral del terreno seleccionado.