

**DESARROLLO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A CONDICIONES SÚPER CRÍTICAS PARA LA
EMPRESA PROTELMA**

FELIPE EDUARDO VARGAS LONDOÑO

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018**

**DESARROLLO DE LA INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A CONDICIONES SÚPER CRÍTICAS PARA LA
EMPRESA PROPTELMA**

FELIPE EDUARDO VARGAS LONDOÑO

**Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
LUIS EDUARDO VARGAS GARCÍA
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018**

Nota de aceptación

Edgar Fernando Moreno

Edubiel Salcedo

Oscar Lombana

Bogotá, D.C. febrero de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente d la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Diaz

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Secretario General

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

Principalmente a DIOS que es mi fortaleza y mi guía en todas las decisiones en mi vida, por ayudarme a salir adelante y permitir culminar esta tan importante de mi vida.

Quiero agradecer a mis padres Luis Eduardo Vargas García y Aide Londoño Dussan, que me dieron la vida y son quienes estuvieron siempre ahí brindándome su amor y apoyo incondicional en el desarrollo de mi carrera profesional, que se esforzaron con esmero y dedicación cada día para poder cumplir mi sueño de ser ingeniero, son mi ejemplo a seguir, los AMO.

Agradecer a mi hermano Gustavo Morales y a su esposa Paola Jiménez, a mis sobrinos tavito y majito, que de una u otra manera me acompañaron en este arduo camino, ayudándome a terminar esta etapa de mi vida.

A Jaime reyes por darme la oportunidad de poderlo acompañar en este proyecto tan importante en su compañía, gracias a usted tuve la primera experiencia como ingeniero químico, y esas cosas no se agradecen con solo palabras, Gracias.

Por último y no menos importante a Mónica Gaitán Téllez por su amor y compañía en esta etapa tan crucial de mi VIDA, por ser ese apoyo incondicional en las todas decisiones de mi vida, por ser esa mujer que sabe manejar todas las situaciones que se le enfrentan de la mejor manera y por ser esa compañera de vida que siempre deseé TENER.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	18
OBJETIVOS	19
1 MARCO TEORICO	20
1.1 GENERALIDADES DEL BIODIESEL	21
1.1.1 Combustibles fósiles	22
1.1.2 Biocombustibles	22
1.1.3 Biodiesel	22
1.1.4 Ventajas y Desventajas del biodiesel	25
1.1.3.2 Desventajas del biodiesel	25
1.1.4 Reacciones químicas en la producción de biodiesel	26
1.1.4.1 Transesterificación	26
1.1.4.2 Esterificación	27
1.1.5 Fluidos súper-críticos	28
1.1.6 Aceite de palma	29
1.2 MATERIAS PRIMAS	29
1.2.1 Ácido graso	29
1.2.2 Metanol	30
1.3 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA PRODUCCION DE BIODIESEL A	
CONDICIONES SUPER-CRITICAS	30
1.3.1 Efecto de la relación molar ácido graso-alcohol	30
1.3.2 Comportamiento de la temperatura y presión	31
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA REACCION A CONDICIONES	
SUPER CRÍTICAS	32
2.1 VARIABLES DE PROCESO	32
2.2 DISEÑO PRE-EXPERIMENTAL	33
2.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	35
2.4 MATERIALES Y REACTIVOS	37
2.4.1 Materiales	38
2.4.2 Cantidad de reactivos para el diseño de experimentos	38
2.5 EQUIPOS	38
2.5.1 Definición y especificación de equipos	38
2.6 METODOLOGIA	42
2.6.1 Preparación metanol/Ácido graso	42
2.6.2 Condiciones de operación	43
2.6.3 Separación de biodiesel con el exceso de metanol	44
2.7 CARACTERIZACIÓN DEL ÁCIDO GRASO	44

2.7.1	Determinación de la densidad	44
2.7.2	Índice de acidez	44
2.8	CARACTERIZACIÓN DEL METANOL	46
2.8.1	Determinación de la Pureza	46
2.8.2	CARACTERÍSTICAS DE LA ESTERIFICACIÓN SUPER CRÍTICA	47
2.9	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL	47
2.9.1	Determinación de ACIDEZ	49
2.9.2	Determinación grados API	49
2.9.3	CARACTERIZACIÓN POR PARTE DE TERCEROS	49
3	INGENIERIA CONCEPTUAL	51
3.1	BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO	51
3.3	MATERIAS PRIMAS Y DE PRODUCTOS	51
3.4	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	51
3.5	NORMATIVA Y REGULACIÓN	52
3.6	DIAGRAMAS DEL PROCESO	53
3.6.1	Diagrama de la reacción del proceso	53
3.6.2	Diagrama genérico de Bloques	53
3.6.3	Diagrama de flujo de proceso	54
3.7	BALANCES DE MATERIA	54
3.7.1	Balance de masa	55
3.7.1.1	Balance mezclador	56
3.7.1.2	Balance en el reactor	57
3.7.1.3	Balance evaporador de capa fina	59
3.7.2	Balance de energía	60
3.7.2.1	Balance reactor	60
3.7.2.2	Balance Evaporador de capa fina	61
4	COSTOS	62
4.1	Estimación económica de la inversión	62
4.1.1	Capex	62
4.2	Estimación costos de operación	63
4.2.1	Opex	63
4.2.2	Vpn	64
4.3	TIR	66
4.4	PR	66
5	CONCLUSIONES	68
6	RECOMENDACIONES	69

BIBLIOGRAFÍA

70

ANEXOS

72

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Biodiesel de palma de aceite	23
Tabla 2. Plantas de producción de Biodiesel	24
Tabla 3. Características físico químicas del aceite de palma	25
Tabla 4. Diseño Pre-experimental	34
Tabla 5. Diseño Pre- experimental (Repetición)	34
Tabla 6. Resultados de la primera pre-experimentación	35
Tabla 7. Variables independientes	35
Tabla 8. Diseño experimental	36
Tabla 9. Diseño experimental (Repetición)	36
Tabla 10. Resultados de la experimentación	37
Tabla 11. Parametros de calidad del biodiesel	48
Tabla 12. Reacciones que ocurren en el Reactor	55
Tabla 13. Condiciones de operación en el mezclador	56
Tabla 14. Compuestos de la corriente 1, 2, 3	56
Tabla 15. Resumen de propiedades en el mezclador	57
Tabla 16. Condiciones de operación en el reactor	58
Tabla 17. Propiedades de las corrientes involucradas en el reactor	58
Tabla 18. Condiciones de operación en el evaporador de capa fina	59
Tabla 19. Propiedades de las corrientes involucradas en el evaporador	59
Tabla 20. Datos del reactor	61
Tabla 21. Datos del evaporador de capa fina	61
Tabla 22. Capex	62
Tabla 23. Opex	63
Tabla 24. Costos de producción	64
Tabla 25. Gastos administrativos	64
Tabla 26. Gastos de Comercialización	64
Tabla 27. Ingresos operacionales	65
Tabla 28. Tabla de amortización	65
Tabla 29. Flujo de caja	65
Tabla 30. VPN	66

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Reacciones implicadas en la Transesterificación	7
Ilustración 2. Esterificación de ácidos grasos libres	27
Ilustración 3. Diagrama del proceso general	34
Ilustración 4. Reactor experimental	39
Ilustración 5. Evaporador de capa fina	40
Ilustración 6. Manómetro de Presión	40
Ilustración 7. Termostato	41
Ilustración 8. Alcoholímetro	42
Ilustración 9. Montaje de titulación	46
Ilustración 10. Densímetro	49
Ilustración 11. Muestra de Biodiesel	50
Ilustración 12. Diagrama de la reacción del proceso	53
Ilustración 13. Diagrama genérico de Bloques	54
Ilustración 14. Corrientes en el reactor	58
Ilustración 15. Corriente en el evaporador de capa fina	60

LISTA DE GRAFICAS

pág.

Gráfica 1. Producción y venta de Biodiesel.

21

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Factor para neutralizar el Biodiesel.	45
Ecuación 2. Porcentaje de acidez.	45
Ecuación 3. Balance de calor.	60
Ecuación 4. VPN (Valor Presente Neto)	65
Ecuación 5. TIR	66
Ecuación 6. PR Periodo de recuperación.	67

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Tecnologías para la producción de biodiesel	20
Cuadro 2. Aplicaciones de los fluidos supercríticos	28
Cuadro 3. Variables de proceso	32
Cuadro 4. Variables dependientes	36

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Pre experimentación y experimentación.	72
Anexo B. Fichas de seguridad.	92
Anexo C. Caracterización del Biodiesel.	104
Anexo D. Balance de masa y energía.	105
Anexo E. Diagrama PFD.	125

GLOSARIO

ACEITE DE PALMA: es una grasa líquida semisólida, extraída del mesocarpio del fruto de la palma de aceite, contiene aproximadamente 50% de ácidos grasos y 40% de ácidos mono insaturados, y 10% de ácidos grasos- poli-insaturados.

ÁCIDOS GRASOS: son ácidos orgánicos, generalmente de cadena lineal, teniendo en ellas una cantidad par de átomos, estas se sintetizan mediante la adición de unidades de acetato.

BIOCOMBUSTIBLES: es una mezcla de sustancias orgánicas, las cuales han sido usadas como alternativa ecológica ya que estos reducen considerablemente la emisión de CO₂, en comparación con los combustibles convencionales.

BIODIESEL: es considerado un biocombustible, el cual es obtenido de diferentes fuentes de aceites vegetales como lo son el aceite de palma, el aceite de girasol, de soja, de ricino, de colza, también se obtiene de grasas animales. El biodiesel más conocido como un biocombustible líquido el cual se mezcla con gas oleo para posteriormente ser utilizado en los motores.

CAPEX: el **Capex** que se traduce como Capital Expenditure, es el gasto que una empresa realiza en viene de equipo y que genera beneficios para una compañía, bien sea a través de la adquisición de nuevos activos fijos, o bien a través de un **aumento en el valor a los activos fijos ya existentes.**¹

CONDICIONES SÚPER- CRÍTICAS: corresponden a la presión y la temperatura máxima a la cual un fluido se puede someter, coexistiendo un equilibrio líquido-gas. Estas condiciones súper- críticas, son diferentes para cada sustancia.

ESTERIFICACIÓN: es un proceso mediante el cual podemos sintetizar un éster, partiendo de la reacción entre un ácido carboxílico y un alcohol.

EVAPORADOR DE CAPA FINA: conformado por una serie de conos de evaporación giratorios, el cual es apropiado para procesos en donde se desee mejorar la calidad del producto. Altamente funcionales para el procesamiento de líquidos viscosos.

FLUIDOS SÚPER-CRÍTICOS: los fluidos supercríticos se forman cuando una sustancia se encuentra en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico, los fluidos supercríticos presentan propiedades intermedias entre un

¹ LORENZANA, Diego "PYMES Y AUTONOMOS". {En línea}. {20 marzo de 2017} disponible en: <https://www.pymesyautonomos.com/fiscalidad-y-contabilidad/en-que-consiste-el-capex-y-por-que-es-una-magnitud-tan-importante-para-la-pyme>

gas y un líquido, densidad elevada(próxima a la del líquido), baja viscosidad,(cercana a la del gas) y un coeficiente de difusión superior a la del líquido.²

METANOL: también conocido con el nombre de alcohol metílico, a temperatura ambiente este se encuentra en estado líquido e incoloro. Su temperatura crítica de operación se encuentra alrededor de los 240 °C.

OPEX: supone al contrario que pagamos una cuota mensual por el bien que adquirimos. Esa cuota se puede dividir en una cuota mensual que pagamos al proveedor del bien y en otra que pagamos a una entidad financiera que nos financian la compra.³

TRANSESTERIFICACIÓN: es el proceso mediante el cual se obtiene biodiesel a partir de la reacción entre un ácido graso (animal o vegetal), con un alcohol ligero, dejando como un subproducto la glicerina.

² CASTAÑOS, Enrique. "Extracción con fluidos supercriticos". {En línea}. {20 marzo de 2017} disponible en: (<https://lidiaconlaquimica.wordpress.com/tag/fluidos-supercriticos/>)

³ LA TECNOLOGIA ME GUSTA. "Diferencia entre capex y opex". {En línea}. {20 marzo de 2017} disponible en: <http://director-it.com/index.php/es/el-dinero/195-%C2%BFcu%C3%A1l-es-la-diferencia-entre-capex-y-opex.html>

INTRODUCCIÓN

En el siguiente documento se presentan los métodos y procedimientos realizados para el desarrollo del proyecto de grado, en el cual se pretende hacer un diseño conceptual de la producción de biodiesel a condiciones súper-críticas a nivel laboratorio en la empresa Proptelma la cual se encuentra ubicada en el municipio de Tocancipa Cundinamarca.

El estudio se realizó con el fin de aprovechar el mercado de hidrocarburos que hay en Colombia ya que el país no tiene la capacidad de fijar precios por lo que la participación mundial es baja. La demanda de biodiesel en Colombia es alta por lo que la producción no alcanza a rebasar las ventas, adicional a eso el estudio se realiza para desarrollar una nueva metodología a nivel industrial de obtención del biodiesel a condiciones súper críticas en Colombia siendo pioneros la empresa Proptelma en la implementación de dicho proceso.

Se generará en el estudio un primer diagnóstico del proceso con una serie de pre-experimentaciones, el cual enfocará el estudio y la materialización de los experimentos a seguir, esto servirá para dar conclusión al proceso ya que se toman una serie de hipótesis con respecto a los antecedentes, al llevar a cabo el estudio se debe observar los distintos factores que son determinantes en la producción del biodiesel como la temperatura, presión y el tiempo de residencia, adicional a ello se le hará una serie de pasos al biodiesel como filtraciones y reacciones que permitan neutralizarlo de manera que estará en las condiciones óptimas para ser comercializado.

Palabras claves: Biodiesel, Transesterificación, condiciones súper- críticas, metanol, Ácido graso, Fluidos súper-críticos, ingeniería conceptual.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar la ingeniería conceptual de una planta de producción de biodiesel a condiciones súper-críticas para la empresa Proptelma.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las condiciones que inciden en el proceso de obtención de biodiesel a partir del ácido graso del crudo de palma a nivel laboratorio.
- Determinar las condiciones de operación supercríticas de un reactor para la producción de biodiesel a nivel laboratorio.
- Realizar el análisis de costos del proceso de producción de biodiesel para la empresa Proptelma.

1. MARCO TEÓRICO

El mercado de los combustibles fósiles se entiende que se agota por la escasez del petróleo, por lo que se acaban los hallazgos y cada día es más difícil extraer los diferentes productos de valor de él, en un mundo donde una gran cantidad de productos del mercado son hechos a partir del petróleo y la demanda exige cada día más, es difícil pensar que se pueda agotar, el primer uso del petróleo es la generación de energía, que proviene de la destilación del petróleo y dependiendo de la cantidad de carbonos que este contenga se destina su respectivo uso. La principal preocupación que existe en este momento es dar solución a la escasez del petróleo, como se sabe que es una materia que no es renovable y para ello existen grupos de investigación que se encargan de dar posibles soluciones a esto.

Una solución viable, es la generación de biodiesel el cual en Colombia es una tecnología que ha tenido una gran acogida por las ventajas que él tiene con el medio ambiente y con su producción.

El biodiesel se obtiene de diversas materias primas oleaginosas, principalmente de aceites de origen vegetal como de palma, soya, higuera, jatropha y moringa. También es posible obtenerlo de las grasas de origen animal y aceite usado de cocina, toda fuente de triglicéridos es materia prima para obtención del biodiesel. Las tecnologías para la producción de biodiesel dependen de factores como calidad de materias primas y capacidades de producción. El cuadro 1 muestra las diferentes tecnologías comerciales para la producción de biodiesel.

Cuadro 1. *Tecnologías para la producción de Biodiesel.*

Nombre de Compañía	País
HENKEL	Alemania
ESTERFIP	Instituto francés del petróleo
ESTERECO	Italia
BALLESTRA	Italia
OCENA AIR ENVIRONMENTAL	Estados Unidos
PACIFIC BIODIESEL	Estados Unidos

Fuente: CARDONA ALZATE. Carlos. Biodiesel. Manizales: Tizan,2009. 248 p.

Existen muchas maneras de hacer biodiesel, como las reacciones que utilizan catálisis básica, reacciones utilizando catálisis ácida, reacciones utilizando catálisis heterogénea, reacciones utilizando catálisis enzimática, todas estas maneras son las empleadas en el mundo para la producción de biodiesel, la cual se mezcla con el diésel convencional para la venta y su distribución.

Otra forma de hacer biodiesel es de una manera no convencional, es decir condiciones súper críticas, en Colombia y en el mundo no se reportan empresas

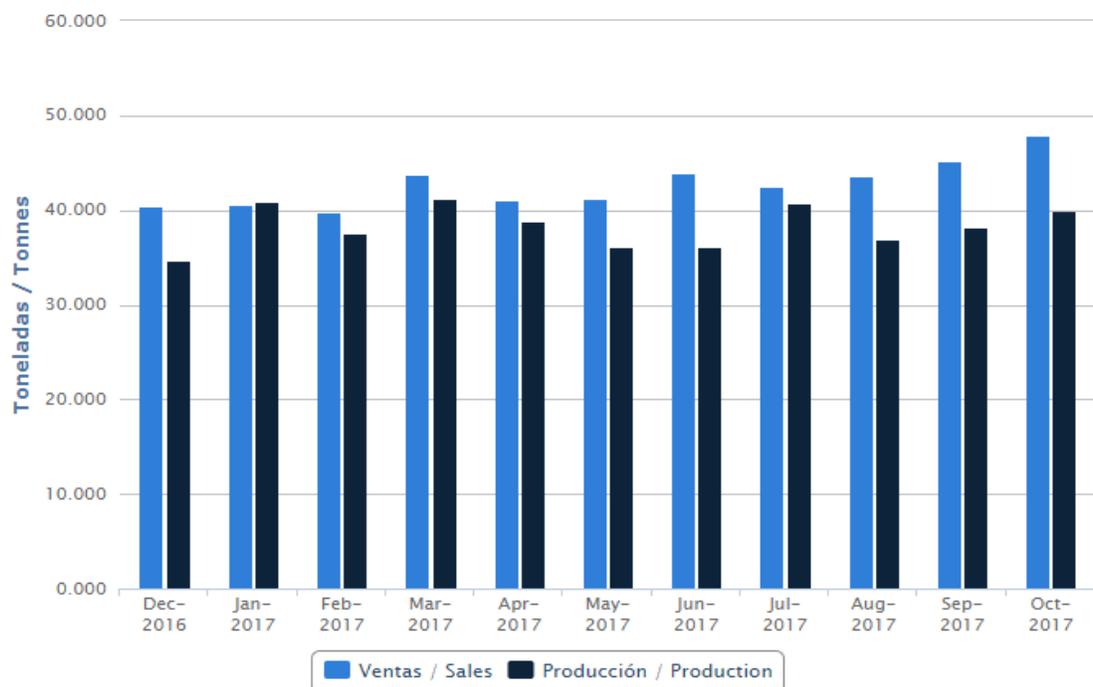
que utilicen métodos de producción a condiciones súper-críticas, existen casos de estudio, investigaciones y artículos donde exponen las mejores condiciones de estas la cual se basan en estudios ya realizados por otras personas o simplemente estudios en reactores pequeños de laboratorio.

1.1 GENERALIDADES DEL BIODIESEL

La demanda de energía renovable cada día va en aumento y exigiendo cada día más acerca de los biocombustibles, el biodiesel es el preferido con el alcohol carburante en Colombia, estimando datos en que las ventas son mayores a la de producción, dejando un mercado completamente abierto a la producción de biodiesel hoy en día.

En la Gráfica 1 se muestra la recopilación de los datos obtenidos en la producción y venta de biodiesel desde enero del 2016 hasta agosto del 2017, datos actualizados con fines de demostrar el mercado que se encuentra para él, como se puede observar en la ilustración al pasar del tiempo se encuentra una descompensación entre las ventas que el biodiesel genera y la producción ya puede ser bien por la regulación que hay en Colombia o el cambio hacia la inclinación de uso de maquinaria o vehículos con alimentación diésel.

Gráfica 1. Producción y venta de Biodiesel.



Fuente: Federación nacional de biocombustibles. “Produccion y ventas de biodiesel”. {En línea}. {18 marzo de 2017} disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Biodiesel.htm>

1.1.1 Combustibles fósiles. Hasta ahora, la producción de biodiesel en Colombia es una alternativa clave para el desarrollo y sostenimiento del país puesto que la demanda que existe no alcanza a cubrirse, adicional a esto, está en proceso normativas en la cual se genera más participación del biodiesel en mezclas diésel, de esa manera se caracterizará el diésel b10, b20 dependiendo de la participación del biodiesel para el 2020.

Los combustibles fósiles han sido una fuente alternativa para la producción de energía, siendo así los hidrocarburos el principal recurso natural el cual genera un alto beneficio económico. Siendo este un recurso no renovable se han generado diferentes situaciones controversiales a nivel mundial por su agotamiento aumentando así su precio.

El consecutivo uso de los combustibles fósiles ha generado un desequilibrio ambiental el cual se desemboca en diferentes problemas climáticos los cuales se tiene que afrontar entre distintos factores climáticos, la contaminación tanto del aire como del agua, la producción de lluvias acidas, la reducción del volumen de los polos, diversas enfermedades entre otros. Adicional a ello se debe mencionar que cada país rige ciertas normas para poder controlar las emisiones que se producen a nivel industrial, y aun así se deberían implantar otras alternativas que reduzcan el impacto ambiental generado por la transformación de los combustibles fósiles.

1.1.2 Biocombustibles. Los biocombustibles son producidos a partir de diferentes materias primas como lo es la caña de azúcar, la remolacha, el maíz, celulosa entre otros, entre los aceites vegetales se encuentra el aceite de palma, girasol, soya, también se pueden producir a partir de grasas y cebo animal. Los biocombustibles se prefieren ya que son biodegradables y esto con lleva a la preservación del medio ambiente lo que lo hace una buena alternativa para sustituir los combustibles contaminantes, al no contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero en la atmosfera.

1.1.3 Biodiesel. El biodiesel surge como un combustible alternativo para reemplazar a los combustibles fósiles, ya que como se ha mencionado antes los combustibles fósiles son una fuente altamente contaminante, el biodiesel se obtiene de fuentes vegetales y animales o aceite usado de cocina, Europa y Estados-Unidos fueron los pioneros en la fabricación de biodiesel, siendo hoy los principales productores de este combustible⁴. El Biodiesel se compone principalmente de una cadena larga de esteres mono- alquílicos de ácidos grasos.

En Colombia la producción de biodiesel comenzó en enero del 2008 y se optó por la utilización de aceite de palma como materia prima. Colombia se encuentra como

⁴ LAMOUREUX, JEROME HERVE "DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE BIODIESEL". {En línea}. {21 marzo de 2017} disponible en: ([Http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3&isAllowed=y))

un alto productor de aceite de palma a nivel de Latinoamérica y el quinto en el mundo. Actualmente Colombia cuenta con dos plantas de producción de aceite de palma, el cual produce aproximadamente 1'800.000 Litros al día. (Mejía, 2009)
 La Tabla 1 muestra la producción de biodiesel a partir del aceite de palma desde el 2008 al 2016 observado un aumento significativo de la producción de este recurso, produciendo así 447.768 toneladas de biodiesel en el 2016.

Tabla 1. Biodiesel de palma de aceite

Indicador	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Producción Biodiésel (Toneladas)	22.730	163.077	337.713	443.037	489.990	503.337	518.093	513.354	447.768
Ventas Biodiésel (Toneladas)	-	169.065	337.718	273.170	488.187	505.709	518.745	523.403	506.990
Producción Aceite crudo de Palma (Toneladas)	777.509	804.838	753.039	945.030	973.703	1.040.835	1.109.707	1.272.523	1.143.446
Ventas Aceite de Palma para Biodiésel	40.700	107.024	298.221	385.100	445.476	458.772	470.934	488.627	458.800
Hectáreas sembradas de Palma *	337.038	360.620	404.104	427.368	452.435	446.376	450.131	466.185	512.076
Hectáreas sembradas de Palma en Desarrollo	115.772	124.705	153.441	160.446	152.482	107.682	96.565	88.523	113.029
Hectáreas sembradas de Palma en Producción	221.266	235.914	250.663	266.922	299.953	338.693	353.566	377.662	399.048
Rendimiento promedio por hectáreas (Toneladas de aceite de Palma)	3,51	3,41	3,00	3,54	3,25	3,07	3,14	3,37	2,87
Rendimiento medio en campo por hectáreas (Toneladas de fruto de Palma)	17,18	16,37	15,07	17,18	15,52	14,92	15,43	16,56	14,60

Fuente: Ministerio de minas y energías. “Plantas de producción de aceite de palma”. {En línea}. {18 abril de 2017} disponible en: http://www.upme.gov.co/docs/biocombustibles_colombia.pdf

La Tabla 2 muestra las empresas que actualmente producen biodiesel a partir de aceite de palma siendo la de mayor capacidad Biocombustibles Sostenibles del Caribe con una capacidad de 170.000 toneladas al año.

Tabla 2. Plantas de producción de Biodiesel.

Región	Empresa	Capacidad (T/año)	Área Sembrada (Ha)	Empleos Directos	Empleos Indirectos	Fecha entrada en Operación
Norte, Santa Marta	Biocombustibles Sostenibles del Caribe	170.000	29.240	4.177	8.354	2009/03/01
Norte, Codazzi	Oleoflores	60.000	17.544	2.506	5.013	2008/01/01
Norte, Barranquilla	Romil de la Costa	10.000	2.924	418	835	
Norte, Gálapa	Biodiésel de la Costa	10.000	2.924	418	835	
Norte, Santa Marta	Odin Energy	36.000	10.526	1.504	3.008	
Oriental, Facatativá	BioD	200.000	36.810	5.259	10.517	2009/02/01
Central, Barrancabermeja	Ecodiesel de Colombia	120.000	38.585	5.512	11.024	2008/06/01
Oriental, San Carlos de Guaroa	Aceites Manuelita	120.000	38.585	5.512	11.024	2009/07/01
Oriental, Castilla la Grande	Biocastilla	15.000	4.823	689	1.378	
Oriental, San Carlos de Guaroa	La Paz	70.000	21.472	3.067	6.135	
Central, Barrancabermeja	ALPO	40.000	0	0	0	
Norte, Santa Marta	BioCosta	70.000	0	0	0	
Total		921.000	203.433	29.062	58.123	

Fuente: Ministerio de minas y energías. “Plantas de producción de aceite de palma”. {En línea}. {5 abril de 2017} disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-271.htm>

Adicional a estos datos en la Tabla 3 se muestran las características fisicoquímicas del aceite de palma como lo es su punto de fusión, densidad, viscosidad, índice de cetano, entre otros. Tener la caracterización de la muestra prima es importante ya que a partir de ella dependerá la calidad del biodiesel obtenido.

Tabla 3. Características fisicoquímicas del aceite de palma.

CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS	MIN	MAX
Punto de fusión °C	0,868	40
Densidad a 40/25 °C	0,868	0,879
Índice de Yodo	50	58
Materia Insaponificable %	---	1,5
Índice de Refracción a 40 °C	1,449	1,455
Índice de Saponificación	195	205
Poder Calorífico		88225
Punto de chispa		280
Viscosidad absoluta a 40C (cp)		37,8
Viscosidad absoluta a 70C (cp)		13,6
Índice de Cetano		35

Fuente: Idupalma. “Características fisicoquímicas del aceite de palma”. {En línea}. {10 abril de 2017} disponible en: <http://www.indupalma.com/aceite-de-palma>

1.1.3 Ventajas y Desventajas del biodiesel. El biodiesel además de ser fuente de energía renovable contiene diferencias significativas que otras fuentes de energía no tiene, de allí aquellas ventajas y virtudes que vale el futuro de la industria.

1.1.3.1 Ventajas del biodiesel.

- Se puede fabricar a partir de residuos orgánicos como el aceite usado de cocina.
- Al ser añadido a la gasolina este aumenta el número de cetanos, mejorando así la combustión dentro del motor.
- Al ser un combustible biodegradable no genera un impacto ambiental muy fuerte.
- Su contenido de azufre es inferior a comparación de la gasolina.
- (-99 %) de óxido de azufre (SO_2)
- (-63 %) de hidrocarburos inquemados (HC)
- (-22 %) en monóxido de carbono (CO), causante de la contaminación urbana y origen de enfermedades respiratorias.
- (-52 %) de partículas en suspensión.

1.1.3.2 Desventajas del biodiesel.

- Presenta problemas de fluidez a bajas temperaturas.
- Tiene una vida útil inferior a 6 meses, por su escasa estabilidad oxidativa.

- La glicerina presente como subproducto en la producción de biodiesel, se deber purificar por lo que esto genera un costo adicional.

1.1.4 Reacciones químicas en la producción de biodiesel. Las reacciones químicas que involucra la producción de metil esteres o bien llamado biodiesel, provienen de aquellos compuestos que en su estructura contiene esteres como los ácidos grasos ya que son cadenas lipídicas hidrocarbonadas de alto peso molecular. A continuación, se mostrará los dos tipos de reacciones principales para llevar acabo la producción de biodiesel tomando materias primas diferentes.

1.1.4.1 Transesterificación. La transesterificación es el proceso mediante el cual se hace reaccionar una cadena de triglicéridos con una molécula de alcohol, la ilustracion 1 muestra las reacciones que se ven involucradas en este proceso. Cuando se contemplan condiciones súper- críticas en la mezcla alcohol y el triglicérido, el alcohol disminuye sus propiedades dieléctricas, provocando un aumento en la velocidad de reacción, inicialmente la mezcla entre los triglicéridos y el metanol es una reacción heterogénea ya que los triglicéridos son moléculas no polares, mientras que el alcohol es una molécula polar, aumentando las condiciones de temperatura y presión vuelven la reacción homogénea.

En la ilustración 1 se puede observar que es necesario 3 moléculas de metanol por cada triglicérido que reacciona dando como resultado tres moléculas del Ester metílico y una de glicerina.

Ilustración 1. Reacciones implicadas en la Transesterificación.



Fuente: Sergio. "Triglicéridos en el biodiesel". {En línea}. {10 abril de 2017} disponible en: <http://sibiodiesel.blogspot.com.co/>

1.1.4.2 Esterificación. La esterificación es el proceso mediante el cual se puede llegar a sintetizar un éster, en la ilustración 2 se muestra la reacción de esterificación, en la cual se elimina o libera una molécula de agua para formar un éster, este se forma por la reacción entre un ácido y un alcohol, en el proceso de producción de biodiesel principalmente depende de la materia prima si se realiza una transesterificación o una esterificación, si es un ácido graso como lo es en este caso la reacción es de esterificación, y si se utilizan aceites ya sean de origen vegetal o usados en la industria, son reacciones de transesterificación, sin embargo la esterificación se ha venido aplicando en combinación con esta en todo el proceso global de producción de biodiesel.

En la ilustración 2 se muestra que para hacer el proceso de esterificación es necesario el uso de un catalizador, gasto que toca hacer para poder producir el biodiesel y gasto adicional para poder separarlo de la mezcla.

Ilustración 2. Esterificación de ácidos grasos libres.



Fuente: Sergio. "Saponificación del biodiesel". {En línea}. {10 abril de 2017} disponible en: <http://sibiodiesel.blogspot.com.co/>

1.1.5 Fluidos súper-críticos. Se describe como un fluido súper- crítico a aquella sustancia que se encuentra a una temperatura y presión superior a las de su punto crítico, en el punto crítico las propiedades tanto líquidas como gaseosas se vuelven muy similares, provocando el aumento de la densidad causado por pequeños cambios de presión y aumento en la difusividad (gases). Mediante un diagrama de fases se puede observar el comportamiento para diferentes sustancias en la región supercrítica

Los fluidos supercríticos son sustancias comprensibles que con cambios pequeños de presión originan cambios en la densidad, propiedades físicas y de transporte. En la tabla se muestra algunas aplicaciones que involucran fluidos súper críticos.

Cuadro 2. Aplicaciones de los fluidos supercríticos.

	Procesos	Ventajas
Extracción	Primer uso comercial. Lúpulos y cafeína del café, remoción de nicotina de tabaco, desasfaltado de petróleo, extracción de aceites de semillas oleaginosas y extracción de aceites esenciales para saborizantes o perfumes	Velocidad debida a la alta difusión, reduce el tiempo de preparación de muestras, recuperación de analitos de muestras sólidas y semisólidas, limpia para el medioambiente, no deja residuos, se obtienen extractos de alta pureza y no requiere altas temperaturas.
Fraccionamiento de mezclas líquidas	Productos naturales como aceites esenciales y lípidos. Para concentrar sustancias antes de cromatografía. Extracción en contracorriente y con reflujo	Única unidad, limpia para el medio ambiente, ausencia de solvente residual en el producto final
Cromatografía	Quirales	Mayor eficiencia en la separación, limpia para el medio ambiente, ausencia de solvente residual en el producto final
Reacciones Químicas	A escala de laboratorio e industrial. La existencia de una sola fase permite una óptima transferencia de masa y de energía. Variación de parámetros del solvente (por dependencia de P) como la constante dieléctrica afectando la selectividad de las reacciones enzimáticas o catalíticas. Variación del potencial químico de reactivos y catalizadores sin modificar el volumen de reacción debido a la alta compresibilidad.	Aumento de la velocidad de reacción en procesos que ocurren en fase líquida (controlados por la difusión), cambios en la selectividad, control y fácil separación de los productos, menor riesgo en las condiciones de trabajo, limpia para el medio ambiente, reducción en el costo de eliminación del disolvente.
Procesado de Metales	Impregnación y teñido de polímeros y fibras sintéticas. Extracción, separación y regeneración de metales empleando agentes complejantes	Reducción de la contaminación del agua en los procesos de dyeing, limpia para el medioambiente
Formación de Partículas	Micro partículas por diferentes técnicas de precipitación y cristalización, procesamiento de materiales y productos farmacéuticos	Obtención de cristales con morfología muy uniforme, alta pureza y libres de residuos de disolvente.
Agua Supercrítica	Extracción de plantas para producir sabores, fragancias y productos de alto valor agregado	Menor polución en el trabajo y para el medio ambiente, ausencia de solvente residual en el producto final, reducción en el costo de eliminación del disolvente
	Regeneración de aguas y suelos y otros materiales por extracción y destrucción (oxidación total)	

Fuente: Universidad Nacional. "Producción de biodiesel utilizando fluidos supercríticos". {En línea}. {29 enero de 2018} disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/6854/7/9789584452610_Parte3.pdf

En el proceso de producción de biodiesel a condiciones súper- críticas, el metanol supercrítico permite una purificación más sencilla de los productos, reduciendo el tiempo de reacción, produciendo así rendimientos de conversión entre el 50 y el 95% en los primeros 10 minutos.

1.1.6 Aceite de palma. El aceite de palma se encuentra semi-sólido a temperatura ambiente, teniendo así un punto de fusión muy alto, está compuesto por ácidos grasos insaturados en su mayor parte ácido palmítico y ácido esteárico, también contiene ácido oleico y ácidos grasos Mono insaturados.

El aceite de palma proviene específicamente del fruto *ELAEIS GUINEENSIS*, esta es una planta tropical la cual crece debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar, la palma de aceite es un de las oleaginosas más comerciales debido a que se extrae entre seis y diez veces más aceite que de soya y colza girasol. Colombia se encuentra en el mercado produciendo 2.4% de la producción mundial, a pesar de ser el primer productor latinoamericano.⁵

1.2 MATERIAS PRIMAS

Las materias primas que se encuentran involucradas en el proceso de esterificación a condiciones supercríticas en la planta de Proptelma son: el ácido graso de origen vegetal y el metanol que contiene una pureza del 99%.

1.2.1 Ácido graso. Son ácidos orgánicos, se encuentran en las grasas más frecuentemente en los alimentos, están formados por una cadena larga lineal de carbonos, la mayoría de los ácidos grasos naturales posee un número par de carbonos en su cadena se encuentran en dos clases: los ácidos grasos saturados y los ácidos grasos insaturados, los saturados son aquellos que solo tienen enlaces simples, son sólidos a temperatura ambiente en este grupo se puede encontrar el butírico, palmítico, láurico, esteárico, mientras que los insaturados presentan en su cadena dobles enlaces del tipo cis siendo monosaturados o poliinsaturados, a temperatura ambiente son líquidos dentro de los ácidos grasos insaturados se puede encontrar, linolénico, oleico, palmitoleico.

En la industria colombiana para la compra del ácido graso se contempla dos escenarios, se puede comprar por medio de los palmicultores ya que ellos al refinar el crudo de palma les genera como subproducto y lo venden para la industria del jabón, en el segundo escenario se encuentran las industrias productoras de biodiesel, debido a que en su producción convencional este sale como subproducto.

⁵ CARDONA ALZATE. Carlos. Biodiesel. Manizales: Tizan, 2009. 248 p.

1.2.2 Metanol. El metanol es un alcohol de un solo carbón, tres hidrógenos y un oxígeno, el cual por su estructura puede lograr más estabilidad que otros alcoholes en procesos de esterificación y transesterificación, el alcohol metílico y etílico son los más usados, en general varios estudios concuerdan que los alcoholes de cadena más corta dan mayores velocidades de reacción.⁶

El metanol en el proceso es utilizado en exceso, con este exceso se logra el aumento en el rendimiento de la conversión entre el 50 y 95%, por ello es importante recircular este reactivo, al ser altamente volátil se puede separar del biodiesel mediante un evaporador.

Es una materia prima que es regulado por el gobierno y tiene control nacional, de esta manera se debe tener una Autorización Ordinaria que es un certificado de carencia de informes por tráfico de estupefacientes para su uso.

1.3 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA PRODUCCION DE BIODIESEL A CONDICIONES SUPER-CRITICAS

Existen diferentes factores que permiten que la producción de biodiesel a condiciones supercríticas se comporte de manera diferente, es decir, la conversión del ácido a biodiesel sea mayor a ciertas condiciones que a otras, que la presión sea alta a ciertas temperaturas y a otras no, los valores como la relación molar del ácido graso- alcohol, el comportamiento de la temperatura y presión son valores fundamentales en la producción de biodiesel a condiciones supercríticas.

1.3.1 Efecto de la relación molar ácido graso-alcohol. La relación molar entre el ácido graso y el alcohol es una de las variables que más afectan el rendimiento durante la reacción. Para este caso estudio se efectuó la reacción de esterificación con una relación molar de 3,5 y 5 molar, estas relaciones molares surgen a partir de la experimentación al querer obtener biodiesel a condiciones súper críticas a bajas relaciones, estas se encuentran en la experimentación del proyecto en el anexo A. Al incrementar la relación molar se favorece la conversión, proporcionalmente se reduce tanto el tiempo de reacción como la temperatura crítica de la mezcla. Cabe resaltar que a medida que se agrega el alcohol en exceso y entre mayor sea dicha cantidad, se obtendrá conversiones más altas, hasta llegar a un punto en el que por más metanol que se adicione no parece favorecer la velocidad de la reacción y se ve afectado el proceso en la separación de biodiesel del exceso del alcohol para su recuperación.

⁶ Universidad Nacional. "Producción de biodiesel utilizando fluidos supercríticos". {En línea}. {29 enero de 2018} disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/6854/7/9789584452610_Parte3.pdf

1.3.2 Comportamiento de la temperatura y presión. El reactor que se tiene para la reacción de esterificación a condiciones súper-críticas no posee tanque de expansión ni elementos inertes que permitan aumentar o disminuir la presión, dicho lo anterior las condiciones de presión están ligadas al aumento o disminución de la temperatura, la variación depende también de la carga que se le ha hecho al reactor, de igual manera cabe resaltar que la presión empieza a aumentar cuando la temperatura llega a condiciones en el que el metanol cambia de fase, es decir, en su punto de ebullición.

Dicho lo anterior estos factores son muy importantes, ya que al inicio del experimento al aumentar la temperatura la presión se comporta de manera lineal, pero cuando alcanza niveles supercríticos de 230 °C y 1400 psi, el fluido deja de tener tendencia lineal con la presión y existen puntos en el que se puede decir que se comporta exponencialmente, en un cambio de 10°C de temperatura provoca un aumento en la presión hasta de 1000 psi, por lo que es un proceso de alto riesgo y difícil de predecir ya que en las condiciones súper -críticas se comporta como fluido y como gas a la vez.

En este primer capítulo además de ver las generalidades del biodiesel y del proceso, se encuentra un pequeño abrebocas acerca de la producción y venta del biodiesel en Colombia en los últimos años. También las diferentes reacciones que se pueden utilizar para la producción del biodiesel. Adicional a esto se mencionó las materias que se utilizarán en el proceso de la planta Proptelma y los diferentes factores que acobijan al proceso.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA REACCION A CONDICIONES SUPER CRÍTICAS

En el capítulo 2 se llevará a cabo el desarrollo pre-experimental y experimental del proceso de producción del biodiesel a condiciones súper críticas, en este capítulo se determinarán cuáles son las variables de proceso y a partir de ello se realiza una pre- experimentación con el ánimo de saber el rango de valores en donde se encuentra un buen resultado de conversión. Posterior a eso, se realiza la experimentación para conocer de una manera precisa el comportamiento de las variables respuesta frente a las variables independientes a los cambios que se le hacen.

Para empezar el capítulo se hablará primero de las distintas variables de proceso involucradas y en qué medida puedan afectar el proceso.

2.1 VARIABLES DE PROCESO

Dentro de las variables más relevantes que influyen en la reacción de esterificación para la producción de biodiesel a condiciones súper críticas se encuentra: la temperatura, presión, relación molar entre ácido graso/metanol y el tiempo de residencia, las cuales se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Variables de Proceso.

Variable	Tipo
Temperatura	Variable independiente
Presión	Variable dependiente
Relación Molar (Ácido graso/Metanol)	Variable independiente
Tiempo de residencia	Variable independiente

En ciertos casos la presión tendería a ser una variable que se puede controlar y no depende de ninguna otra variable⁷, pero para este caso conciso, al tener un reactor batch donde es completamente cerrado y no se agregan inertes a la reacción o se cuenta con tanques de expansión para controlar la presión, se infiere, que la presión es una variable que depende de la cantidad de metanol que se agregue a la reacción, a la temperatura que se eleva y al volumen que tiene el metanol para interactuar entre sus fases líquidas y gaseosas, es decir, el volumen total del reactor menos la carga suministrada a él.

⁷ CARDONA ALZATE. Carlos. Biodiesel. Manizales: Tizan,2009. 248 p.

Otro factor es el tiempo de residencia que también es un variable independiente, pero para efectos prácticos de tener la oportunidad de instalar un tomador de muestras en el reactor, el tiempo de residencia estará establecido hasta que el porcentaje de acidez sea menor al 3% y no tenga cambio con el tiempo, es decir, se tomará muestras cada 15 minutos para establecer la acidez del biodiesel y se dejará de tomar dichas muestras cuando la acidez se mantenga en un rango del 1 al 3 % y en ese momento se dará por terminado el experimento.

Dicho lo anterior, las variables de resultado que se obtienen en el experimento son la presión, el tiempo de residencia, la conversión del ácido graso y la carga suministrada al reactor.

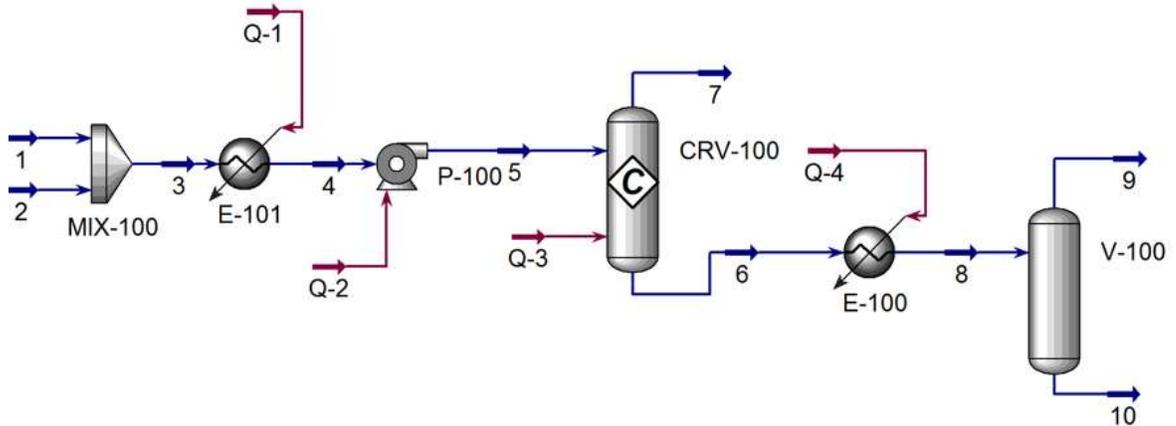
2.2 DISEÑO PRE-EXPERIMENTAL

El proceso involucrado tiene factores en el que la presión se comporta distinto a diferentes temperaturas y capacidades en el reactor, el diseño pre-experimental se realiza con el fin de revisar a groso modo como esta presión se comporta, de allí se profundizará con un diseño experimental, de igual manera también se probará el experimento a relaciones molares metanol/ácido graso de 3, 6.5, 8.5, 9 .5, de esa manera se indicará si es necesario el uso del metanol en una relación mayor a 9.5 como se menciona en el artículo **"TWO-STEP BIODIESEL PRODUCTION USING SUPERCRITICAL METHANOL AND ETHANOL"** (2011) , de los autores Ashley D'Ann, en el cual trabajan a relaciones molares de 10 y mencionan que a relaciones molares menores de esta la conversión es baja, no favorece a la reacción y no encuentra conversión mayor a un 60%.

Para ello se realiza un diseño pre experimental con diferentes variaciones de proceso como relaciones molares, temperaturas, capacidad de carga al reactor, obteniendo de esa manera conversiones favorables para el proceso.

La ilustración 3 muestra el diagrama del proceso general, el proceso comienza en el mezclador MIX-100, donde la corriente 1 la cual está compuesta por Ácido graso y el corriente número 2 la cual contiene metanol se mezclan. Para poder llevar a cabo la simulación en Hysys se debe agregar una bomba la cual aumentará la presión en el reactor, la reacción ocurre en el equipo CRV-100, donde posteriormente baja la temperatura por efecto de la presión, debido a que esta baja de 2000psi a presión atmosférica. Para finalizar el proceso se hace pasar la mezcla por el equipo V-100, en donde se separará el metanol del biodiesel.

Ilustración 3: Diagrama del proceso general.



Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

Para poder hacer el diseño pre-experimental se tiene que tener en cuenta todo el proceso a seguir y tener a disposición los equipos necesarios para el proceso.

La tabla 4 muestra el diseño que se realiza con distintos valores en las variables de proceso.

Tabla 4: Diseño Pre-experimental.

No Experimentos	Materias Primas				Variables De Proceso			
	Ácido Graso (g)	Concentración Ácido Graso (%)	Metanol (g)	Concentración Metanol (%)	Temperatura (°C)	Relación Molar (CH ₃ OH/RCOOH)	Capacidad del Reactor (%)	
1	935	85	792	100	250	9,55	81	
2	400	85	401	100	320	8,46	38	
3	1150	85	673	100	320	6,44	85	

Experimentos que están sujetos a una repetición por cada uno de ellos para la veracidad de los mismos. (Tabla 5).

Tabla 5: Diseño Pre-experimental (repetición).

Repetición	Materias Primas				Variables De Proceso			
No Experimentos	Ácido Graso (g)	Concentración Ácido Graso (%)	Metanol (g)	Concentración Metanol (%)	Temperatura (°C)	Relación Molar (CH ₃ OH/RCOOH)	Capacidad del Reactor (%)	
1	935	85	792	100	250	9,55	81	
2	400	85	401	100	320	8,46	38	
3	1150	85	673	100	320	6,44	85	

Los resultados de la primera pre-experimentación se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Resultados de la primera pre-experimentación.

No Experimentos	Materias Primas			Variables De Proceso			Resultados Del Proceso			
	Ácido Graso (g)	Concentración Ácido Graso (%)	Metanol (g)	Concentración Metanol (%)	Temperatura (°C)	Relación Molar (CH ₃ OH/R ₂ COOH)	Capacidad del Reactor (%)	Presión (psi)	Ácido del Biodiesel (%)	Conversión De Ácido Graso (%)
1	935	85	792	100	250	9,55	81	2500	10	80
2	400	85	401	100	320	8,46	38	850	42	51
3	1150	85	673	100	320	6,44	85	2800	3	96

Seguendo la tabla y revisando las variables de resultado se puede descartar ciertas condiciones de operación como:

- La capacidad del reactor no puede ser menor del 80% debido a que la presión no pueda alcanzar presión supercrítica.
- La relación molar es un factor clave para toda reacción de esterificación y transesterificación por lo que conlleva a que en este caso en particular no es una excepción, pero, a condiciones supercríticas se logró observar que solo es necesario estar a estas condiciones sin necesidad de tener un exceso considerable de metanol, por lo que se puede llegar a concluir que en el proceso se puede llegar a producir el biodiesel con relaciones molares cercanas a las estequiometrias con un porcentaje de conversión alto.
- La temperatura debe estar en condiciones mínimas cercanos a los 250°C por lo que en la experimentación se propone realizarlo a esta y a 300 °C, de esa manera se podrá evidenciar la diferencia que pueda tener en el proceso con un gradiente de temperatura de 50 grados Celsius.

Seguendo las anteriores afirmaciones se propone realizar la experimentación con ciertas variables ya determinadas y establecidas.

2.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para llevar a cabo la parte experimental fue necesario establecer un rango de valores del cual se pueden obtener el rango de presión y de conversión acorde a las especificaciones establecidas por la empresa. Los factores seleccionados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Variables independientes.

Factores de diseño	Rango
Relación Molar (Ácido graso/Metanol)	3,5-5
Temperatura (°C)	250-300

Cuadro 4: Variables de dependientes.

Factores de diseño

Presión (psi)

Tiempo de
residencia (min)

De acuerdo a los rangos establecidos en el cuadro anterior, se procede a realizar el diseño de experimentos, este se definió como un diseño factorial 2^k , cada experimento tendrá su respectiva repetición.

Teniendo la relación molar de 3.5 con respecto al metanol y se tiene establecido que la capacidad de carga al reactor no tiene que ser menor del 80% se toman esas dos características para establecer cuanta cantidad de ácido graso y metanol toca agregar al reactor. Establecido ese parámetro se logrará una tabla con los distintos experimentos a realizar.

Tabla 8. Diseño experimental.

	INICIALES			
	1	2	3	4
Ácido Graso	1250 g	1031 g	1250 g	1031 g
Metanol	528,3 g	622 g	668 g	622 g
Pureza Metanol	100%	100%	100%	100%
Volumen Total	2139 ml	2001 ml	2139 ml	2001 ml
Temperatura	250 °C	250 °C	300 °C	250 °C
Relación Molar (CH ₃ OH/RCOOH)	3,5	5	3,5	5

Se generaría la tabla para hacer los siguientes experimentos y sus respectivas repeticiones.

Tabla 9: Diseño experimental (repetición).

Repetición	INICIALES			
	1	2	3	4
Ácido Graso	1250 g	1031 g	1250 g	1031 g
Metanol	528,3 g	622 g	668 g	622 g
Pureza Metanol	100%	100%	100%	100%
Volumen Total	2139 ml	2001 ml	2139 ml	2001 ml
Temperatura	250 °C	250 °C	300 °C	250 °C
Relación Molar (CH ₃ OH/RCOOH)	3,5	5	3,5	5

Se tiene una repetición por experimento, por el costo por experimento es de \$370.000 pesos y la empresa no está dispuesta a asumir estos costos.

Con el ánimo de establecer variables más favorables de operación con respecto a la relación molar del metanol y el ácido graso, el experimento tiene como enfoque la relación molar, de esa manera se podrá evidenciar la conversión que puede alcanzar a temperaturas y presiones súper-críticas.

La tabla 10 muestra los resultados de la experimentación el cual se puede observar la cantidad que se produce de biodiesel, la cantidad de metanol, su pureza y la acidez del biodiesel, datos que se encuentran en el anexo A.

Tabla 10: Resultados de la experimentación.

	INICIALES			
	1	2	3	4
Ácido Graso	1250 g	1031 g	1250 g	1031 g
Metanol	528,3 g	622 g	668 g	622 g
Pureza Metanol	100%	100%	100%	100%
Volumen Total	2139 ml	2001 ml	2139 ml	2001 ml
Temperatura	250 °C	250 °C	300 °C	250 °C
Relación Molar (CH ₃ OH/RCOOH)	3,5	5	3,5	5
	FINALES			
Presión	1500 psi	1500 psi	2000 psi	2500 psi
Ácido Biodiesel cuando llega a condiciones supercríticas	8,38%	7,18%	9,88%	5,50%
Metanol Recuperado	481 g	553 g	480 g	537 g
Pureza Metanol	89%	95%	90%	92%
Acidez Biodiesel	2,99%	3,30%	3,80%	3%
Biodiesel	1270 g	1053 g	1200 g	1050 g

Se puede observar en la tabla, que la acidez con la que inicia el experimento es alta en relación al valor con la cual termina, ya que el primero es cuando llega a condiciones supercríticas y la otra cuando el experimento culmina, por lo que se puede decir que es mejor dar por terminada la reacción cuando apenas llegue a condiciones supercríticas y de esa manera poder comenzar otro lote.

2.4 MATERIALES Y REACTIVOS

A continuación, se presentará los materiales y reactivos necesarios tanto como para la producción del biodiesel a condiciones supercríticas como su neutralización y purificación.

2.4.1 Materiales. Para todos los reactivos nombrados a continuación, se encuentra la hoja de seguridad en el Anexo B cabe resaltar que la materia prima del proceso es brindada por la empresa Proptelma.

- Ácido graso
- Metanol
- Metilato de Potasio
- Tonsil
- KOH
- Carbón activado
- Alcohol isopropílico
- Fenolftaleína

2.4.2 Cantidad de reactivos para el diseño de experimentos

- **Ácido graso.** Para la pre-experimentación se emplea diferentes cantidades de ácido graso, basado en la relación molar y la capacidad de carga del reactor que se adicionara.
- **Metanol.** La cantidad de metanol varía dependiendo de la relación molar que se utilizará para cada experimento, es dependiente del ácido graso a utilizar.
- **Metilato de Potasio.** La cantidad del metilato de potasio varia con la cantidad de biodiesel que se debe neutralizar
- **Tonsil - Carbón activado.** En el proceso se agrega el 5% de tonsil con el 1% de carbón activado.
- **KOH.** El hidróxido de potasio se agrega con el fin de neutralizar los ácidos grasos libres y saber el número ácido del biodiesel, la cantidad de KOH es variable en cada corrida ya que el biodiesel puede variar de acidez.
- **Alcohol isopropílico.** Se agrega para cada muestra a titular (10 ml), con el fin de titularlo, es decir, es variable dependiendo de la cantidad de muestras de biodiesel que se obtengan para dicho uso.

2.5 EQUIPOS

2.5.1 Definición y especificación de equipos.

- **Reactor de tipo experimental.** Diseñado para efectuar la reacción de esterificación a condiciones súper-críticas con capacidad volumétrica de 2.6 litros y una condición máxima de operación de 5000 PSI y 723.15 K. El reactor

cuenta con un termostato y un barómetro, estos indican la presión y la temperatura del proceso, adicional a esto cuenta con válvulas de alta presión, tubería de acero inoxidable, una válvula de alivio y una tubería adicional de 10 cm de largo en acero inoxidable para tomar muestras a diferentes tiempos de reacción. (Ver Ilustración 4).

Ilustración 4: Reactor experimental.



- **Evaporador de capa fina.** El evaporador consta de un cilindro metálico el cual contiene una chaqueta de calefacción a su alrededor y por dentro agitadores, que permite al fluido entrar por la parte superior y seguidamente a las paredes calientes, permitiendo un mayor contacto superficial a una temperatura en la que el metanol en exceso se evapora y de esta manera se pueda separar por su punto de ebullición del biodiesel. (ver Ilustración 5).

Ilustración 5: Evaporador de capa fina.



- **Manómetro de presión.** Permite la medición de la presión dentro del reactor, este dispositivo tiene un rango de 0-5000 psi. (ver Ilustración 6).

Ilustración 6: Manómetro de Presión (Bourdon Haenni).



- **Termostato.** Permite la medición y control de la temperatura en los diferentes puntos del reactor y del evaporador como en la chaqueta e internamente de estos, con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. (ver Ilustración 7).

Ilustración 7: Termostato (AMPROBE TMD-53W).



- **Alcoholímetro.** El alcoholímetro permite determinar la cantidad de alcohol que se encuentra presente en una muestra bien sea líquida o gaseosa, para este caso se utilizó un alcoholímetro según Gay Lussac-Cartier. (ver Ilustración 8).

Ilustración 8. Alcoholímetro.



2.6 METODOLOGIA

Se mencionará de manera detallada la forma en que se realizaron los experimentos y su debido procedimiento para llegar a su resultado final que es el biodiesel y su separación.

2.6.1 Preparación metanol/Ácido graso. Se utilizará inicialmente para el primer experimento una relación molar de 3.5 es decir 3.5 moles de metanol por cada mol de ácido graso, estos datos se calculan tomando como base un 82% de la capacidad total del reactor, como experimento inicial se toman 1250g de ácido graso y 528g de metanol, el ácido graso se calienta previamente a una temperatura de 50°C, de esta manera se mezcla con el metanol evitando que este alcance su temperatura de ebullición, finalmente con ayuda de una bomba se carga la mezcla al reactor.

2.6.2 Condiciones de operación. Para la reacción se ha utilizado un reactor de tipo batch a escala laboratorio, en donde se carga la mezcla metanol/ácido graso por medio de una válvula de seguridad que se encuentra en la parte inferior del reactor, este reactor es calentado gracias a una resistencia la cual tiene contacto con la chaqueta del reactor. En la ilustración 9 se muestra el montaje realizado para dicho proceso.

Se trabaja a un rango de temperatura de 523-573 K, según lo especifique el experimento.

La presión está ligada estrictamente con la variación de la relación de metanol y ácido graso agregado en el reactor, es decir entre mayor sea cantidad metanol genera mayor presión en el reactor ya que se comporta como un fluido súper crítico. Esta variación oscila dependiendo del experimento.

Existen en el proceso dos etapas, la primera es el periodo que se lleva el metanol y el ácido graso a la temperatura de reacción a los 523 K, para el primer experimento y la segunda es la etapa de reacción donde se encuentra el metanol que se comporta como un fluido súper-crítico.

La toma de muestras es un factor muy importante en el experimento ya que en ciertos puntos del experimento se sacarán muestras y se analizará por medio de una titulación el grado de acidez que esta contiene, la titulación se realizará tomando 1 ml de muestra, en un beaker adicionándole 10 ml de alcohol isopropílico y unas gotas de indicador (fenolftaleína), el cual se neutralizará con una solución de 0.1g/L de hidróxido de sodio NaOH.

La primera toma de muestra se efectuará cuando la temperatura del reactor llegue a los 523 K, es decir la condición de proceso, las siguientes tomas de muestras se realizan cada 15 minutos hasta que la acidez del producto no supere una diferencia del 2% entre ellas, de esa manera se dice que al pasar el tiempo no va a tener un cambio en la acidez y se dará por terminado el experimento en el reactor, por consiguiente, el siguiente paso a seguir es la separación de los productos que contenga el reactor.

2.6.3 Separación de biodiesel con el exceso de metanol. Es el paso más importante del proceso debido a que se separarán los productos de la materia prima en exceso. Para este proceso se tiene previsto utilizar un evaporador de capa fina ya que por medio de él se separa en caliente y con agitación el biodiesel cerciorando de esa manera que a la salida del biodiesel no contenga rastros de agua ni de metanol, cuando se separa en caliente de esa manera es lógico que el metanol se evapore debido a que su punto de ebullición es de 65°C y la temperatura de la mezcla es de 130 °C ,por lo que se debe tener un condensador que permita recuperar el metanol utilizado con el agua producida por la reacción.

2.7 CARACTERIZACIÓN DEL ÁCIDO GRASO

La caracterización del ácido graso es un parámetro muy importante que se debe desarrollar en el proceso, ya que así se determina la cantidad de acidez que contiene nuestra materia prima.

2.7.1 Determinación de la densidad. La densidad es una propiedad que permite involucrar el peso del ácido graso en una determinada cantidad de volumen, se toma una muestra de 20 ml de ácido graso que tiene un peso de 17 g, dando como resultado una densidad de 0.85 g/ml.

2.7.2 Índice de acidez. La acidez del ácido Graso está determinada por la cantidad de ácidos grasos libres que se forman por la hidrólisis parcial de los triglicéridos, se entiende que el porcentaje de acidez corresponde a la cantidad en masa de ácidos grasos libres contenidos en 100g de la muestra del material graso (Grampone, 2011) . Para poder determinar el índice de acidez se propone una titulación con hidróxido de potasio, de esa manera se determina los mg necesarios de hidróxido de potasio para neutralizar los ácidos grasos libres contenidos en un gramo de ácido graso.

Se toma 1 ml de ácido graso y se mezcla con 10 ml de alcohol isopropílico, seguido de este proceso se agrega a la mezcla 2 o 3 gotas de indicador fenolftaleína el cual cambiara de color cuando este neutralizada la muestra, finalmente se agrega ml de KOH para neutralizar la mezcla de alcohol y biodiesel.

Para obtener el porcentaje exacto de acidez se realizaron los siguientes cálculos:

1 ml de biodiesel es equivalente a 0.85 g según lo determina la densidad

$$\begin{array}{l} 1 \text{ mol de ácido graso} = 285 \text{ g} \rightarrow 56.11 \text{ g KOH} \\ 0.85 \text{ g} \rightarrow X \end{array}$$

Se despeja X con el factor de conversión:

$$X = 0.167 \text{ g de KOH}$$

Este valor indica que para poder neutralizar 1 ml de ácido graso es necesario agregar 0.167 g de KOH

Se prepara una solución de KOH (10 g/L).

1000 ml de agua destilada → 10 g de KOH

X → 0.167 g de KOH

x = 16.7 ml de solución de KOH

Por lo que dependiendo de los mililitros gastados para neutralizar la muestra se multiplica el factor que sería

Ecuación 1: Factor para neutralizar el Biodiesel.

$$F = \frac{100}{167 \text{ ml de solución de KOH}}$$

F = 0.5988

Y de esa manera indicará el porcentaje de acidez que contiene la muestra de ácido graso.

Ecuación 2: Porcentaje de acidez.

$$\% \text{ ACIDEZ} = F * \text{ ml de solución de KOH para neutralizar.}$$

Ilustración 9: Montaje de titulación.



2.8 CARACTERIZACIÓN DEL METANOL

La caracterización del metanol se emplea para la veracidad de la materia prima con respecto a la pureza que este contiene.

2.8.1 Determinación de la pureza. El metanol, dependiendo de su pureza, tiene un efecto en la reacción importante ya que si está completamente puro no es necesario agregarle más reactivo, ya que no afectaría el balance de masa, en cambio si no está puro indica que contiene agua y la cantidad de metanol que entra no es la indicada en el proceso por lo que adicionar metanol que no esté puro afecta el balance y también la reacción ya que se estaría adicionando agua la cual en la reacción esta como producto.

Para determinar la pureza del metanol se utiliza un alcoholímetro según Gay Lussac-Cartier el cual al costado del instrumento indicará el porcentaje de alcohol

de la sustancia. En el proceso se mide con el alcoholímetro antes y después de la prueba ya que en la reacción se genera agua y está miscible con el metanol, al sacar el metanol en exceso del equipo (evaporador de capa fina), se encuentra el agua que se formó como producto y se determina la pureza con dicho instrumento.

2.8.2 Características de la esterificación super crítica. Se empleará un proceso que evitará el uso de catalizadores exponiéndose a un proceso no convencional, induciéndolo a condiciones súper-criticas, es decir, llevándolo a distintas temperaturas y presiones de proceso dando un biodiesel con características similares a la producción que hay en Colombia.

En el proceso de esterificación súper crítica se refiere a las condiciones del metanol en su estado súper crítico, es decir, la reacción se llevará cabo a condiciones mínimas de 240°C y 1350 psi, a partir de esa temperatura y presión el metanol se convierte en un fluido supercrítico y de esa manera se evita el uso del catalizador, para ello se necesita tener un reactor en acero inoxidable que sea capaz de soportar altas temperaturas (250 °C) y elevadas condiciones de presión (2000 psi).

Si se desea cargar con el reactor en frío, es necesario tener la mezcla a 50°C ya que esta estaría en estado líquido y favorece la fluidez hacia el reactor, por otra parte si se desea cargar en caliente, es decir con el reactor a 250°C es necesario tener una bomba hidráulica que soporte altas presiones (2000 psi) ya que la mezcla al tener contacto con el reactor a esa temperatura el metanol se evapora generando presión en el sistema, y si no se cuenta con una bomba de esas características devuelve el fluido y hasta podría causar un accidente.

2.9 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL

La caracterización del Biodiesel es el paso más importante y satisfactorio que el proyecto pueda tener, ya que mediante un análisis del producto obtenido se podrá determinar los diferentes estándares de calidad y parámetros que este debe cumplir, de esta manera se certificará que es un biodiesel apto para la industria de hidrocarburos.

Los parámetros que certifican un biodiesel apto para la industria de hidrocarburos se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de calidad del Biodiesel.

Ensayo	UNIDADES	VALOR LIMITE	NORMA ENSAYO
contenido en ester	% (m/m)	min 96,5%	UNE EN 14103
densidad a 15° C	Kg/m ³	860-900	EN ISO 3675
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	3,5-5,00	UNE EN ISO 3104
Flash Point	°C	min 120	ISO 3679
Contenido En Azufre	mg/Kg	10	ISO 20846
Numero De Cetanos		51	EN ISO 5165
Residuo Carbonoso	% (m/m)	0,3	ISO 10370
Contenido En Cenizas De Sulfatos	% (m/m)	0,02	ISO 3987
Contenido En Agua	mg/Kg	500	EN ISO 12937
Contaminación Total	mg/Kg	24	EN 12662
Corrosión En lámina De Cobre	Clasificación	Clase 1	EN ISO 2160
Estabilidad A La Oxidación	Horas	min6,0	UNE EN 14112
Valor Acido	mg KOH/g muestra	0,5	UNE EN 14104
Índice De Yodo	gl/ 100g muestra	120	UNE EN 14111
M.E. Linoleico	% (m/m)	12	UNE EN 14103
M.E. Poliinsaturados	% (m/m)	1	
Contenido En Metanol	% (m/m)	0,2	UNE EN 14110
Contenido En Monogliceridos	% (m/m)	0,8	UNE EN 14105
Contenido En Digliceridos	% (m/m)	0,2	UNE EN 14105
Contenido En Trigliceridos	% (m/m)	0,2	UNE EN 14105
Glicerina Libre	% (m/m)	0	UNE EN 14105
Glicerina Total	% (m/m)	0,25	UNE EN 14105
Metales Grupo I	mg/Kg	5	UNE EN 14108/14109
Metales Grupo II	mg/Kg	5	prEN 14538
Contenido En Fósforo	mg/Kg	10	UNE EN 14107
CFPP	mg/Kg	-	EN 116

Fuente: CEMITEC. "Caracterización del biodiesel, principales parámetros de calidad" {En línea}. {14 julio de 2018} disponible en: <http://www.biodieselspain.com/articulos/caracterizacion.pdf>

2.9.1 Determinación de Acidez. La determinación de acidez del biodiesel se realiza de igual manera que con el ácido graso, se toma 1 ml de biodiesel en una mezcla de 10 ml de alcohol isopropílico y gotas de indicador, se neutraliza con KOH hasta que cambie a una tonalidad fucsia y dependiendo de los mililitros gastados para neutralizar la muestra se multiplica por el factor que anteriormente se encontró, de dicha manera se encuentra el porcentaje de acidez.

$\% \text{ acidez} = F * \text{ml de KOH gastados para neutralizar}$

Ecuación 2.

2.9.2 Determinación grados API. La determinación de los grados API se realiza mediante un densímetro para cada muestra de biodiesel, el cual se sumerge en la muestra de biodiesel obtenida, oscilando entre los 32- 35 grados API.

Ilustración 10: Densímetro



2.9.3 Caracterización por parte de terceros. En este caso en específico la caracterización se hace por medio de la empresa ECOFUELS, la cual sirvió como intermediario para obtener un informe detallado de los parámetros de calidad del biodiesel. El informe entregado se encuentra en el ANEXO C y cumple con la mayoría de los estándares establecidos, el estándar que no cumple es el contenido de diglicérido y triglicérido por el porcentaje en masa que sobrepasa los valores máximos de contenido.

Ilustración 11: Muestra de Biodiesel.



En este segundo capítulo se recopiló toda la información para llevar a cabo la pre-experimentación, tomando los mejores valores obtenidos en esta para proceder con la experimentación, los cuales se utilizarán en el proceso de la planta Proptelma y los diferentes factores que tiene el proceso, se definió las materias primas y así mismo la cantidad que se requiere de cada una de ellas (ácido graso y metanol), los equipos que se requieren para hacer el montaje a nivel laboratorio, se describió la metodología en la cual se explica paso a paso el procedimiento para la obtención de biodiesel a condiciones supercríticas, finalmente se realizó la caracterización del biodiesel obtenido por medio de la empresa ECOFUELS.

3. INGENIERIA CONCEPTUAL

Mediante la ingeniería conceptual se indicará los principios físicos y químicos que satisfacen el propósito de la producción del biodiesel a condiciones supercríticas, después se darán bases para analizar y escoger la mejor alternativa.

3.1 BASES Y CRITERIOS DE DISEÑO

Para la ingeniería conceptual se tomará las siguientes bases y criterios de diseño:

3.2 PROCESO

El proceso de esterificación a condiciones súper críticas que soporta la ingeniería conceptual son los siguientes:

- Proviene del proceso experimental.
- Temperatura, presión y relación molar.
- Calidad materias primas y calidad producto terminado.

3.3 MATERIAS PRIMAS Y DE PRODUCTOS

- **Ácido Graso:** El ácido graso ha sido seleccionado debido a su bajo costo en el mercado, y es suministrado por la empresa ECOFUELS.
- **Metanol:** Este reactivo se maneja con una pureza del 90-95%, es un alcohol que se caracteriza por ser de bajo costo y utilizado para este tipo de esterificaciones.
- **Biodiesel:** El biodiesel obtenido cumplirá con todas las características y propiedades.

3.4 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

La capacidad de producción que tiene la empresa Proptelma está ligada con el reactor industrial que está instalado, y la cantidad de lotes que pueda producir de biodiesel a condiciones súper- críticas, que es de 4 lotes al día. En este caso la planta cuenta con un reactor industrial el cual tiene una capacidad de 1500 galones, dicho reactor se carga con el 82% de su capacidad total, dando como respuesta alrededor de 850 galones de Biodiesel y 380 galones de metanol por lote, posteriormente pasa a un proceso de purificación para remover el 5% de la acidez.

El cual 3230 galones de biodiesel se producen al día dejando a la semana 22610 galones de biodiesel.

3.5 NORMATIVA Y REGULACIÓN

A continuación, se presentan las diferentes normas que se deben tener en cuenta para la producción de biodiesel tanto en Colombia como a nivel Mundial, basado en estas normas se registrará este proyecto;

- **Resolución 90963 de 2014**⁸
“Por la cual se modifica el artículo 4° de la Resolución número 898 de 1995, modificado por la Resolución número 18 2087 de 2007, en relación con los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla con el combustible diésel de origen fósil en procesos de combustión.” Que desde el día treinta y uno (31) de diciembre de 2012, el combustible diésel corriente y el combustible diésel extra que se distribuye en el país cumple la especificación de contenido máximo de 50 partes por millón (ppm) en masa de azufre.
- **Acuerdo 251 de 2013**⁹
“Por el cual se establecen las características técnicas que deben cumplir los productos objeto de las compensaciones de estabilización.” Que es necesario precisar las características técnicas que deben cumplir los productos fabricados con base en aceite crudo de palma alto oleico, para ser objeto de compensación.
- **Resolución 909 de 2008**¹⁰
Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. (Junio 5 de 2008) **Artículo 2°**. Objeto. La presente resolución establece las normas y los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas, adopta los procedimientos de medición de emisiones para fuentes fijas y reglamenta los convenios de reconversión a tecnologías limpias.
- **Documento CONPES 3510 de 2008**¹¹
Este documento presenta a consideración del CONPES una política orientada a promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia,

⁸ ambientalex.info. (10 Septiembre del 2014). Ministerio de minas y energías. Disponible en: ambientalex.info

⁹ ambientalex.info. (2 Mayo del 2013).Federación nacional de Cultivadores de palma. Disponible en: ambientalex.info

¹⁰ ambientalex.info. (5 Junio del 2008).Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Disponible en: ambientalex.info

¹¹ ambientalex.info. (31 Marzo del 2008). Consejo nacional de política económica y social. Disponible en: ambientalex.info

aprovechando las oportunidades de desarrollo económico y social que ofrecen los mercados emergentes de los biocombustibles. De esta manera, se busca expandir los cultivos de biomasa conocidas en el país y diversificar la canasta energética, dentro de un marco de producción eficiente y sostenible económica, social y ambientalmente, que permita competir en el mercado nacional e internacional.

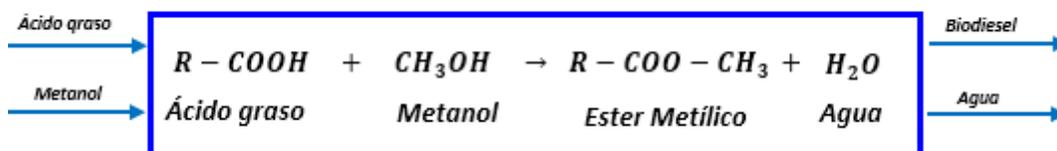
- **Ley 693** ¹²

Marcó la entrada de Colombia en la nueva era mundial de los combustibles de origen vegetal, utilizados desde hace muchas décadas (particularmente el etanol), debido al atractivo económico en razón del Protocolo de Kyoto y la dinámica de precios internacionales del petróleo.

3.6 DIAGRAMAS DEL PROCESO

3.6.1 Diagrama de la reacción del proceso. En la siguiente ilustración se muestra el diagrama general, con sus respectivas entradas y salidas correspondientes al proceso de producción de biodiesel a condiciones súper-críticas, mediante una reacción de esterificación.

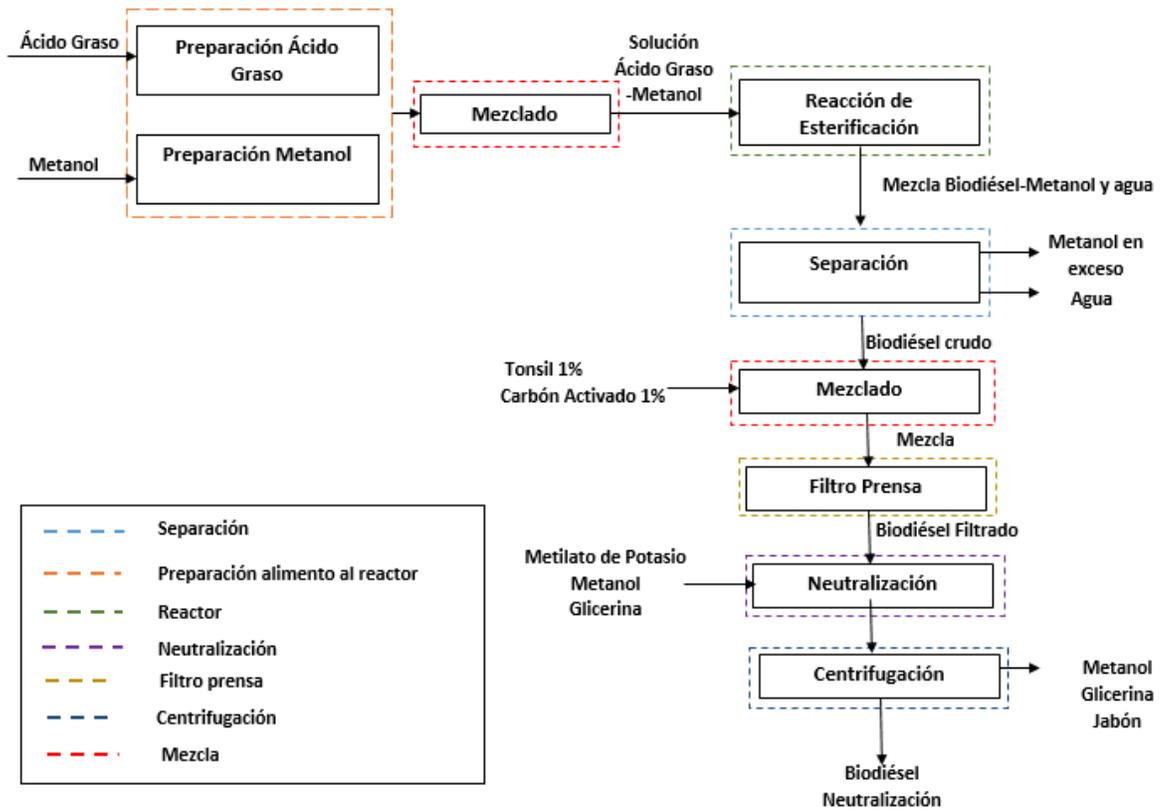
Ilustración 12. Diagrama de la reacción del proceso.



3.6.2 Diagrama genérico de Bloques. En la siguiente ilustración se muestra el diagrama detallado de los procesos que se llevan a cabo para la obtención del Biodiesel.

¹² MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIAS. (Abril del 2009). Biocombustibles en Colombia. Disponible en: http://www.upme.gov.co/docs/biocombustibles_colombia.pdf

Ilustración 13. Diagrama genérico de Bloques



3.6.3 Diagrama de flujo de proceso. El diagrama de flujo de proceso se encuentra en el anexo E.

3.7 BALANCES DE MATERIA

Las reacciones que se utilizaron para desarrollar los respectivos balances en hysys fueron los siguientes:

Tabla 12. Reacciones que ocurren en el reactor.

Reaction: Rxn-1			
Component	Mole Weight	Stoichiometric Coeff.	
1C18oicAcid	256.4	-1.000	*
Methanol	32.04	-1.000	*
M-Palmitate	270.5	1.000	*
H2O	18.02	1.000	*
Reaction: Rxn-2			
Component	Mole Weight	Stoichiometric Coeff.	
OleicAcid	282.5	-1.000	*
Methanol	32.04	-1.000	*
M-Oleate	296.5	1.000	*
H2O	18.02	1.000	*
Reaction: Rxn-3			
Component	Mole Weight	Stoichiometric Coeff.	
LinoleicAcid	280.5	-1.000	*
Methanol	32.04	-1.000	*
M-Linoleate	294.5	1.000	*
H2O	18.02	1.000	*
Reaction: Rxn-4			
Component	Mole Weight	Stoichiometric Coeff.	
StearicAcid	284.5	-1.000	*
Methanol	32.04	-1.000	*
H2O	18.02	1.000	*
M-Stearate	298.5	1.000	*

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

3.7.1 Balance de masa. El experimento en el cual se obtuvo un mejor resultado fue el número 1, obteniendo una conversión de 3 % de acidez, una mayor cantidad de biodiesel y condiciones económicamente más viables que los demás experimentos para las siguientes condiciones de proceso (ilustración 7):

- Relación molar: 3.5
- Temperatura de reacción: 250 °C
- Presión: 2000 psi
- Tiempo de reacción: 1 h

La cantidad de ácido graso se estableció con un valor de 1250 g y para hallar la cantidad de metanol se realizó el siguiente procedimiento:

$$1 \text{ mol AG} = \frac{\text{mol}}{265 \text{ g}} * \frac{1250 \text{ g}}{1} = 4,72 \text{ moles}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de metanol} &= \text{moles de ácido graso} * \text{relación molar} * \text{PM del MetOH} \\ &= 4,72 \text{ moles} * 3.5 * 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 528,64 \text{ g de MetOH} \end{aligned}$$

3.7.1.1 Balance mezclador.

- **Condiciones de operación en el mezclador.** La tabla número 12 muestra las condiciones de operación más relevantes en el mezclador, las cuales incluyen la temperatura, presión y flujo molar.

Tabla 13: Condiciones de operación en el mezclador

 UNIVERSIDAD DE AMERICA Bedford, MA USA		Case Name: producción biodiesel condiciones supercriticas hsc		
		Unit Set: NewUser		
		Date/Time: Wed Oct 25 18:18:45 2017		
Name		1	2	3
Vapour		0.0000	0.0000	0.0000
Temperature	(C)	20.0000 *	20.0000 *	20.0000
Pressure	(psia)	14.7000 *	14.7000 *	14.7000
Molar Flow	(kgmole/h)	10.7835	34.5970	45.3805
Mass Flow	(kg/h)	2918.5329	1103.7022	4022.2350
Std Ideal Liq Vol Flow	(m3/h)	3.2820 *	1.3855 *	4.6674
Molar Enthalpy	(kJ/kgmole)	-8.060e+005	-2.405e+005	-3.749e+005
Molar Entropy	(kJ/kgmole-C)	67.78	42.64	53.17
Heat Flow	(kJ/h)	-8.6919e+06	-8.3193e+06	-1.7011e+07

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

En la tabla número 14 se identifica las materias primas en sus correspondientes corrientes que entran al mezclador en donde la corriente 1 es de ácido graso y la corriente 2 de metanol, el corriente número 3 corresponde a la salida del mezclador donde el ácido graso se disuelve en el metanol.

Tabla 14: Compuestos de la corriente 1, 2,3.

Corriente	Compuesto	PM
1	Ácido Graso	270,6
2	Metanol	31,9
3	Mezcla	88,63

- **Propiedades de las corrientes 1, 2 y 3.** La tabla número 15 muestra las propiedades involucradas en cada una de las corrientes del mezclador, como la densidad molar, el peso molecular, la capacidad calorífica entre otros.

Tabla 15: Resumen de propiedades en el mezclador.

Name	1	2	3
Molecular Weight	270.6	31.90	88.63
Molar Density (kgmole/m ³)	3.243	24.83	10.23
Mass Density (kg/m ³)	877.8	792.2	907.0
Act. Volume Flow (m ³ /h)	3.325	1.393	4.435
Mass Enthalpy (kJ/kg)	-2978	-7538	-4229
Mass Entropy (kJ/kg-C)	0.2504	1.337	0.5999
Heat Capacity (kJ/kgmole-C)	519.5	114.6	210.9
Mass Heat Capacity (kJ/kg-C)	1.920	3.593	2.379
LHV Molar Basis (Std) (kJ/kgmole)	9.938e+006	6.317e+005	2.843e+006
HHV Molar Basis (Std) (kJ/kgmole)	1.061e+007	7.133e+005	3.066e+006
HHV Mass Basis (Std) (kJ/kg)	3.922e+004	2.236e+004	3.459e+004
CO2 Loading	---	---	---
CO2 Apparent Mole Conc. (kgmole/m ³)	---	---	---
CO2 Apparent Wt. Conc. (kgmol/kg)	---	---	---
LHV Mass Basis (Std) (kJ/kg)	3.672e+004	1.980e+004	3.208e+004
Phase Fraction [Vol. Basis]	0.0000	0.0000	0.0000
Phase Fraction [Mass Basis]	0.0000	0.0000	0.0000
Phase Fraction [Act. Vol. Basis]	0.0000	0.0000	0.0000
Mass Exergy (kJ/kg)	7.027	20.42	10.70

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hsys.

Corriente 1 + corriente 2 = corriente 3

$$\begin{aligned}
 & 2918,5328 \frac{kg}{h} \text{ de ácido graso} + 1103,7022 \frac{kg}{h} \text{ de metanol} \\
 & = 4022,2350 \frac{kg}{h} \text{ mezcla} \\
 & 4022,2350 \frac{kg}{h} = 4022,2350 \frac{kg}{h}
 \end{aligned}$$

3.7.1.2 Balance en el reactor

- **Condiciones de operación del reactor.** La tabla número 16 muestra las condiciones de operación más relevantes en el reactor, las cuales incluyen la temperatura, presión, flujo molar.

Tabla 16: Condiciones de operación en el reactor.

Name	5	6	7	Q-3
Vapour	0.0000	0.0000	1.0000	---
Temperature (C)	58.3151	250.0000	250.0000	---
Pressure (psia)	2000.0000	2000.0000	2000.0000	---
Molar Flow (kgmole/h)	45.3805	45.3805	0.0000	---
Mass Flow (kg/h)	4022.2350	4022.2369	0.0000	---
Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	4.6674	4.6450	0.0000	---
Molar Enthalpy (kJ/kgmole)	-3.665e+005	-3.153e+005	-1.994e+005	---
Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	141.6	346.3	156.7	---
Heat Flow (kJ/h)	-1.6634e+07	-1.4307e+07	-0.0000e+01	2.3265e+06

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

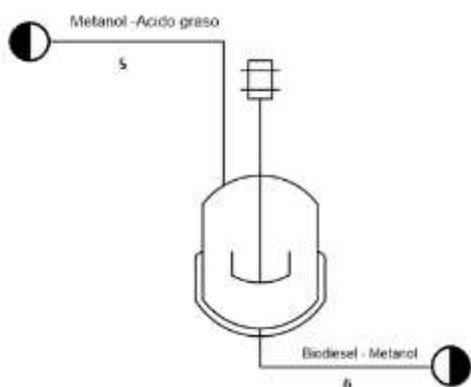
- **Propiedades de las corrientes 5, 6 y 7.** En la tabla número 17 se identifica las corrientes involucradas en el reactor, donde la corriente 5 corresponde a la mezcla proveniente del mezclador y la corriente 6 la salida del reactor que contiene el producto deseado que es el biodiesel en una mezcla de metanol en exceso que hubo en la reacción y agua.

Tabla 17: Propiedades de las corrientes involucradas en el reactor.

Name	5	6	7
Molecular Weight	88.63	88.63	29.03
Molar Density (kgmole/m3)	9.939	7.513	3.170
Mass Density (kg/m3)	880.9	665.9	92.05
Act. Volume Flow (m3/h)	4.566	6.040	0.0000
Mass Enthalpy (kJ/kg)	-4135	-3557	-6867
Mass Entropy (kJ/kg-C)	1.597	3.907	5.395
Heat Capacity (kJ/kgmole-C)	223.5	240.1	61.15
Mass Heat Capacity (kJ/kg-C)	2.521	2.709	2.106
LHV Molar Basis (Std) (kJ/kgmole)	2.843e+006	---	---

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

Ilustración 14: Corrientes en el Reactor



$$\text{Corriente 5} = \text{Corriente 6}$$

$$4022,2350 \frac{kg}{h} = 4022,2350 \frac{kg}{h}$$

3.7.1.3 Balance evaporador de capa fina

- **Condiciones de operación en el evaporador de capa fina.** La tabla número 18 muestra las condiciones de operación más relevantes en el evaporador de capa fina, las cuales incluyen la temperatura, presión, flujo molar.

Tabla 18: Condiciones de operación en el evaporador de capa fina.

Name	8	10	9
Vapour	0.7495	0.0000	1.0000
Temperature (C)	200.0000 *	200.0000	200.0000
Pressure (psia)	14.7000 *	14.7000	14.7000
Molar Flow (kgmole/h)	45.3805	11.3677	34.0128
Mass Flow (kg/h)	4022.2360	2939.3407	1082.8953
Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	4.6445	3.3398	1.3048
Molar Enthalpy (kJ/kgmole)	-3.091e+005	-6.088e+005	-2.090e+005

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

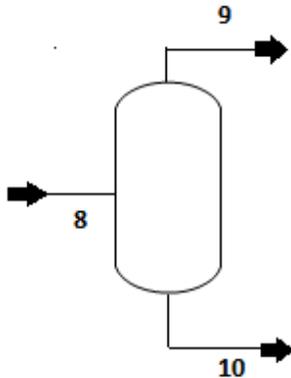
- **Propiedades de las corrientes 8, 9 y 10.** En la tabla número 19 se identifica los productos obtenidos con sus correspondientes corrientes, la corriente 8 corresponde a la mezcla de ácido graso y metanol, la corriente número 9 corresponde a la salida la cual contiene una mezcla de metanol y agua, y la corriente número 10 corresponde al producto obtenido (Biodiesel).

Tabla 19: Propiedades de las corrientes involucradas en el evaporador.

Name	8	10	9
Molecular Weight	88.63	258.6	31.84
Molar Density (kgmole/m3)	3.427e-002	2.853	2.576e-002
Mass Density (kg/m3)	3.038	737.6	0.8203
Act. Volume Flow (m3/h)	1324	3.985	1320
Mass Enthalpy (kJ/kg)	-3488	-2355	-6564
Mass Entropy (kJ/kg-C)	3.664	2.679	6.339
Heat Capacity (kJ/kgmole-C)	208.1	653.4	59.20
Mass Heat Capacity (kJ/kg-C)	2.347	2.527	1.859
LHV Molar Basis (Std) (kJ/kgmole)	---	---	---
HHV Molar Basis (Std) (kJ/kgmole)	---	---	---
HHV Mass Basis (Std) (kJ/kg)	---	---	---
CO2 Loading	---	---	---
CO2 Apparent Mole Conc. (kgmole/m3)	---	---	---
CO2 Apparent Wt. Conc. (kgmol/kg)	---	---	---
LHV Mass Basis (Std) (kJ/kg)	---	---	---
Phase Fraction [Vol. Basis]	0.2809	---	1.000
Phase Fraction [Mass Basis]	0.2692	0.0000	1.000
Phase Fraction [Act. Vol. Basis]	0.9970	0.0000	1.000
Mass Exergy (kJ/kg)	23.34	-23.29	106.5

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

Ilustración 15: Evaporador de capa fina.



$$\begin{aligned} \text{Corriente 8} &= \text{Corriente 9} + \text{Corriente 10} \\ 4022,2350 \frac{\text{kg}}{\text{h}} &= 1082,8953 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 2939,3407 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\ 4022,2350 \frac{\text{kg}}{\text{h}} &= 4022,2350 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

Balance general

$$\begin{aligned} \text{Corriente 1} + \text{Corriente 2} &= \text{Corriente 9} + \text{Corriente 10} \\ 2918,5328 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de ácido graso} + 1103,7022 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de metanol} \\ &= 1082,8953 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 2939,3407 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

3.7.2 Balance de energía. Basándose en el diagrama PFD, se desarrolló el balance de energía para cada etapa en la cual ocurría un cambio de energía.

3.7.2.1 Balance en el reactor. El calor se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 3: Balance de calor.

$$\begin{aligned} Q &= m_1 * (x_{AG} * Cp_{AG} * (T_i - T_r)) + (x_{MetOH} * Cp_{MetOH}(T_i - T_r)) \\ &\quad + (x_{H2O} * Cp_{H2O}(T_i - T_r)) \\ &= m_2 * (x_{MetOH} * Cp_{MetOH}(T_s - T_r)) + (x_{H2O} * Cp_{H2O}(T_s - T_r)) \\ &\quad + (x_{Biodiesel} * Cp_{Biodiesel}(T_s - T_r)) \end{aligned}$$

Q= Calor.

m = Flujo másico.

x = Fracción molar.

T_i = Temperatura de entrada de la corriente de ácido graso.

T_r = Temperatura de salida al reactor.

T_s = temperatura de entrada de la corriente de metanol.

C_p = Capacidad calorífica.

Para efectos prácticos el balance de energía se realiza mediante la ayuda de hysys, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 20.

Tabla 203: Datos del reactor.

Name	5	6	7	Q-3
Vapour	0.0000	0.0000	1.0000	---
Temperature (C)	58.3151	250.0000 *	250.0000	---
Pressure (psia)	2000.0000 *	2000.0000	2000.0000	---
Molar Flow (kgmole/h)	45.3805	45.3805	0.0000	---
Mass Flow (kg/h)	4022.2350	4022.2369	0.0000	---
Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	4.6674	4.6450	0.0000	---
Molar Enthalpy (kJ/kgmole)	-3.665e+005	-3.153e+005	-1.994e+005	---
Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	141.6	346.3	156.7	---
Heat Flow (kJ/h)	-1.6634e+07	-1.4307e+07	-0.0000e-01	2.3265e+06

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

El programa da como resultado la utilización de $2.3265e^{06} \frac{kJ}{h}$ para poder calentar la mezcla de ácido graso y metanol dentro del reactor de 58,31 °C a 250 °C que sería la temperatura de reacción.

$$Q = 2.3265e^{06} \frac{kJ}{h}$$

3.7.2.2 Balance Evaporador de capa fina. El calor se determinó mediante la ecuación 3:

Para efectos prácticos el balance de energía se realiza mediante la ayuda de hysys, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 21.

Tabla 21: Datos del evaporador de capa fina.

Name	6	8	Q-4
Vapour	0.0000	0.7495	---
Temperature (C)	250.0000 *	200.0000 *	---
Pressure (psia)	2000.0000 *	14.7000 *	---
Molar Flow (kgmole/h)	45.3805	45.3805	---
Mass Flow (kg/h)	4022.2369	4022.2369	---
Std Ideal Liq Vol Flow (m3/h)	4.6450	4.6450	---
Molar Enthalpy (kJ/kgmole)	-3.153e+005	-3.087e+005	---
Molar Entropy (kJ/kgmole-C)	346.3	327.9	---
Heat Flow (kJ/h)	-1.4307e+07	-1.4010e+07	2.9771e+05

Fuente: Hyprotech, versión 9, programa hysys.

El programa se evidencia como resultado de la energía cedida al ambiente que es de $2.9771e^{05} \frac{kJ}{h}$, energía que permite enfriar la mezcla que sale del reactor por el cambio de presión que baja drásticamente de 2000 a 14.7 psi.

$$Q = 2.9771e^{05} \frac{kJ}{h}$$

Se encuentra el reporte completo de Hysys en el ANEXO D.

Este capítulo se habla sobre la ingeniería conceptual del proyecto el cual incluye las bases y criterios de diseño, la capacidad de producción, los diagramas de proceso, y los balances de masa y energía en los equipos principales del proceso.

4. COSTOS

En este capítulo se hablará acerca de los costos de la planta de producción de biodiesel a condiciones súper críticas Proptelma. Los cuales se estimará los costos inversión, los costos de producción y se valorará la viabilidad del proyecto mediante indicadores como VPN, TIR Y PR.

4.1 ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE LA INVERSIÓN

La estimación económica de la inversión se realizará mediante los costos de los equipos principales para la producción del biodiesel. En este caso en específico se hablará del capex como el plan financiero de las inversiones.

4.1.1 Capex. Capex hace relación a los costos de inversión tales como terrenos, construcción, maquinarias de producción, coches, camiones, ordenadores, etc.

Estos costos ayudaran a la implementación de un flujo de caja el cual tendrá como objetivo la viabilidad del proyecto.

La empresa proptelma cuenta con un terreno de 3000 metros cuadrados, el cual tuvo un costo en el año 2005 aproximado de 5000 millones de pesos. Dato que se representa como un activo fijo y no un costo adicional en el flujo de caja.

En maquinaria de producción en este caso, se cuenta con los principales equipos para producción del biodiesel a condiciones supercríticas como lo son: reactor, evaporador de capa fina, filtro prensa, tanques de almacenamiento y mezclador. Datos del costo de dichos equipos son suministrados por la empresa, ya que esta cuenta con todos los equipos.

En la tabla 22 se mostrarán de manera resumidos los costos contenidos dentro del capex:

Tabla 22: CAPEX

ITEM	Costo (pesos por unidad)
Terreno	5.000'000.000
Reactor	600'000.000
Evaporador Capa Fina	200'000.000
Filtro Prensa	10'000.000
Tanques De Almacenamiento	80'000.000
Mezclador	50'000.000

4.2 ESTIMACIÓN COSTOS DE OPERACIÓN

La estimación de costos de operación se determina por los costos variables que pueda tener la operación, los cargos que pueda tener la maquinaria por desgaste, mantenimiento y uso, también por los gastos generales que se tienen en la empresa como servicios y demás. Toca tener en cuenta que la estimación de dichos costos es de manera conceptual y no de detalle lo que indicará cierta variación con los datos de detalle que son más específicos y se acercan mucho más a datos reales.

4.2.1 Opex. El opex hará referencia al costo que tiene hacer funcionar la empresa. Son los gastos operativos de la empresa, en el caso particular del proyecto son los gastos diarios que se tiene que soportar para la generación del biodiesel tales como: servicios generales, mantenimiento de equipos, personal, materias primas, etc.

Para el mantenimiento de los equipos se tiene en cuenta la limpieza, la reparación y cambio de piezas desgastadas en cada uno de ellos, también como la limpieza y cambio de mangueras y tuberías.

En servicios generales esta todo lo relacionado a gastos de servicios tales como agua, energía, internet y teléfono.

A cargo la empresa cuenta con ingenieros químicos, ingenieros mecánicos e ingenieros eléctricos. Además de personal especializado en el tema de soldar, uso de fresadora y torno. También personas encargadas de las finanzas de la empresa como contadores públicos y abogados.

Las materias primas están ligadas con la capacidad de producción que se ha seleccionado en el diseño conceptual el cual es de 850 galones de ácido graso y 380 galones de metanol por lote, el cual por día se sacan 1 lotes que daría al año 297500 galones de ácido graso y de metanol 133000 galones La producción de biodiesel ira aumentando cada año El costo del ácido graso es de 1850 pesos/kg y el de metanol es de 30000 pesos/kg. Alrededor de 900 galones de biodiesel se producen al día dejando 315000 galones de biodiesel al año.

En la tabla 23 se mostrarán de manera resumidos los costos contenidos dentro del opex:

Tabla 23: OPEX

ITEM	Costo (pesos por año)
Mantenimiento de equipos (al año)	20'000.000
Servicios generales	10'000.000
Personal	300'000.000
Materia Prima	1'575.000.000
Total	1'905.000.000

4.2.2 VPN. Para calcular el valor presente neto, se realizó un flujo de caja que cual incluye los gastos administrativos, comerciales, de producción, e ingresos operacionales los cuales se encuentran contenidos en el capex y opex mencionados anteriormente.

En la tabla 24 se muestran los costos de producción, para poder operar la planta es necesario contratar 13 personas las cuales generan un costo de 300.000.000 pesos al año, este valor tendrá un incremento anual del 10%, la materia prima tiene un costo para el año cero de \$1'575.000.000 y aumentara en un 8%, el mantenimiento de los equipos tiene un valor de \$20'000.000 pesos su incremento anual será del 8%.

Tabla 24: Costos de producción.

	AÑO					
Costo De Producción	1	2	3	4	5	6
Operadores	\$ 300.000.000	\$ 330.000.000	\$ 363.000.000	\$ 399.300.000	\$ 439.230.000	\$ 483.153.000
Materia Prima	\$ 1.575.000.000	\$ 2.551.500.000	\$ 3.674.160.000	\$ 4.960.116.000	\$ 6.428.310.336	\$ 8.099.671.023
Mantenimiento	\$ 20.000.000	\$ 21.600.000	\$ 23.328.000	\$ 25.194.240	\$ 27.209.779	\$ 29.386.562
Total	\$ 1.895.000.000	\$ 2.903.100.000	\$ 4.060.488.000	\$ 5.384.610.240	\$ 6.894.750.115	\$ 8.612.210.585

En la tabla 25 se muestran los costos administrativos, los gastos correspondientes a la secretaria y el gerente al año cero es de \$8'000.000 este valor tendrá un incremento anual del 9%, y los servicios generales tienen un costo para el año cero de \$10'000.000 y aumentará en un 8% anualmente.

Tabla 25: Gastos Administrativos.

	AÑO					
Gastos Administrativos	1	2	3	4	5	6
Secretaria y Gerente	\$ 8.000.000	\$ 8.720.000	\$ 9.504.800	\$ 10.360.232	\$ 11.292.653	\$ 12.308.992
Servicios Generales	\$ 10.000.000	\$ 10.800.000	\$ 11.664.000	\$ 12.597.120	\$ 13.604.890	\$ 14.693.281
Total	\$ 18.000.000	\$ 19.520.000	\$ 21.168.800	\$ 22.957.352	\$ 24.897.542	\$ 27.002.272

En la tabla 26 se muestran los costos comerciales, los gastos correspondientes a transporte en el año cero es de 10'00.000 este valor tendrá un incremento anual del 9%.

Tabla 26: Gastos de comercialización.

	AÑO					
Gastos De Comercialización	1	2	3	4	5	6
Transporte	\$ 1.000.000	\$ 1.090.000	\$ 1.188.100	\$ 1.295.029	\$ 1.411.582	\$ 1.538.624
Total	\$ 1.000.000	\$ 1.090.000	\$ 1.188.100	\$ 1.295.029	\$ 1.411.582	\$ 1.538.624

En la tabla 27 se muestran los ingresos operacionales, que corresponde a el precio de venta y las unidades producidas en cada año, anualmente el precio de venta de biodiesel tendrá un aumento del 9%.

Tabla 27: Ingresos operacionales.

	AÑO					
Ingresos Operacionales	1	2	3	4	5	6
Precio	\$ 12.118	\$ 13.208	\$ 14.397	\$ 15.693	\$ 17.105	\$ 18.644
Unidades	\$ 315.000	\$ 472.500	\$ 630.000	\$ 787.500	\$ 945.000	\$ 1.102.500
Total	\$ 3.817.170.000	\$ 6.240.780.000	\$ 9.070.110.000	\$ 12.358.237.500	\$ 16.164.225.000	\$ 20.555.010.000

Para la realización del proyecto fue necesario solicitar un préstamo de 5'940.000.000 pesos la se difirió a 4 años con una tasa de interés del 14%, en la tabla 28 se muestra amortización de dicho dinero.

Tabla 28: Tabla de Amortización.

n	Saldo	Interés	Cuota	Amortización
0	\$ 5.940.000.000	\$ -	\$ -	\$ -
1	\$ 4.732.963.587	\$ 831.600.000	\$ 2.038.636.413	\$ 1.207.036.412
2	\$ 3.356.942.077	\$ 662.614.902	\$ 2.038.636.413	\$ 1.376.021.510
3	\$ 1.788.277.555	\$ 469.971.891	\$ 2.038.636.413	\$ 1.568.664.521
4	\$ -	\$ 250.358.858	\$ 2.038.636.413	\$ 1.788.277.554

En la tabla 29 se muestra el flujo de caja teniendo en cuenta las tablas anteriormente mencionadas.

Tabla 29: Flujo de caja.

Flujo de caja	AÑOS						
	0	1	2	3	4	5	6
Ingresos	\$ 3.817.028.250	\$ 6.240.841.189	\$ 9.070.022.528	\$ 12.357.905.694	\$ 16.164.140.648	\$ 20.555.398.857	
Costos de Producción	\$ 1.895.000.000	\$ 2.903.100.000	\$ 4.060.488.000	\$ 5.384.610.240	\$ 6.889.475.115	\$ 8.612.210.585	
Gastos Administrativos	\$ 18.000.000	\$ 19.520.000	\$ 21.168.800	\$ 22.957.352	\$ 24.897.542	\$ 270.022.725	
Gastos Ventas	\$ 1.000.000	\$ 1.090.000	\$ 1.188.100	\$ 1.295.029	\$ 1.411.582	\$ 1.538.624	
Gastos Financieros	\$ 831.600.000	\$ 662.614.902	\$ 469.971.891	\$ 250.358.858			
Depredación y amort difer	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000
Utilidad antes de impuestos	\$ 477.428.250	\$ 2.060.516.287	\$ 3.923.205.737	\$ 6.104.684.215	\$ 8.649.081.408	\$ 11.320.647.376	
Impuestos	\$ 95.485.650	\$ 412.103.257	\$ 784.641.147	\$ 1.220.936.843	\$ 1.729.816.282	\$ 2.264.129.475	
Utilidad despues de impuestos	\$ 381.942.600	\$ 1.648.413.029	\$ 3.138.564.590	\$ 4.883.747.372	\$ 6.919.265.127	\$ 9.056.517.901	
Depredación y amort difer	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000	\$ 594.000.000
Amort. Credito	\$ 1.207.036.413	\$ 1.376.021.510	\$ 1.568.664.522	\$ 1.788.277.555			
Inversiones							
inversion fija	\$ 5.940.000.000						
Flujo de caja neto	\$ 5.940.000.000	\$ 231.093.813	\$ 866.391.519	\$ 2.163.900.068	\$ 3.689.469.817	\$ 7.513.265.127	\$ 9.650.517.901

Se utilizó una herramienta en Excel la cual permite calcular el valor presente neto, se obtuvo un valor de 694.511.676,70 pesos indicando que la viabilidad del proyecto.

Ecuación 4. VPN (Valor Presente Neto)

Donde:

j= Periodo

I= Ingresos I= Tasa

E= Egresos n=Último periodo

$$VPN = \sum_{j=0}^n \frac{I_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{E_j}{(1+i)^j}$$

Tabla 30: VPN

VPN		
Flujos a presente	\$	6.634.511.676
Flujo periodo 0	\$	5.940.000.000
VPN	\$	694.511.676
TIR		33%
Periodo de Recuperación		2,0389 Años

4.3 TIR

Para poder hallar la tasa interna de retorno se iguala con el VPN que anteriormente se halló, y seguidamente se despeja i , la TIR es un indicador que se compara con la TIO (Tasa interna de oportunidad), de esa manera también se puede determinar la viabilidad del proyecto, entonces:

TIR > TIO El proyecto es viable.

TIR < TIO El proyecto no es viable

Este indicador se calcula con la ecuación 5:

Ecuación 5: TIR

$$VPN = \sum_{j=0}^n \frac{I_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{E_j}{(1+i)^j}$$

Dónde:

t= Periodo

I= Ingresos

I= Tasa (TD) valor desconocido

E= Egresos

n= Último periodo

La tasa interna de retorno para el proyecto da como resultado siguiendo la herramienta en Excel del 33% indicando que al año se obtiene un retorno al inversionista de este porcentaje (tabla 29).

4.4 PR

El periodo de recuperación indica el momento en el que se recupera la inversión en un determinado tiempo, en el caso específico del proyecto dicha inversión se recupera a partir del segundo año. (Tabla 29).

Ecuación 6: *PR* Periodo de recuperación.

$$PR = a + [(b - c)/d]$$

Dónde:

a= Año anterior inmediato a que se recupera la inversión.

b= Inversión inicial.

c= Suma de los flujos de efectivo anteriores.

d= FNE del año en que se satisface la inversión.

5. CONCLUSIONES

- Las condiciones que inciden en el proceso de la obtención del biodiesel a nivel laboratorio son la relación molar, la temperatura y la carga suministrada al reactor. Todo esto teniendo en cuenta que el reactor es por lotes y no se tiene manera de controlar la presión sin que influya en el balance de masa.
- Las condiciones de operación del reactor a nivel laboratorio se establecieron mediante la ayuda de la pre-experimentación y la experimentación, dando como resultado que tener una relación molar de 3.5 moles de metanol por cada una de ácido graso es mejor que una relación de 5, en el sentido en que con relación de 5 se gasta más metanol y se produce menos biodiesel por lote para obtener la conversión del ácido grado muy similar.
- La temperatura se establece en 250 °C y de esa manera se puede elevar la presión a condiciones supercríticas ya que no existe gran diferencia cuando se eleva a 300 °C con respecto a la conversión. La última condición es tener cargado el reactor con una mezcla que ocupe el 80% de su capacidad ya que con estos tres parámetros se puede garantizar que exista condiciones supercríticas y conversiones altas del 80-90%.
- Se utilizaron herramientas financieras para hacer un análisis de costos y poder de esa manera revisar la viabilidad del proyecto para la empresa Proptelma. Dando como resultado que el proyecto es completamente viable dando un Valor Presente Neto positivo, una Tasa Interna de Retorno del 33% y un periodo de recuperación de aproximadamente 2 años.
- La producción de biodiesel a condiciones súper críticas es un proceso altamente viable económicamente y ambientalmente debido a que al ser un producto el cual no depende en un 100% de los hidrocarburos y se produce a partir de ácido graso siendo este una materia prima fácil de adquirir y metanol el cual es una materia prima que se recupera y puede ser recirculada dentro del mismo proceso, convirtiendo así el biodiesel en un combustible renovable.

6. RECOMENDACIONES

- Diseñar el proceso en un sistema continuo, y con aprovechamiento de las corrientes que generan energía por medio de un análisis del punto pinch con el fin de minimizar el tiempo de operación y ahorrar en los costos de energía.
- Realizar la ingeniería de detalle la producción del biodiesel a condiciones súper críticas.
- Evaluar la producción de biodiesel a condiciones súper críticas empleando otro alcohol como lo es el etanol para poder comparar experimentalmente la calidad del biodiesel producido.

BIBLIOGRAFIA

ALZATE, C. A. (2009). *BIODIESEL*. MANIZALES.

CA Cardona Alzate. Fluidos Supercriticos. [Electronic(1)]. [Consultado el FEBRERO/042017]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/6854/7/9789584452610_Parte3.pdf

CEMITEC. (14 de JULIO de 2017). Obtenido de <http://www.biodieselspain.com/articulos/caracterizacion.pdf>

DING, Jincheng; HE, Benqiao y LI, Jianxin. Biodiesel production from acidified oils via supercritical methanol. En: *ENERGIES*. vol. 4, no. 12, p. 2212-2223

ESTERMANN, Juan Carlos Yori. ESPAÑA.: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2007.

FedeBiocombustibles. (05 de 04 de 2017). *Fedecombustibles*. Obtenido de <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-271.htm>

FedeBiocombustibles. (05 de 04 de 2017). *Fedecombustibles*. Obtenido de <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-271.htm>

Federacion Nacional de biocombustibles de Colombia. (03 de 16 de 2017). *fede Biocombustibles*. Obtenido de <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>

Federacion Nacional de Biocombustibles de Colombia. (16 de 03 de 2017). *Fede biocombustibles*. Obtenido de <http://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-271.htm>

Grampone, D. M. (Mayo de 19 de 2011). *Biodiesel*. Obtenido de www.fing.edu.uy/archivos/biodiesel/clase-2.pdf

LAMOUREUX, J. H. (21 de Marzo 21 de 2017). *DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE BIODIESEL*. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

LAMOUREUX, J. H. (21 de Marzo 21 de 2017). *DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE BIODIESEL*. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104538/Diseno-conceptual-de-una-planta-de-biodiesel.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

MANUALE, Débora Laura. ARGENTINA.: UNIVERSIDAD NACIONAL DE LITORAL, 2011.

Mejia, A. d. (ABRIL de 2009). *Ministerio de minas y energias*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/docs/biocombustibles_colombia.pdf

Nacional, U. (29 de Enero de 2018). *Fluidos supercriticos*. Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/6854/7/9789584452610_Parte3.pdf

OSORIO, Alim Ignacio Vieitez. *Transesterificación En Alcoholes Supercríticos Como Alternativa Para La Producción De Biodiesel*. URUGUAY.: UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA, 2010.

SAKA, Shiro, et al. New process for catalyst-free biodiesel production using subcritical acetic acid and supercritical methanol. En: FUEL. vol. 89, no. 7, p. 1442-1446

SAKA, Shiro, et al. New process for catalyst-free biodiesel production using subcritical acetic acid and supercritical methanol. En: FUEL. vol. 89, no. 7, p. 1442-1446

SIBIODIESEL. (NOVIEMBRE de 2009). <http://sibiodiesel.blogspot.com.co/>. Obtenido de <http://sibiodiesel.blogspot.com.co/>

VIEITEZ, I., et al. *PRODUCCIÓN CONTINUA DE BIODIESEL EN METANOL Y ETANOL SUPERCRÍTICO*.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Yo Felipe Eduardo Vargas Londoño en calidad de titular de la obra **Desarrollo de la ingeniería conceptual de una planta de producción de biodiesel a condiciones supercríticas para la empresa Proptelma**, elaborada en el año 2017, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá a los 13 días del mes de febrero del año 2018.

EL AUTOR:

Autor 1

Nombres	Apellidos
FELIPE EDUARDO	VARGAS LONDOÑO
Documento de identificación No	Firma
1019089491	