



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura

Edwin Alberto Bulla Pereira

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2014**

Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura

Edwin Alberto Bulla Pereira

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Mecánica

Director (a):

Dr. MSc. Ing. Carlos Alberto Guerrero Fajardo

Línea de Investigación:

Energías Alternativas y control de procesos térmicos

Grupos de Investigación:

Aprovechamiento Energético de recursos naturales (APRENA)

Mecanismo de desarrollo limpio y gestión energética (MDL&GE)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2014

Son muchos los reconocimientos que tendría que brindar, que este espacio en blanco sería muy pequeño para manifestar de forma escrita los agradecimientos a esas palabras de aliente, chistes, murmullos, consejos, regaños que muchos seres queridos (**PADRES, FAMILIA, AMIGOS, PROFESORES, COMPAÑEROS DE ESTUDIO, TRABAJO Y ESTUDIANTES**) que me han brindado en el desarrollo de esta importante meta que me puse ya hace algún tiempo cuando tome la decisión que estudiaría una maestría en la Universidad Nacional de Colombia.

Algunos de estos seres perduran en mi vida, como otros ya no están en mi camino pero aunque no sé si podrán leer estas pequeñas líneas deseo manifestarle de todo corazón **MUCHAS GRACIAS Y DEDICARLES ESTE TRIUNFO** a cada uno de ellos que de alguna forma ya sea consciente o inconscientemente me ha aportado para ayudarme a terminar este gran proyecto de Obtener mi título de Máster en Ingeniería mecánica.

Doy gracias a Dios por darme la vida y permitirme estar cumpliendo este objetivo.

Pero en especial Doy **GRACIAS Y DEDICO** este proyecto a mis Padres Maria E, Ernesto y Eva y familia porque su fuerza por la vida es la que me permite tener ejemplos de que las cosas se pueden dar cuando uno desea algo y se logran conseguir cuando se es un ser humano en todos los procesos que te brinde la vida.

Edwin Alberto Bulla Pereira

Agradecimientos

A los Drs. MSc. Ingenieros Carlos Guerrero y Fabio Sierra por su conocimiento, paciencia, motivación colaboración que tienen frente a este gran camino de la academia ya que son un ejemplo a seguir en su condiciones de grandes profesionales que brinda su vida entera a ayudarnos a crecer como a sus pupilos en unos excelentes futuros profesionales que tengan un alto sentido de pertenencia, responsabilidad e imaginación a los proyectos y metas que se le crucen en el camino profesional. Gracias ingenieros por su apoyo a en el transcurso del desarrollo del proyecto.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, porque me permitió, seguir creciendo como profesional y me otorgo un apoyo económico a tesis de investigación en posgrados por medio de la Dirección de Investigación de Bogotá (DIB).

Muchas gracias a todos por su colaboración y apoyo.

Resumen

Desde años anteriores el biodiesel se ha convertido en una de las energías alternativas potenciales para remplazar el diesel derivado del petróleo. Es un combustible amigable con el medio ambiente, sin embargo, el uso de aceites vegetales refinados para la producción de biodiesel es poco práctico y rentable. Aceites de cocina usados de fritura (AUF), puede ser una buena opción, no obstante el contenido de ácidos grasos libres (AGL), se ha convertido en el principal inconveniente para el empleo como materia prima alternativa. Este trabajo pretende establecer el diseño del proceso de producción de biodiesel a partir de los aceites de fritura, bajo el análisis de algunas variables en la etapa de producción y posteriormente establecer el rendimiento del proceso. Los resultados establecen que el proceso de producción se realiza en dos etapas, debido al índice de acidez (IA) de 7,65 mg KOH/g aceite usado de soja. La primera etapa es una esterificación con catálisis homogénea ácida y segunda etapa con una transesterificación con catálisis homogénea básica, las variables del estudio son temperatura de reacción, porcentaje en peso del catalizar (%p/p), relación molar de 1:8 –Esterificación-, y 1:7 –Transesterificación-, condiciones que se emplearon para una prueba de producción de biodiesel de 105 L/Lote en una planta piloto de proceso discontinuo obteniendo un biodiesel con características físicas y químicas según los parámetros de la norma ASTM D 6751 con un rendimiento de 93,52 %p/p de FAEE's, y trazas de 4,60 %p/p de mono, diglicéridos. Las condiciones óptimas encontradas en el estudio hacen posible el uso del biodiesel producido en equipos industriales –Calderas-, que emplean diesel para su funcionamiento.

Palabras clave: Biodiesel, Transesterificación, Esterificación, Aceite usado de fritura, Etanolisis, Metanolisis.

Abstract

From previous years biodiesel has become one of the potential alternative energy to replace petroleum-derived diesel. Fuel is friendly to the environment, however, the use of refined vegetable oils to biodiesel production is impractical and cost. Used cooking oil for frying can be a good choice, however the content of free fatty acids (FFA) , has become the main drawback for use as an alternative feedstock . This work aims to establish the design of the production process of biodiesel from frying oils, under the analysis of some variables in the production stage and subsequently establish process performance. The results show that the production process is conducted in two stages because of the acid

value (IA) of 7.65 mg KOH / g soybean oil used . The first stage is an esterification with homogeneous acid catalysis and with a second stage transesterification basic homogeneous catalysis study variables are reaction temperature, weight percent of catalyst (%p/p), 1:8 molar ratio, esterification, 1:7 -and- transesterification, conditions used for biodiesel production test of 105 L/Lot in a pilot batch process obtaining a biodiesel plant with physical and chemical characteristics as the parameters of the ASTM D 6751 standard yield of 93.52 %p/p of FAEE's, and traces 4,60 %p/p of mono diglycerides. The optimum conditions found in the study make possible the use of biodiesel produced in industrial (boilers), diesel equipment used for operation.

Keywords: Biodiesel, Transesterification, Esterification, Used frying oil, Ethanolysis, Methanolysis.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVIII
Introducción	1
1.Planteamiento del problema	3
2.Nociones Generales	9
2.1 Antecedentes de la energía	9
2.1.1 Utilización actual de la energía.....	12
2.2 Fuentes de energía.....	14
2.2.1 La biomasa	19
2.3 El biodiesel	21
2.4 Demanda del biodiesel en Colombia.....	23
2.5 Materias primas para el biodiesel	25
2.5.1 Aceites y grasas.....	25
2.5.2 Catalizadores	28
2.5.3 Alcoholes	29
2.6 Métodos de elaboración del biodiesel	30
2.6.1 Variables que afectan el proceso de la transesterificación	32
2.7 Tecnologías para la producción de biodiesel	36
2.7.1 Plantas piloto para la producción de biodiesel a partir de AUF.....	39
2.8 Calidad del biodiesel.....	40
3.Ingeniería del Proceso	43
3.1 Elección de variables.....	44
3.2 Diseño del Experimento.....	53
3.2.1 Caracterización físico-química del aceite usado de fritura.....	53
3.3 Desarrollo del diseño de experimentos.....	61
3.3.1 Cantidad de reactivos.....	61
3.3.2 Montaje experimental de la producción de biodiesel en el laboratorio .	69
3.4 Análisis de la calidad y rendimiento del biodiesel producido.....	74
3.4.1 Análisis cualitativo	74
3.4.2 Análisis Cuantitativo	75
3.4.3 Análisis del rendimiento	84

4.Ingeniería Conceptual del proceso de producción de biodiesel	97
4.1 Capacidad de producción.....	97
4.2 Tipo de proceso para la producción de biodiesel.....	98
4.3 Requerimientos del proceso.....	99
4.4 Ubicación y plan plot de la planta piloto de biodiesel.....	99
4.5 Diagramas de proceso.....	101
4.5.1 Diagrama general de entradas y salidas.....	101
4.5.2 Diagrama genérico de bloques.....	102
4.6 Balance de masa y energía.....	103
4.6.1 Balance de materia.....	103
4.6.2 Balance de energía.....	108
4.7 Proceso y selección de equipos.....	115
4.7.1 Descripción del proceso de producción de biodiesel.....	120
4.8 Producción a escala semi-industrial.....	123
5.Evaluación económica.	130
6.Conclusiones y recomendaciones	133
6.1 Conclusiones.....	133
6.2 Recomendaciones.....	135
A.Anexo. Resumen de cotización de reactivos para elaborar biodiesel	137
B.Anexo: Fichas de Seguridad	139
C.Anexo: Formulas del desarrollo del diseño de experimento	151
D.Anexo: Tabla de análisis de varianza (ANOVA) para un diseño factorial 2⁴	152
E.Anexo: Planteamiento de hipótesis	153
F.Anexo: Listado de materiales de la planta de biodiesel de 150L/Lote	154
G.Anexo: Planos de la planta de biodiesel	158
H.Anexo: Protocolos para la producción en la planta piloto	181
Bibliografía	189

Lista de figuras

	Pág
Figura 1-1 : Las emisiones mundiales de CO ₂ relacionadas con la energía.....	5
Figura 1-2: Porcentaje de la emisión de CO ₂ de algunos países.....	6
Figura 1-3: Emisiones producidas de algunos gases efecto invernadero a partir de biodiesel.....	7
Figura 2-1: Consumo de energía en el mundo.....	11
Figura 2-2: Suministro de energía en el mundo por regiones.	12
Figura 2-3: Consumo de electricidad per capitat en el año 2012 (KWh por habitante)....	13
Figura 2-4: Consumo Final de energía por sectores.	14
Figura 2-5: Distribución porcentual de las fuentes primarias en el mundo.	16
Figura 2-6: Distribución porcentual de las fuentes primarias en Colombia.....	17
Figura 2-7: Utilización por sectores de diesel en Colombia.	23
Figura 2-8: Ecuación química de la reacción de transesterificación.....	30
Figura 2-9: Reacción de saponificación.....	31
Figura 2-10: Reacción de neutralización.....	32
Figura 2-11: Reacción de esterificación.....	32
Figura 2-12: Procesos de transesterificación tipo Batch.	37
Figura 2-13: Proceso de transesterificación en sistema continuo.	37
Figura 3-1: Diagrama de bloques del diseño metodológico de la ingeniería de proceso. 43	
Figura 3-2: Eslabones de la cadena de producción de aceites y grasas en Colombia. ...	45
Figura 3-3: Muestra de aceite usado de fritura recolectado	54
Figura 3-4: Grafica de Distribución F	61
Figura 3-5: Diagrama de proceso general de producción de biodiesel a escala laboratorio.	69
Figura 3-6: Esquema de montaje del proceso de filtrado del aceite usado de fritura	70
Figura 3-7: Montaje del proceso de esterificación.....	71
Figura 3-8: Separación de fases del proceso de esterificación.	71
Figura 3-9: Montaje de la producción de biodiesel en el laboratorio.	72
Figura 3-10: Decantación de los etil éster de ácidos grasos producidos a partir de aceites de fritura de soja.....	73
Figura 3-11: Proceso de lavado del biodiesel con agua a 40 °C.....	73
Figura 3-12: Biodiesel producido a partir de aceite de fritura de soja.....	74
Figura 3-13: Muestras de biodiesel con geles y sin geles.....	74
Figura 3-14: Viscosímetro de Ostwald.....	76
Figura 3-15: Termostato de inmersión.....	81
Figura 3-16: Grafica de Blox Plot de las interacciones de los factores Vs rendimiento ...	85

Figura 3-17: Cromatograma de la muestra de biodiesel obtenido con el ensayo 12 a partir de aceite de fritura y etanol.	91
Figura 4-1: Ubicación de la planta piloto de biodiesel.....	100
Figura 4-2: Plano maestro de la distribución del laboratorio de biocombustibles.	101
Figura 4-3: Diagrama general de entradas y salidas para la esterificación.....	101
Figura 4-4: Diagrama de entrada y salidas del proceso de transesterificación.	102
Figura 4-5: Diagrama genérico de bloques (GDFB)	102
Figura 4-6: Diagrama de balances de masa por operación del proceso de producción de biodiesel.....	107
Figura 4-7: Diagrama para el balance de la energía del mezclador de C_2H_6O / H_2SO_4	108
Figura 4-8: Balance de energía del reactor T-1 reacción de esterificación	110
Figura 4-9: Balance de masa del mezclador T-3 etanol / NaOH.....	111
Figura 4-10: Diagrama del balance de energía del reactor T-1 reacción de transesterificación.	113
Figura 4-11: Esquema del reactor con condiciones del sistema de reacción para el balance de energía.	113
Figura 4-12 Diagrama de flujo del proceso (PFD) de la planta piloto de 150 L/lote	121
Figura 4-13: Renderizado de la planta piloto de 150 L/Lote en 3D definida en el diseño del proceso	122
Figura 4-14: Montaje de planta de biodiesel de 150 L/Lote en el edificio de Química de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.	123
Figura 4-15: Producto en proceso de decantación (Izq) y biodiesel obtenido en la planta (Der).	124
Figura 4-16: Diagrama del rendimiento de los procesos de producción de biodiesel a nivel semi-industrial.....	125
Figura 4-17: Cromatografía de gases del biodiesel obtenido de la prueba 4 en la planta piloto.	126

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Reservas y Producción de fuentes primarias al 2012	16
Tabla 2-2: Porcentaje de aceite obtenido de plantas o semillas oleaginosas.....	21
Tabla 2-3: Ventajas y desventajas del biodiesel	22
Tabla 2-4: Marco normativo para el biodiesel en Colombia.	24
Tabla 2-5: Proyección de la demanda según los porcentajes de biodiesel planteados para Colombia	25
Tabla 2-6: Composición %wt de ácidos grasos de diferentes aceites y grasas.....	26
Tabla 2-7: Aceites y grasas utilizados para obtener biodiesel.....	26
Tabla 2-8: Propiedades fisicoquímicas de los aceites usados de fritura.	27
Tabla 2-9: Tabla de comparación de las propiedades de FAME y FAEE.....	29
Tabla 2-10: Comparación de las características del biodiesel Vs diesel Fósil.....	30
Tabla 2-11: Ventajas y desventajas catalíticas para la transesterificación.	34
Tabla 2-12: Estándar europeo (EN14214) - estándar americano (ASTM D 6751).	40
Tabla 3-1: Producción de aceite de cocina usado de algunos países.	46
Tabla 3-2 Catalizadores empleados en la transesterificación de aceites usados de cocina.	47
Tabla 3-3: Datos de la caracterización físico-química del aceite usado en el laboratorio.	57
Tabla 3-4: Comparación de datos obtenidos con datos reportados.	57
Tabla 3-5: Factores y rangos y niveles de diseño	58
Tabla 3-6: Niveles de los factores.....	58
Tabla 3-7: Matriz de combinación de tratamientos.	58
Tabla 3-8: Matriz de combinación de tratamientos para la producción de biodiésel en el laboratorio.	59
Tabla 3-9: Desarrollo del método de YATES para un experimento 2 ⁴ factorial.	60
Tabla 3-10: Composición de ácidos grasos del aceite usado de fritura de soja	62
Tabla 3-11: Masas molares promedio del ácido graso y triglicérido para el aceite usado de soja.	63
Tabla 3-12: Pesado de los picnómetros.....	63
Tabla 3-13: Cantidad de Reactivos para el procedo de producción de biodiesel a nivel laboratorio.	69
Tabla 3-14: Densidades del biodiesel producido en el laboratorio.	75
Tabla 3-15: Viscosidad cinemática de biodiesel de aceite de fritura de soja.....	77
Tabla 3-16: Datos de la norma Colombia y ASTM de viscosidad cinemática.....	77
Tabla 3-17: Datos de la prueba de contenido de cenizas.	78
Tabla 3-18: Contenido de cenizas de biodiesel obtenidos experimentalmente	79

Tabla 3-19: Datos del índice de acidez del biodiesel producido en el laboratorio.	80
Tabla 3-20: Temperatura del punto de nube del biodiesel producido en el laboratorio	82
Tabla 3-21: Porcentaje del contenido de agua en el biodiesel producido en el laboratorio.	83
Tabla 3-22: Datos de rendimiento de las producciones de biodiesel obtenida en el laboratorio.....	85
Tabla 3-23: Resultados obtenidos por el método de Yates	86
Tabla 3-24: Análisis de varianza para el DOE del rendimiento del proceso de producción biodiesel.....	87
Tabla 3-25: Prueba de hipótesis de los tratamientos para la producción de biodiesel.....	87
Tabla 3-26: Cromatograma de la muestra de biodiesel de las mejores condiciones producidas en el laboratorio con el ensayo 12.	91
Tabla 3-27: Estándares cromatograficos.....	92
Tabla 3-28: Composición de la muestra de biodiesel obtenido en el laboratorio con las mejores condiciones del ensayo 12.	94
Tabla 3-29: Propiedades del biodiesel obtenido del ensayo 12 con las mejores condiciones a partir de aceite de fritura y etanol.	95
Tabla 4-1: Balance de masa (Etanol y H_2SO_4)	103
Tabla 4-2: Balance en el reactor (T-1) reacción de esterificación	104
Tabla 4-3: Balance del separador.	104
Tabla 4-4: Balance de masa mezclador (T-3) etanol / NaOH	105
Tabla 4-5: Balance de masa reactor T-1 reacción de transesterificación.....	105
Tabla 4-6: Balance de masa del reactor T-1 reacción de neutralización	106
Tabla 4-7: Balance de masa de la etapa de separación D-1	106
Tabla 4-8: Calor específico de los reactivos y productos del proceso de biodiesel.....	109
Tabla 4-9: Balance de energía del mezclador de C_2H_6O / H_2SO_4	109
Tabla 4-10: Balance de energía del reactor T-1 reacción de esterificación	111
Tabla 4-11: Balance de energía del mezclador T-3 etanol / NaOH.....	112
Tabla 4-12: Datos para el balance de energía en el reactor.....	114
Tabla 4-13: Condiciones de diseño para el reactor	117
Tabla 4-14: Datos para el cálculo del espesor de pared del reactor.....	118
Tabla 4-15: Subsistemas de la planta piloto de biodiesel	122
Tabla 4-16: Balances de masa para la producción de biodiesel con aceite usado a nivel semi-industrial.....	124
Tabla 4-17: Producción de biodiesel obtenido en planta piloto a partir del aceite usado de fritura y etanol	124
Tabla 4-18: Cromatograma de la muestra de biodiesel de la prueba 4 con las condiciones más óptimas obtenida en la planta piloto.	126
Tabla 4-19: Composición del biodiesel obtenido del ensayo 4 en el proceso de producción de la planta piloto.....	128
Tabla 5-1: Evaluación del costo de producción de biodiesel a partir de aceites usados de fritura de soja	131
Tabla 5-2: Evaluación económica del proyecto de producción de biodiesel a partir de aceite usado de fritura de soja.	132

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
cSt	Viscosidad cinemática (Centiestokes)	m ² /s	
IA	Índice de acidez	mg KOH/g	
IS	Índice de Saponificación	mg KOH/g aceite	Ec. 1-1
M	Masa molar	g/mol	Ec. 1-1
AV	Valor ácido	mg KOH/g aceite	Ec. 1-1
B100	Biodiesel puro		

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AGL	Ácidos grasos libres
CG	Cromatografía de Gases
FAEE	Etil ésteres de ácidos grasos
p/p	Concentración porcentual en peso
v/v	Concentración porcentual en volumen
AUF	Aceite usado de fritura
FAME	Metil ésteres de ácidos grasos
MG	Monoglicéridos
DG	Diglicéridos
TG	Triglicéridos
G	Glicerol
MRS	Reactores de membrana
MSFBR	Reactor de lecho fluidizado y estabilizado magnéticamente
Kt	kilotonelada o mil toneladas
bpd	Barriles por día
ppm	Partículas por millón

Introducción

A través de los tiempos, el consumo de energía, a nivel mundial ha aumentado notablemente debido a que el hombre emplea y desarrolla una serie de dispositivos y técnicas que necesitan de algún tipo de energía para funcionar; la mayoría de los elementos y procesos requiere del uso de combustibles fósiles -el carbón, el gas natural y aquellos subproductos derivados del petróleo-; sin embargo, el consumo excesivo de estos productos ha causado efectos contraproducentes desde el punto de vista económico, social y ambiental; a medida que los combustibles fósiles se agotan día a día, existe la necesidad de encontrar un combustible alternativo para cumplir con la demanda de energía del mundo. El biodiesel es uno de los mejores recursos disponible, hoy en día es uno de los principales biocombustibles generados a nivel mundial, entre el 2001 y el 2009 pasó de 959 millones de litros a 15760 millones, con un ritmo de crecimiento anual del 41,9%. Esto plantea que para el 2020 el mercado del biodiésel espera producir 45291 millones de litros, sin embargo, esta industria posee algunos inconvenientes; primero que emplea como materia prima productos que se obtienen de cultivos de alimentos, segundo el aumento en la producción implica que se requiere de algún método de implementación de aceite usado de cocina después de su uso; debido a que este desecho, plantea un gran problema ambiental, tal es el caso de que 1 L de aceite desechado a la tubería contamina en promedio 1000 L de agua. Estas condiciones hacen que la industria de los biocombustibles –biodiesel-, centre una especial atención en la investigación de los aceites usados de fritura como una posible alternativa de materia prima en la producción del biodiesel; razones que permiten plantear el estudio del diseño del proceso de producción de biodiesel a partir de los aceites de fritura, bajo el análisis de la influencia de las variables en el proceso de producción y posteriormente establecer el rendimiento del proceso mediante el análisis obtenido por cromatografía de gases (CG). Los resultados establecen que el proceso de producción se realiza en dos etapas debido al índice de acidez (IA) de 7,65 mg KOH/g aceite obtenido de las muestras de aceite. La primera etapa es una esterificación con catálisis homogénea ácida y segunda etapa con una transesterificación con catálisis homogénea básica, las variables del estudio son temperatura de reacción de 60 °C, tiempo de reacción de 2 y 4 h, relación molar de aceite:etanol de 1:7 –Esterificación-, y aceite:etanol de 1:7 –Transesterificación- con estas condiciones se realizaron unas pruebas de producción de biodiesel de 105 L/Lote en una planta de proceso discontinuo, obteniendo un biodiesel con algunas características físicas y químicas según los parámetros de la norma ASTM D6751. De la prueba cromatográfica se establece que el biodiesel tiene un contenido 93,52% de FAEE's y un 4,60 %p/p de monoglicéridos. Las condiciones encontradas en este estudio hace posible el uso del biodiesel producido a partir de aceites de fritura y etanol tengan

una implementación en equipos industriales –Calderas-, que emplean actualmente diesel para su funcionamiento: Logrando así brindar un aprovechamiento de una materia prima que en el país es poco empleada en la obtención de un biocombustible. Su producción permitiría dar una fuente alternativa de energía a las industrias que emplean los combustibles fósiles en sus calderas consiguiendo contribuir con las condiciones medio ambientales que controlan las industrias en sus procesos industriales.

1. Planteamiento del problema

Ante las exigencias actuales, en torno a los efectos de la contaminación ambiental y la dependencia hacia las fuentes de energía fósiles, el problema de la obtención de nuevas fuentes de energía es un gran reto a emprender. Los beneficios que la energía puede proveer actualmente son: calefacción, iluminación, cocción de alimentos, el transporte, la utilización de servicios públicos, etc; actividades, que se encuentran relacionados con el empleo de algún tipo de energía. Las fuentes de energía son un aspecto esencial en el fortalecimiento y crecimiento social y económico de una nación. Además este efecto de crecimiento es un multiplicador en muchos sectores de la economía de un país tal es el caso de la agricultura, minería, industria, etc. Un aspecto de gran trascendencia en muchos lugares del mundo es como obtener más capacidad o sostenibilidad en el sector energético, aspecto que tiene como antecedente la década de los 70's, la cual marcó el inicio de la crisis de los combustibles fósiles definida por un efecto inflacionista en el precio de los combustibles, una identificación de la gran dependencia del mundo industrializado a la utilización del petróleo como fuente de energía, además de la dependencia de los países consumidores hacia los exportadores de estos recursos. Aspectos que para la época generaron una reducción de la actividad económica de los países afectados. Resultando en una serie de medidas permanentes, tales como frenar la dependencia de los abastecedores externos de los combustibles de origen fósil, la creación, investigación y desarrollo de nuevas fuentes de energía hacia finales del siglo XX y a comienzos del siglo XXI aparece, la afectación que el medio ambiente tiene por los gases generados por la combustión de los combustibles fósiles; condiciones que han generado un impacto importante en el sector energético.

Las crisis del petróleo de 1973 y 1978 permitió un gran estímulo para diseñar métodos de fabricación que permitieran el ahorro de energía, a su vez dio paso a investigaciones e iniciativas para incorporar fuentes de energías alternas no contaminantes, de alto rendimiento y económicas para la producción de combustibles. Sin embargo, algunas de ellas requieren de grandes inversiones en investigación y desarrollo, para lograr competir en costos de producción, costos de venta y volúmenes de producción frente a los conseguidos con los combustibles fósiles. Por otra parte, aunque es claro que las fuentes de energía fósiles presentan mayores características físico-químicas, hasta el momento aportan la mejor opción en la liberación de energía en forma de calor; para producir trabajo de tipo mecánico o bien para generar otras formas de energía por medio del calor obtenido. Esto permite lanzar una pregunta en torno al tema ¿Cuál será la mejor opción de combustible renovable producido para escoger que cumpla con las características de los combustibles no renovables?; esta pregunta establece que hay mucho trabajo en el

campo de la investigación de combustibles no convencionales, en el diseño de equipos para la producción, la implementación de esta tecnología obtenida al servicio de la humanidad y el crecimiento de cada nación en el sector energético, así mismo en la obtención de un biocombustible con un menor impacto ambiental, mejor rendimiento en los vehículos y equipos –Calderas-. Elementos que tienen una gran aplicación en las industrias de nuestro país y del mundo.

Para las épocas venideras, los combustibles que produzcan menores emisiones al ambiente serán la mejor alternativa para los vehículos terrestres, equipo industrial y todo elemento que empleen un combustible como elemento generador de su energía motriz. Entendiendo que esta alternativa tendrá como aspectos de impacto:

- a) La menor emisión de partículas contaminantes.
- b) Accesibilidad económica.
- c) Conocimiento de los combustibles no contaminantes por parte de la gente.
- d) El nivel de impacto ambiental producido por los combustibles: alternos (Hidrógeno, metanol, etanol, biodiesel, etc.) Vs fósiles (Gasolina, gasoil, diesel, entre otras).

En vista de estas consideraciones planteadas, es importante destacar, que eliminar el problema de la contaminación depende tanto de la captura de las emisiones como de la cero producción de emisiones, para ello es fundamental disponer de nuevas tecnologías que permitan:

- a) La caracterización de los dispositivos generadores o productores de combustibles nuevos (Biodiesel).
- b) El procesamiento de nuevos combustibles no fósiles.
- c) La producción de nuevos combustibles no fósiles con cero emisiones (Tales como diesel emulsionado).
- d) El desarrollo de nuevos medios de verificación y control de equipos que usarían estos combustibles.

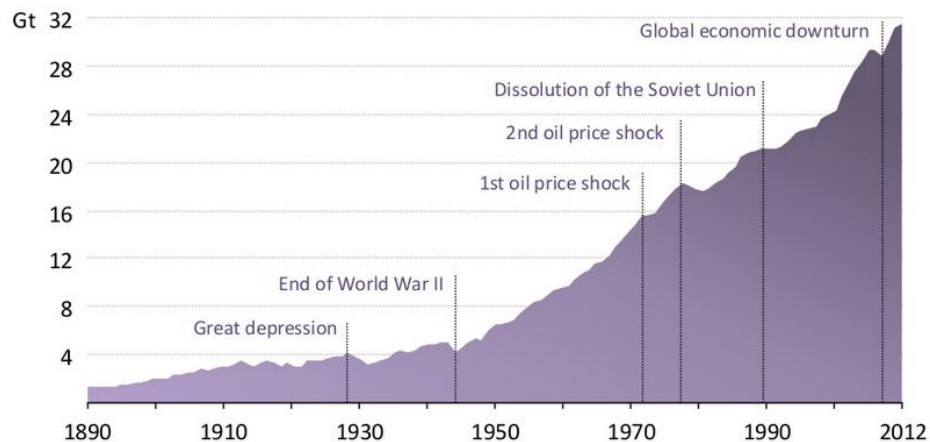
Encaminado con estos planteamientos y partiendo de la consideración de que los gases responsables del fenómeno llamado efecto Invernadero son: metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O_3), clorofluorcarbonos (CFC), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF_6), vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2)¹, siendo los tres últimos los gases más perjudiciales para el cambio climático del planeta [1]. Los gases fluorados poseen hasta 20000 veces más capacidad

¹ El dióxido de carbono, también denominado óxido de carbono, gas carbónico y anhídrido carbónico. Los dos últimos términos cada vez se emplean menos pero algunos documentos de tipo científico los plantean o establecen en su literatura.

para capturar el calor que el CO₂, pero aunque su producción es exclusiva de los seres humanos y no hay un proceso natural que los elimine de la atmósfera en el transcurrir del tiempo [2]. La cantidad generada de estos gases no es grande anualmente en comparación con la emisión de 32 Gt/año de CO₂ generadas por las fuentes de energía. El 58% de esta cifra ocurre debido al mayor uso de combustibles fósiles (Petróleo y carbón) como fuente de energía. En la figura 1-1, se identifica que la producción de CO₂ en el mundo para el año 2012 producida, identificando que desde la década de los 90's – Año de referencia del protocolo del Kyoto-, ha tenido un incremento interanual del 1,42% [3]. En la figura 1-2, se presentan los datos totales de las emisiones de CO₂ en unidades equivalentes (eq) y porcentaje de la producción de algunos países a partir de la producción de combustibles fósiles. Colombia emite el 0,37% de la producción mundial de este gas.

Según los datos obtenidos del dióxido de carbono, lo ideal sería que se pudieran utilizar combustibles alternativos que sean capaces de reducir la concentración en la atmósfera.

Figura 1-1 : Las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía

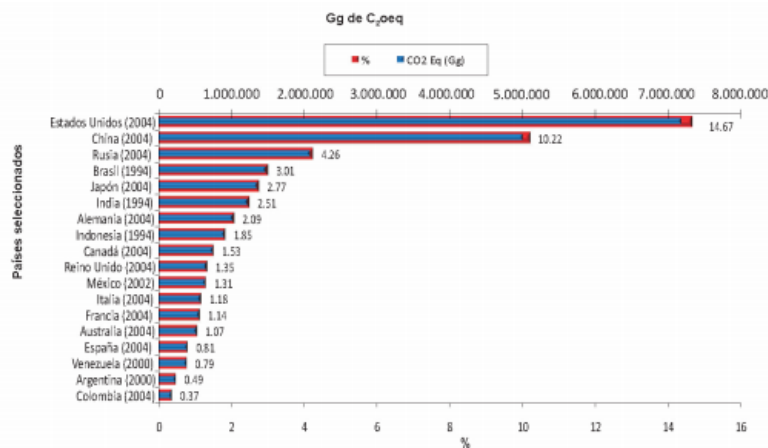


Fuente: [4].

Una de las alternativas para la solución del problema es el biodiesel que ha sido diseñado como una alternativa de combustible para políticas de energía no contaminantes. La potencia, el torque y los precios son similares a los diesel; pero el último factor –Precio- es debido a las subvenciones que los gobiernos de los países establecen con políticas y aranceles que impulsan su producción y uso como combustible, ya sea mezclando diesel con biodiesel en diferentes concentraciones o empleándose puro (B100), en cuanto a su utilización algunos estudios establecen que tiene un punto de congelación más alto que el diesel entre 0 °C y -5 °C, deteriora componentes que estén fabricados en algunos plásticos, hule natural, goma y caucha, etc, otros plantean que no es necesario la modificación de los equipos –Motor diesel-, para su utilización, posee un alto nivel de lubricidad aumentando la capacidad de lubricación de los componentes de un motor dando un mayor margen de vida útil,

además en estado puro no es tóxico, no presenta riesgos para la humanidad y para las condiciones de ambientabilidad cumple con ser un compuesto biodegradable [5] [6].

Figura 1-2: Porcentaje de la emisión de CO₂ de algunos países.



Fuente: [7].

Estos últimos aspectos hacen que al sustituir el diesel de forma parcial o total por el empleo de biodiesel en un motor convencional se obtienen reducciones significativas de emisión de dióxido de azufre (SO₂), CO₂, hidrocarburos pesados (HC), hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), hidrocarburos no quemados, material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x). En la figura 1-3, se presentan datos de porcentaje de algunos de los gases que son producidos en relación al porcentaje de mezcla del biodiesel con diésel. Sin embargo las disminuciones están determinadas por el estado del motor o equipo que emplee el biocombustible.

Las emisiones de los gases efecto invernadero son una de las condiciones que reafirman el desarrollo de combustibles con unos índices de emisión menores. El biodiesel es una alternativa y en la fabricación se pueden reutilizar productos –Aceites usados de fritura, grasas animales- empleados u obtenidos de otros procesos [8]. Por estas razones el biodiesel puede ayudar al balance de emisiones condición que por factores de industrialización los estados están tratando de mitigar su impacto en el mundo.

Los grupos de investigación APRENA² Y MDL&GE³ de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá tienen como área de trabajo los biocombustibles y específicamente el biodiesel líquido producido a partir de los aceites de fritura. Debido que a este producto después de usado se vuelve un elemento contaminante; 1 L de

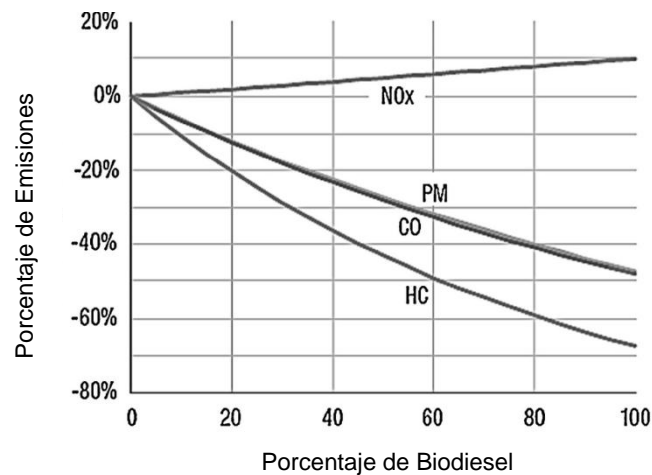
² Grupo de investigación aprovechamiento energético de recursos naturales.

³ Grupo de Investigación Mecanismos de desarrollo limpio y gestión energética.

aceite de fritura contamina 1000 L de agua. El reciclado y reutilización del compuesto en la producción del biodiesel se podría evitar emitir 1,32 Kg de CO₂ a la atmosfera [9].

Como se mencionó anteriormente el biodiesel se puede producir a partir de estas materias primas que actualmente se desechan; condición que permite obtener tres beneficios importantes. Uno, la disminución del problema de contaminación antes descrito con el aceite usado de fritura (AUF); dos el aprovechamiento de una materia prima que hasta el momento no posee un alto potencial de estudio para su utilización en la fabricación de biocombustibles en el país; tres realizar investigación en el tema y aportar a la obtención e implementación de un producto que podría ayudar y beneficiar a muchos sectores a través de un desarrollo sustentable y menos contaminante del medio ambiente en el país y el mundo; por estas razones los grupos desean realizar el diseño del proceso de producción a partir de aceites de fritura a nivel de planta piloto.

Figura 1-3: Emisiones producidas de algunos gases efecto invernadero a partir de biodiesel



Fuente: [10] [11]

Una evaluación de los parámetros de operación permiten obtener un biodiesel de óptima calidad con los rangos establecidos por normas internacionales, como el Europeo de especificaciones para el biodiesel EN14214 y el estándar americano de especificaciones para mezclas de biodiesel B100 ASTM 6751, son los dos estándares internacionales de mayor aceptación [12] [13]. Obtenidos los rangos óptimos de producción se pretende estandarizar el proceso y obtención del biodiesel con unos rangos ajustados a los parámetros de la norma y con estos poder realizar los ajustes al reactor para así lograr un biodiesel con unas características cercanas a los estándares que podría implementarse como fuente de energía en equipos industriales –Calderas – que utilizan como fuente de energía los combustibles convencionales.

2. Nociones Generales

2.1 Antecedentes de la energía

La energía tiene muchas aplicaciones, se puede apreciar en muchas actividades de la vida cotidiana; esto se observa cuando los animales realizan sus actividades migratorias, los seres humanos se levantan y trasladan, las plantas crecen, las máquinas, dispositivos e instrumentos realizan las actividades para las cuales se diseñaron; todas estas actividades requieren un consumo de energía. Básicamente un planteamiento muy simplificado de energía establecería que es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo o una acción; la energía no se destruye solo se transforma; estos conceptos se manifiestan en los movimientos o transformaciones que esta le brinda a la objetos, sustancias y materia ya sea de tipo mecánico, químico, biológico, social u otros [14] [15].

Algunos acontecimientos históricos del empleo de diferentes fuentes de energía es el fuego empleado para calefacción, iluminación, cocción de alimentos, en periodos posteriores descubrieron el empleo de la fuerza de animales y su implementación en actividades de la labranza y el acarreo de cargas pesadas, posteriormente el descubrimientos de los metales permitió utilizar conscientemente el fuego consiguiendo a partir de la combustión de madera o el carbón vegetal altas temperaturas para los procesos. En la época preindustrial la fuente más importante de energía la constituía la leña; elemento que comenzó a escasear por el consumo indiscriminado de los bosques, adicionalmente se utilizaba la energía del viento en la navegación, bombeo de agua y molienda de cereales o minerales, la energía del agua en los molinos hidráulicos. Se presenta una época de transición y solo a finales del siglo XVII se empieza a notar la aplicación de descubrimientos y progresos de conocimiento científicos realizados en la física y la química aplicada, en este periodo James Watt desarrollo la máquina de vapor que fue considerada el motor de la primera revolución industrial y se obtuvieron grandes avances y aplicaciones en industria textil, minera, siderúrgica, así como en el transporte marítimo y ferroviario; esta última, aplicación se generalizó a mediados del siglo XIX permitiendo la construcción de amplias redes ferroviarias en Europa y Norteamérica así como en pequeña proporción en África, Asia y América del sur; pero este desarrollo se seguía sustentando en el uso de la madera [16]. Pero esto cambió pronto con el uso de los combustibles fósiles, primero con el carbón y luego con el petróleo que se obtuvo en grandes cantidades a partir del año de 1859 con el primer pozo petrolífero, además en este mismo siglo otro de los grandes desarrollos fue el diseño del motor de combustión interna en el año de 1876 por el ingeniero Nicolaus A. Otto. Éste diseño se hizo famoso

en todo el mundo como máquina para el accionamiento de vehículos, trenes, barcos y aviones; a la vez sirvió como punto de referencia al ingeniero Rudolf Diesel para desarrollar entre los años de 1893 y 1897 el diseño y construcción del primer motor del mundo que quemaba aceite vegetal (Aceite de palma) en ambientes de trabajo; es hasta mediados y finales del finales del siglo XIX que se empleaban muchas fuentes de energías renovables en los ambientes de trabajo [17] .

Se siguieron realizando avances en el estudio de la electricidad, aspecto que obtuvo los descubrimientos de la ley de Faraday, la ley de Ohm, el Amperio, el Coulomb, etc; condiciones que permitieron hacer posible la transformación de la electricidad en trabajo mecánico, aspectos que concibieron inventos de un alto impacto en la calidad de vida de los seres humanos, tales como el motor de corriente eléctrica alterna y continua, la transferencia de electricidad a distancias muy alejadas, la iluminación por alumbrado y por medio de lámparas, etc. Estos avances permitieron en las ciudades del mundo un gran desarrollo y la implementación de la energía eléctrica se convirtió en una herramienta cotidiana empleada, en muchas de las necesidades de la humanidad como la iluminación, actividades de tipo doméstico, industrial y comercial.

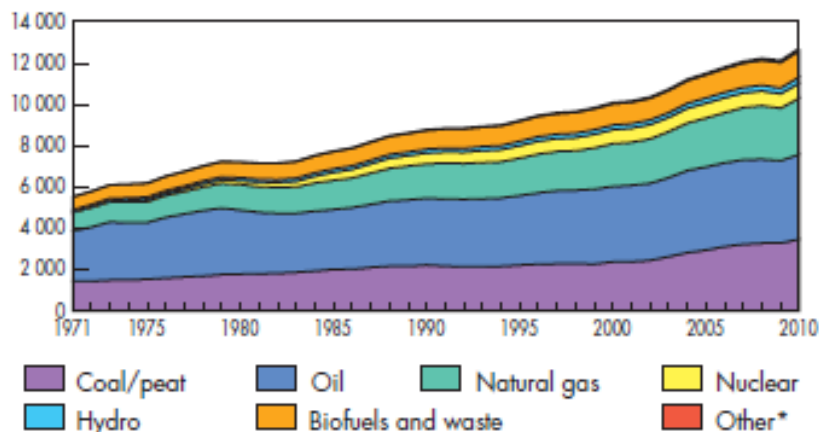
Con el uso de la energía eléctrica en las necesidades de los seres humanos, la demanda de fuentes de energía comenzó a crecer agigantadamente. La generación de la electricidad no se suplía solamente con el uso del carbón, estas condiciones hicieron que se iniciara a utilizar también el petróleo como combustible de generación; poco a poco este último comenzó a ganar más implementación e importancia como fuente de energía debido a las características que tiene frente a otras fuentes tales como una densidad energética menor, mayor facilidad en el transporte, la explotación era mucho más favorable, dichas particularidades desplazaron el uso del carbón a gran escala; es a partir de la segunda guerra mundial -Era del petróleo-, que el consumo del petróleo se implementó como una de las principales fuentes de energía en el mundo desde ese entonces hasta los actuales días.

En las últimas décadas del siglo XIX la implementación y construcción de redes de distribución eléctrica por muchos lugares del mundo generó un gran crecimiento en el consumo de electricidad, esto permitió el desarrollo de las centrales térmicas e hidroeléctricas. En la década de los 60's del siglo XX se desarrolló la energía atómica que a su vez permitió el desarrollo de las centrales nucleares; instalaciones industriales propuestas para: la expansión comercial de la energía nuclear y como otra fuente de energía que contribuyera a suplir la demanda que desde las últimas décadas del siglo XX los países han tenido [18] [19].

A finales del siglo XX e inicios del siglo XXI el incremento del consumo de energía ha sido de una forma exponencial. En la figura 2-1 se observa que el consumo de energía

entre el año 1973 era de 6107 Mtoe⁴ y el año 2010 era de 12789⁵ Mtoe, es decir, en el transcurso de 37 años el consumo aumentó en más del 50%, este incremento plantea otros retos con referencia al tema hacia el presente y futuro de la obtención y sostenibilidad de demanda de energía; tales desafíos son: el crecimiento socioeconómico de las naciones, el aumento en la población mundial, el cuidado y protección del medio ambiente ante la amenaza del calentamiento global generado por los gases efecto invernadero que son producidos por los recursos fósiles (Petróleo, carbón, gas natural y sus derivados), el agotamiento de los recursos fósiles en producción y calidad, mantener y aumentar la calidad de vida de los seres humanos; aunque se han producido grandes avances en la producción de energías en el uso de todas las fuentes de energías primarias; se plantea una tendencia con referencia al aumento en la diversificación de la matriz energética de todos los países del mundo, es decir, que las naciones deben hacer más inversión en investigación y desarrollo en temas de energías y tecnologías que permitan su producción y un mayor aprovechamiento eficiente en el empleo e implementación de fuentes de energías renovables –Solar, eólica, geotérmica, biomasa, marina-, a gran escala.

Figura 2-1: Consumo de energía en el mundo.



Fuente: [3].

Aunque en la actualidad estas últimas son todavía costosas frente al uso de las fuentes fósiles, aspecto que debe generar un gran avance con el fin de tener una mayor implementación y utilización más de estas energías que están en beneficio con las políticas y aspectos ambientales del planeta, además permitir que las personas se habitúen y puedan apreciar sus bondades y beneficios [20].

⁴ Unidades de energía denominada Million of tonnes of oil equivalent o Millones de toneladas equivalente de petróleo. 1 toe = 10 millones de calorías = 11630 GWh. Estas son unidades que preferentemente utilizan los economistas.

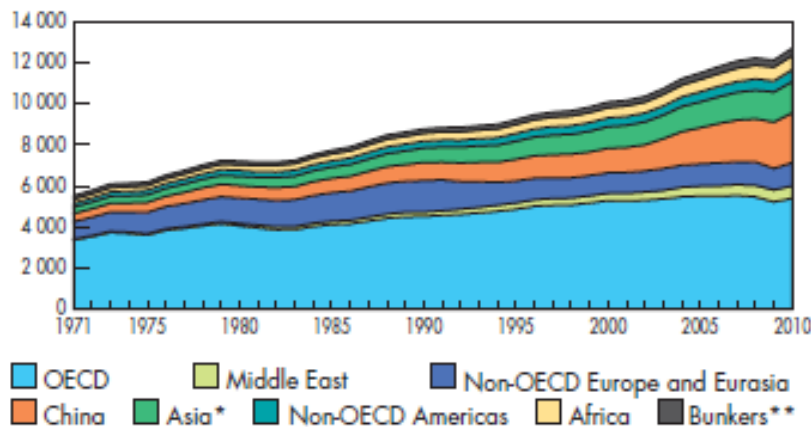
⁵ Es importante mencionar que a la fecha de escribir este documento la información disponible a nivel mundial corresponde a 2010, derivado de la integración de los datos de todos los países.

2.1.1 Utilización actual de la energía.

Los seres humanos han necesitado siempre de elementos básicos –Alimentos, abrigo, energía-, para obtener un progreso y tener unas condiciones de calidad de vida, no obstante cuando alguno de estos se reduce se generan complicaciones a nivel mundial. Según pronósticos, los productos de fuentes fósiles poseen un periodo límite en la humanidad empleándose en las cantidades actuales, destinadas a hacer funcionar las industrias, el transporte de mercancías o personas por carretera, ferrocarril, marítimo o aéreo, para producir iluminación en las calles, oficinas, comercios y hogares, para producir sistemas de refrigeración y calefacción, para los electrodomésticos, para los dispositivos multimedia, para la agricultura, las telecomunicaciones, etc. Estas y otras aplicaciones de la energía obtenida por combustibles fósiles hacen que su consumo crezca a nivel mundial, pero actualmente se plantea un gran problema debido a la desigualdad que existe entre las demandas energéticas que posee una sociedad desarrollada y una sociedad en vías de desarrollo. En la figura 2-2, se aprecia el suministro de energía que tuvieron las diferentes regiones en el mundo entre el periodo de 1971 y 2010.

Los mayores consumidores de energía en el mundo son los miembros de la OCDE con un 42,4% de los 12789 Mtoe que se suministraron en el 2010 contrario a los Non-OCDE Américas con 4,6% del total suministrado.

Figura 2-2: Suministro de energía en el mundo por regiones.

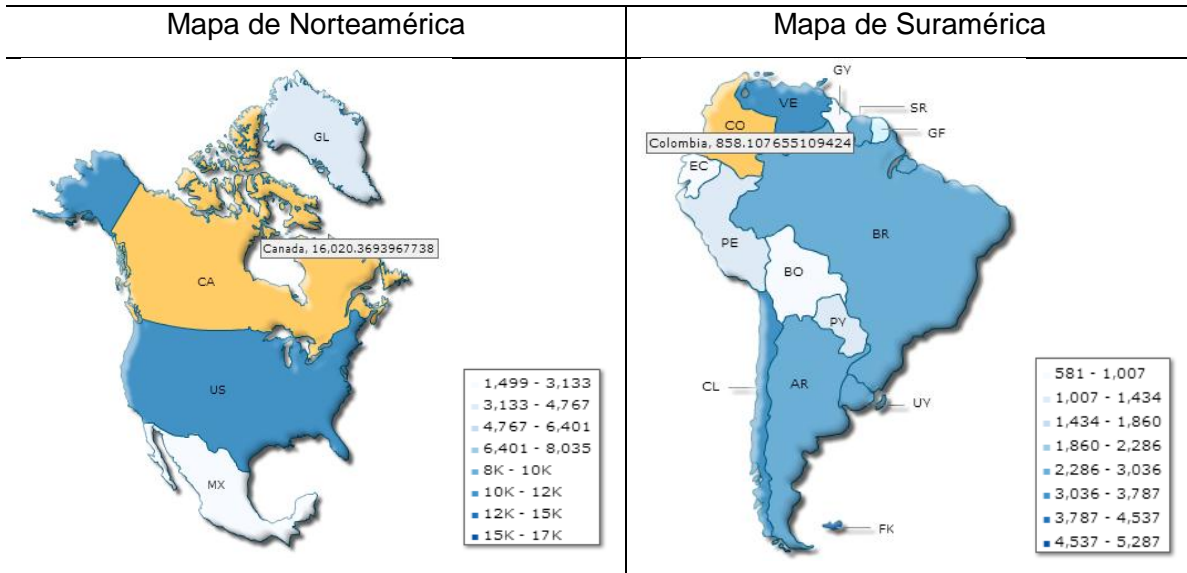


Fuente: [3] EIA. 2012. Organisation for Economic Co-operation and Development (siglas en inglés OECD) u Organización para la cooperación y el desarrollo económico (siglas en español OCDE). Non-OECD Américas. Estados no miembros de América de OECD * Excluye a China de Asia. ** Incluye la aviación internacional y marítima internacional bunkers.

En la figura 2-3, se observa dos mapas comparativos del consumo de electricidad por habitante de Norteamérica (Canadá) frente al continente suramericano (Colombia) en enero de 2012, es decir, que un habitante de Canadá tiene un consumo de 16 kWh, frente a un habitante en Colombia que consume 858 Wh; por lo que un habitante de un

país desarrollado consume 18 veces más de electricidad que un habitante de un país en desarrollo.

Figura 2-3: Consumo de electricidad per capitán en el año 2012 (KWh por habitante).



Fuente: Autor.

Es evidente el desequilibrio entre los individuos del mundo con respecto al consumo y la producción de recursos energéticos, factor que desde tiempos históricos ha sido y será fuente de incesante inestabilidad entre los países manifestándose en conflictos, un ejemplo de este aspecto es las guerras del Golfo Pérsico en la década de los 90's a finales del siglo XX, que ponen en evidencia la lucha entre las naciones por tener el poder de la principal fuente de energía primaria⁶ - El petróleo -; condición que en esta época en que las reservas energéticas de algunas naciones del mundo son un factor crítico para el desarrollo, estabilidad de crecimiento, modernidad y adaptabilidad de sus economías hace que el dominio de esta fuente constituya un claro objetivo estratégico hacia el futuro debido a la alta demanda y la condición de incertidumbre de la escasez. [21]. Dicha condición permite que las naciones que cuenten con fuentes puedan tener una gran influencia en los aspectos de la economía mundial.

Actualmente la producción de la energía obtenida en cada nación se emplea en los sectores de la actividad económica.

- Sector primario (Agricultura): Obtiene sus productos directamente de la naturaleza sin ningún proceso de transformación. (Agricultura, pesca, silvicultura, ganadería, etc). Según el banco de la República de Colombia, establece que la extracción del

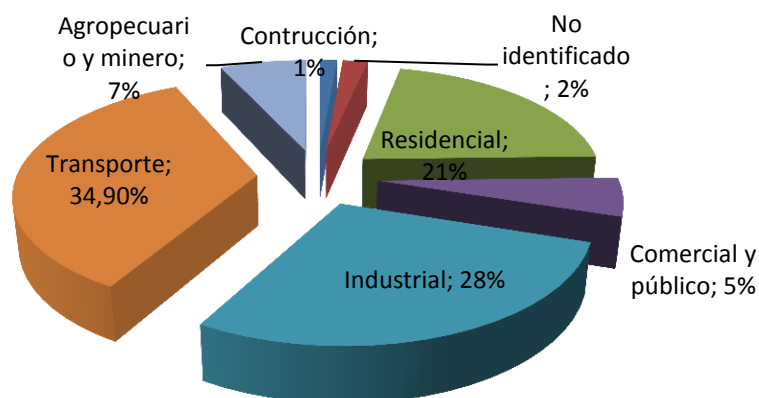
⁶ Toda aquella forma de energía obtenida directamente de la naturaleza antes de ser transformadas o convertida.

sector de la minería y la petrolífera no hace parte del sector primario si no del sector industrial y específicamente del sector industrial extractivo.

- Sector secundario (Industria): Son todas aquellas actividades relacionadas con la transformación industrial de alimentos, bienes o mercancías, elementos que son la fuente primaria para la elaboración de productos nuevos.
- Sector Terciario (Servicios): No producen una mercancía, pero son de una gran importancia en la economía de las naciones (Transporte, servicios financieros, hoteles, comunicaciones, educación, etc).

En el año 2009 el país produjo 100 Mtoe (1000268 Tcal). En la figura 2-4 se observa la distribución del consumo de la energía en los diferentes sectores económicos del país.

Figura 2-4: Consumo Final de energía por sectores.



Fuente: [22]

Entre los sectores de la actividad económica los que tienen un mayor consumo es el sector del transporte con un consumo de 349000 Tcal, sector que en el futuro presentara las mayores problemáticas debido a la alta dependencia del petróleo. Los carburantes que provienen del petróleo, se estima que el 98% [23] de estos se emplean en el transporte aspecto que no presenta una gran desventaja por que las mayores reservas en el mundo se encuentran en país de un alto índice de conflictos internos y además de las escasas reservas que cuenta el planeta, elementos que afectan las economías de muchas naciones incluido el nuestro. Por tal motivo los países han comenzado a implementar y trabajar con otras fuentes de energía no convencionales apropiada para cada uno, lo cual permitirá diversificar la canasta energética de cada país.

2.2 Fuentes de energía.

Las naciones industrializadas actuales demandan y utilizan grandes cantidades de energía, empleadas para hacer funcionar los equipos industriales, transporte de personas y mercancías, generar iluminación, sistemas de calefacción; etc; estas aplicaciones de la

energía en los diferentes sectores económicos hacen que el consumo siga aumentando. A finales del siglo XX e inicios del siglo XIX, el desarrollo en las denominadas economías emergentes (China, India, México, Brasil, Rusia) hizo pronosticar un incremento sostenido en la demanda mundial. Se estima que para el año 2040 la demanda de energía será de unos 20664 Mtoe [4], es decir, la demanda crecerá en un 61% a nivel mundial, es por esto que las naciones buscan identificar, aplicar y desarrollar nuevas fuentes de energía.

Las fuentes de energía se clasifican en fuentes de energía primaria y en fuentes de energía secundaria⁷. En el primer tipo de fuente se encuentran la energía nuclear, los combustibles fósiles y las energías renovables. Los países con mayor producción de energía primaria en 2010 fueron China, Estados Unidos, Rusia, Arabia Saudita e India, con participaciones de 17,3%, 13,5%, 10,1%, 4,2% y 4,1%, respectivamente [24]. Colombia produjo 105,5 Mtoe equivalente al 0,8% de la energía total producida en el mundo [3]. En el segundo tipo de fuentes de energía se encuentran la electricidad, todos los derivados del petróleo, el carbón mineral, y el gas manufacturado. Colombia consumió en energía secundaria 180343 Tcal en el año 2011 según cifras provisionales del balance de energía nacional [25].

El petróleo, sus derivados y el carbón, junto con algunas fuentes de biomasa, sus derivados, la solar, la eólica, la marítima, etc; - Fuentes de energía renovable - son las únicas fuentes de energía primarias, que pueden usarse directamente para obtener algún tipo de energía que puede emplearse en el transporte terrestre, marítimo o aéreo, en la calefacción del sector residencial, comercial e industrial o en procesos industriales químicos, térmicos [26]. Estas fuentes primarias a su vez sirven para la producción de fuentes de energía secundaria, en la actualidad se puede considerar la electricidad como la principal dentro de esta fuente mencionada.

En la actualidad la principal fuente del sistema energético de todas las naciones del mundo es el petróleo, la madera, el carbón y el gas. (Tabla 2-1), se puede observar datos obtenidos del año 2012 de las reservas mundiales y producción, además se presentan datos para Colombia de algunos de las fuentes de mayor consumo en el mundo.

Estos energéticos han concebido grandes problemas de tipo ambiental, debido a la generación de gran cantidad de CO₂ que diariamente se aporta a la atmósfera, condición que esta afectando el cambio climático del planeta, además de otros gases como son vapor de agua (H₂O), el metano (CH₄), óxido de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), clorofluorocarbonos (CFC), hidrofurocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF₆) siendo los tres últimos los gases más perjudiciales para el

⁷ Se denomina energía secundaria a los productos resultantes de las transformaciones o elaboración de recursos energéticos naturales (Primarios).

cambio climático del planeta, que como ventaja su producción anual no es alta comparándola con las emisiones obtenidas de CO₂ equivalente a 32 Gt/año, se estima que de esta producción, el 58% proviene de la utilización de las fuentes de energía primaria. Otra causa que contribuye con el problema ambiental es la deforestación que se hace en muchos lugares del mundo condición que se da por la obtención de fuentes de energía y por obtener tierras cultivables en zonas forestadas. El área deforestada en Colombia en 2011 (72531 ha), y en el 2012 (89931 ha), es decir, que en Colombia aumento la deforestación en un 24% [27].

Tabla 2-1: Reservas y Producción de fuentes primarias al 2012

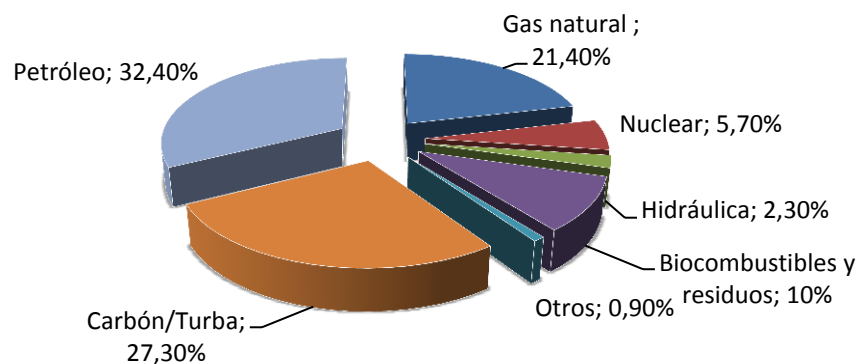
Región	Fuente Primaria					
	Petróleo		Gas Natural		Carbón	
	Reservas Mil millones de barriles	Producción Miles de barriles al día	Reservas Billones de m ³	Producción Billones de m ³	Reservas Millones de Toneladas	Producción Mtoe
Mundial	1668,9	86152	187,3	3363,9	860938	3845,3
Colombia	2,2	944	0,2	12	6746	58

Fuente: [28]

Como consecuencia de estos factores se afecta la salud de las poblaciones, un aumento paulatino en la temperatura del planeta y en general toda la biodiversidad del planeta está afectada.

En promedio el 81,1% de la energía consumida actualmente en el mundo se provee de los combustibles fósiles, es decir, 32,4% es aportada por el petróleo, el 27,3% por carbón y el 21,4% lo aporta el gas natural, solamente en la actualidad 19,9% es generada por otros tipos de fuentes primarias. En la figura 2-5 se puede apreciar la distribución porcentual de las fuentes de energía primaria en el mundo.

Figura 2-5: Distribución porcentual de las fuentes primarias en el mundo.

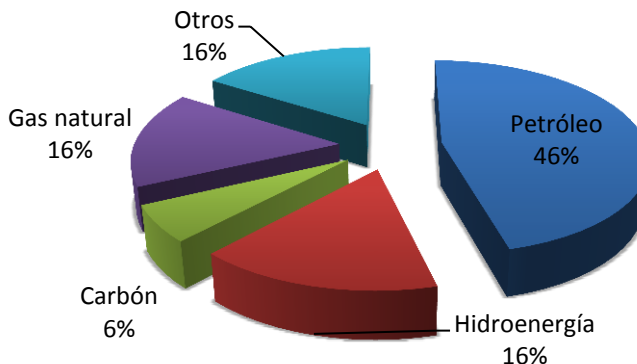


Fuente: [3].

Para el caso de Colombia la distribución porcentual de las fuentes primarias se puede ver en la figura 2-6. En la cual se observa que los combustibles fósiles son equivalentes al 68% del total de la producción. Para el país la hidroenergía tiene un 16%, aspecto que

tiene una igual cifra con el gas natural; esto debido a que nuestro país cuenta en promedio con unos altos índices de pluviosidad al año por estar en un sector tropical.

Figura 2-6: Distribución porcentual de las fuentes primarias en Colombia.



Fuente: [22].

Otras de las fuentes primarias que se emplean actualmente son las energías renovables que como puntos importante son fuentes que generan poca o casi ninguna emisión de CO₂ y otros gases a la atmosfera que contribuyan con el fenómeno de efecto invernadero; estos son una alternativa de energía más limpia de las que actualmente se conocen; además sirven como un medio para el desarrollo de la economía e industria de los países en los cuales se implementa, también promueve un aumento en personal calificado y puestos de trabajo debido a su implementación y demanda de los lugares en el cual se instala [29]. Los aspectos anteriormente mencionados son de gran interés en la mayoría de los países del mundo pero en especial las naciones industrializadas son los que realizan e investigan en este tipo de energías que como ventaja no genera dependencia de otras naciones en el abastecimiento de alguna fuente de energía, ya que estas se generar a partir de los recursos con los que cuenta cada nación, otra ventaja que se tienen es que sus residuos son de fácil tratamiento, son inagotables ya que se renuevan de manera indirecta o directa de la luz irradiada por el sol. Pero dentro de los inconvenientes que tiene son la cantidad de energía obtenida no siempre es la misma, esto hace que no se pueda garantizar el abastecimiento lo que implica que debe de ser complementada con otro tipo de energía, para obtener una cantidad de energía apreciable, se necesita de grandes extensiones de terrenos para obtenerla y por ultimo algunas generan impactos visuales altos con su entorno. Entre las energías renovables encontramos la eólica, mareomotriz, geotérmica, hidráulica, solar, undimotriz u olamotriz, la biomasa y los biocombustibles [30].

Por las razones antes mencionadas su uso se está difundiendo muy rápidamente; se estima que del suministro de energía mundial en el año 2011, el 16% provenía de fuentes renovable y de los 21964 TWh de energía eléctrica producida de este mismo año entre el 19% y el 20% se obtuvo a partir de estas fuentes renovables (4436,7 TWh). Dentro de las estructura de la producción de la electricidad con fuentes de energía renovable se tiene

que la fuente geotérmica aportó el 1,6%, la eólica 10,3%, la biomasa con el 6,2%, la solar con el 1,4%, la undimotriz con 0,01% la hidráulica con el 80,5%, esta última fuente presenta el mayor porcentaje de producción de la electricidad del mundo. Para el mismo periodo en Colombia el 80% (49,3 TWh) de la energía se generó por medio de fuentes renovables. Las fuentes que proporcionan la cantidad antes mencionada son la energía eólica 39 GWh, la biomasa 640 GWh y la hidráulica 48,6 TWh. Esta última representa el 98,6% de la electricidad en el país. Según datos de la red de políticas de energía renovables del siglo 21 (REN21), se estima que entre el año 2001 hasta el año 2011 en Colombia las energía renovables han crecido en un 52,6% [28].

El gobierno nacional tiene un alto interés con la implementación de políticas que incentiven el empleo, desarrollo y generación de tecnologías y procesos alternativos de obtención de energía a partir de fuentes renovables aspecto que permitiría cumplir con los compromisos que Colombia tiene con el protocolo de Kyoto; como a su vez contribuir en la solución de la dificultad de la demanda energética mundial y en la ayuda de contribuir a tener un medio ambiente mucho más limpio. Dentro de los objetivos que el gobierno nacional plantea son: Construir propuestas sobre mecanismos de incentivos, análisis y mercadeo a largo plazo del empleo de fuentes no convencionales de energía (Biocombustibles, gas a líquidos (GTL), entre otros), concretar una normatividad para el desarrollo del uso racional de energía (URE), plantear un plan estratégico de uso racional y fuentes no convencionales de energía acordado con diferentes sectores de demanda y oferta, establecer y renovar los planes energéticos nacionales; promover el uso de las fuentes energéticas con mayores, potenciales en el país [31].

Dentro de las fuentes con mayor potencial en el país que se cuenta actualmente según la unidad de planeación minero energética (UPME), es la energía solar con un estimado de promedio de 6 KW/m² en la zona costera norte del país, la energía mareomotriz posee un potencial de 30 GW en los 3000 Km de costas, la geotérmica con instalaciones que tendrían una capacidad de generación estimada de 1000 MW en zonas como los volcanes de Chiles-Cerro negro, el volcán de Azufra, el parque nacional de los nevados y las áreas de Paipa, la energía eólica con zonas de vientos de 10 m/s, a una altura de 60 m, en las zona norte del país (Guajira) y finalmente con la energía obtenida de la biomasa con un promedio de 1,5 millones de toneladas de bagazo de la caña de azúcar, con cascarilla de arroz, cultivo y transformación de productos para la obtención de biocombustibles (Etanol o biodiesel⁸). Según un estudio de la Federación Colombiana de Biocombustibles la producción en el 2011 es 405654 toneladas al año (t/año) y para este año se emplearon 137085 miles de barriles por día calendario (KBDC) [32].

⁸1 litro de diesel pesa 850 g.

2.2.1 La biomasa

Es la materia orgánica obtenida mediante un proceso biológico, de forma indirecta o inducida, utilizable como fuente de energía. La vegetación (Plantas) procesa la energía solar y la transforma en energía química a través de la fotosíntesis; es decir, la energía química se transforma y almacena en material orgánico (Biomasa) [33]. Un aspecto importante es que la energía contenida en el material orgánico, se puede recuperar por combustión directa o de forma indirecta aplicando algún proceso que permita su transformación en otros combustibles tales los gases de la gasificación o de la digestión anaeróbica, alcoholes, ésteres, y los biocombustibles. La biomasa es la fuente de energía renovable más antigua empleada por el hombre.

Actualmente se utiliza como biomasa los bosques (Madera, follaje), los residuos agrícolas (Cascarilla de cereales, estiércol, etc), los cultivos energéticos. Este último tiene un gran cuestionamiento debido a la competencia que se tendría entre el empleo como producción de alimentos o con fines energéticos; en general cada uno de las biomásas mencionadas anteriormente poseen unos grandes cuestionamientos para su empleo como material para la obtención de energía. Entre las ventajas que se plantean de los cultivos energéticos se tienen:

- Las ventajas medio ambientales.

Los depósitos incontrolados de los residuos orgánicos generados por los procesos domésticos, industriales, así como los agrícolas y los ganaderos. Esto a su vez, previene incendios, plagas, agentes patógenos, etc; pero de los más importantes es que la producción de biomasa por medio de estos cultivos, ayudan con la reducción en la concentración del CO₂, debido a que los productos vegetales producidos son consumidores del este gas lo cual cierra el ciclo de producción y consumo.

- Las ventajas sociales.

El sector agrícola de los cultivos energéticos contribuye en las poblaciones rurales con la generación de empleo ya sea de tipo directo o indirecto y a su vez una fuente de creación de industrias que proveen tareas auxiliares que requiere el sector; además permite la fijación de la población rural por la mejora de condiciones de vida brindada por los puestos de trabajo.

- Las ventajas estratégicas

En las zonas donde se dispone de biomasa un aspecto a resaltar es que genera una disminución en la dependencia de la energía de las líneas centrales de conexión eléctrica; disminuyendo los costos por traslado e implementación de tecnología compleja.

- Las ventajas económicas.

En este aspecto existe una gran oportunidad de negocio debido a la fabricación, mantenimiento y mejoramiento de tecnologías para el aprovechamiento o requerimiento en el proceso de la biomasa. Los pobladores de los lugares cercanos disponen de

puestos que trabajos que permiten una tranquilidad económica como de unos ingresos fiscales por cada trabajador que recibirán los municipios condición que permitirá realizar inversión en el desarrollo de la infraestructura aspecto que a su vez redundará en la calidad de las condiciones de vida de la población

Con respecto a las desventajas se tienen:

- Agricultores con gran experiencia y una incertidumbre en el suministro del producto por condiciones del clima.

La biomasa por ser una fuente de energía se debe garantizar el suministro de esta para su procesamiento y obtención de energía; aspecto que tiene algunas incertidumbres tales como la influencia que tiene el clima en la productividad del cultivo haciendo que la siembra se convierta en algunos casos en estacional lo que redundará en los costos de producción y almacenamiento alterando el mercado impulsado por el alza en los precios del producto; otra de las incertidumbres es la habilidad y experticia que el agricultor debe poseer para obtener la mayor eficacia y eficiencia de los recursos con los cuales cuenta.

- Requiere grandes extensiones y elevado costo de obtención:

Una condición importante es que para obtener una alta productividad en todo los periodos de demanda se deben realizar la siembra de una forma dispersa condición que requiere de la utilización de grandes extensiones de tierras que tienen dos factores uno la destrucción de zonas de vegetación nativa de las regiones generando unos desastres de tipo ecológico y dos los altos costos en la obtención del producto debido a la recolección, acondicionamiento, transporte y almacenamiento así como de características fisicoquímicas de la biomasa tales como la húmeda del material, una baja densidad energética.

Un aspecto de gran importancia es la clasificación de los cultivos energéticos; estos se pueden clasificar de muchas formas, como por ejemplo por el tipo de producto que se cosecha, por el suelo donde crecen, otra sería según el aprovechamiento final, etc. Basados en esta última clasificación los cultivos se pueden clasificar en:

- Cultivos lignocelulósicos, para la generación de biomasa sólida susceptible de su uso para distintas aplicaciones:
 - Térmicas, como climatización de aplicaciones de tipo industrial y tipo residencial en la calefacción de edificaciones y agua caliente sanitaria.
 - Fabricación de combustibles, esta condición le permite una recuperación de la biomasa bruta, obteniendo pellets.
 - Cogeneración asociada a actividades de nivel industrial, o la generación de eléctrica.
 - Producción de biocombustibles de segunda generación.
- Cultivos alcoholígenos: Son cultivos destinados principal a la producción de bioetanol (Alcohol etílico) que se empleara principalmente como carburante para el transporte (Mezclado o solo con gasolina). El bioetanol se elabora por la fermentación de la glucosa contenida en productos con una gran cantidad de azúcar algunos de los productos vegetales que se emplean actualmente son la

caña de azúcar, la remolacha azucarera, semillas o cultivos con una rica cantidad de almidón dentro de ellos encontramos el trigo la cebada y el sorgo, etc.

- Cultivos oleaginosos son aquellos que tienen un elevado porcentaje de aceite ya se en sus semillas o en los frutos obtenidos. Un aspecto importante es que se pueden emplear como aceites comestibles o para transformarlos en biodiésel [34]. (Tabla 2-2), se puede observar el porcentaje de aceite obtenido de algunas de las plantas o semillas oleaginosas que se emplean.

Tabla 2-2: Porcentaje de aceite obtenido de plantas o semillas oleaginosas

Producto/Semilla	Contenido de Aceite %	Rendimiento Promedio (kg/ha/año)
Ajonjolí	47 – 50	600 a 800
Elais Guineensis (Palma aceitera)	44 – 57	5000
Algodón	18 – 25	200
Girasol	45 – 55	600 – 950
Soja	18 - 20	280 – 580
Copra (Pulpa seca del Coco)	59%	100 – 800

Fuente. [35].

Para el caso en específico de Colombia para conseguir el material oleaginoso se emplean cuatro cultivos. El primero es la soya o soja como característica es una planta de un ciclo en promedio de 110 y 140 días la planta se encuentra totalmente madura para su proceso. En el país se cultiva en el Cauca, Meta y Tolima principalmente; el segundo es el ajonjolí estas se clasifican su periodo de maduración esta entre los 70 y 90 días. Las regiones de cultivo son Sucre Córdoba, Bolívar, Tolima, Magdalena, Cundinamarca, Huila, Antioquia y Boyacá. La tercera es la Palma de aceite es la de mayor importancia actualmente por los márgenes de productividad que se obtienen, es un cultivo de ciclo largo con un promedio de tres años; además en el país se está realizando un gran apoyo a este tipo de cultivo. Finalmente la última especie es el algodón cultivo de ciclo largo; en el país se planta en Caldas, Meta, Cundinamarca, Huila, Valle del cauca y la Costa Atlántica [36].

2.3 El biodiesel

El biodiésel es un combustible líquido que se encuentra categorizado como un biocombustible renovable derivado de aceites vegetales que son obtenidos de los cultivos oleaginosos, grasas animales o aceites usados de cocina [3]. La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) especifica al biodiésel como “ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de insumos grasos renovables, como los aceites vegetales o grasas animales” [35]. El vocablo bio hace referencia a su parte biológica y renovable; mientras que diésel se relaciona al empleo en motores de combustión.

El biodiésel tiene las mismas propiedades del combustible diesel empleado como carburante para vehículos de transporte pesado y liviano; se puede utilizar ya sea en forma pura designándolo B100 o mezclado con diésel obtenido del petróleo designándolo BXX [37]. La XX establece el porcentaje de mezcla en el diesel; actualmente en el país se tiene B10 que define un 10% de biodiesel y un 90% de diesel. Pero según el tratado de Kyoto todos los países firmantes de este acuerdo tiene como meta establecer una mezcla de B20 al 2020; aspecto que ha dado una gran aplicación en los motores diesel, también debido a que para el empleo de este combustible no se requieren modificaciones en los diseños de los motores y por último el uso de este en un motor reduce substancialmente en monóxidos de carbono, hidrocarburos no quemados, y partículas pesadas comparado con las emisiones obtenidas del diesel.

En cuanto a algunas características como la toxicidad y el punto de la inflamabilidad, es más seguro que el diesel obtenido de los combustibles fósiles, además por su condición de biodegradabilidad no es perjudicial para el ambiente; debido a que el biocombustible está formado por cadenas hidrocarbonadas que forman esterres con dos átomos de oxígeno, factor que permite que la molécula del compuesto se rompe en otras mas sencillas [38] [39]. Otro de los elementos a resalta es el factor de la lubricidad se mejora al adicionar biodiesel al diesel convencional, ya que esta aumenta la vida de los motores debido a un mayor factor lubricidad, además la potencia, el torque y la auto ignición en el motor continúan intactas. Otras ventajas y desventajas que posee el biodiesel frente al diesel fósil se pueden observar (Tabla 2-3).

Tabla 2-3: Ventajas y desventajas del biodiesel

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Producido en el país de fuentes renovables no derivadas del petróleo. ▪ Menos contaminantes de aire (Que no sean óxidos de nitrógeno) y gases de efecto invernadero ▪ Su manipulación es más segura ya que posee un punto de inflamación 100 °C mayor. ▪ Incrementa la combustión de los motores diésel, reduciendo la formación de ceniza. ▪ El biodiesel se degrada de 4 a 5 veces más rápido que el diésel fósil. ▪ Puede ser usado en la mayoría de los motores diesel, especialmente en los nuevos diseños. ▪ No es tóxico. ▪ No contiene azufre, por lo que no genera SO₂. ▪ El dióxido de carbono generado durante la combustión del biodiesel es 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Su costo es todavía no tan competitivo frente al diésel convencional. ▪ En las propiedades técnicas, posee menor poder calorífico, aspecto que no afecta la pérdida de potencia ni un incremento significativo de consumo. ▪ Posee una menor estabilidad a la oxidación, aspecto que es importante para el proceso de almacenamiento; es decir (Vida útil/tiempo de almacenamiento) es inferior a seis meses) ▪ Tiene unas bajas propiedades en frío, condición que lo hace inadecuado a temperaturas muy bajas. Aunque estas dos últimas características se pueden corregir adicionando un aditivo. ▪ El biodiésel con una baja calidad (Bajo número de cetano) logra acrecentar las emisiones de NOx, pero si el número de cetano es > 68, las emisiones de

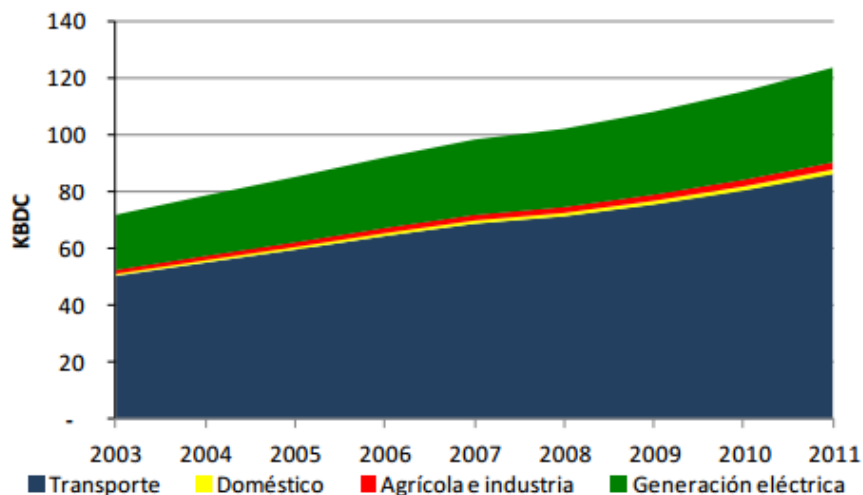
Ventajas	Desventajas
<p>totalmente reabsorbido por las plantas.</p> <ul style="list-style-type: none"> Se logra elaborar a partir de materia prima local, como cultivos oleaginosos o aceites vegetales reciclados, favoreciendo a reducir la dependencia de importaciones de petróleo 	<p>NOx serían iguales o menores que las provenientes del diesel fósil.</p>

Fuente. Autor.

2.4 Demanda del biodiesel en Colombia

La utilización de los biocombustibles está asociado con el sector transporte, pues satisface a la conducta del consumo de gasolina y diesel del país, donde la participación del sector transporte en el consumo total de gasolina es del 92%, mientras que ACPM tiene una participación del 70%. Se tiene que para el primer producto sus ventas están en promedio en 80413 Miles de barriles por día calendario (KBDC). Para el caso del diesel se tiene unos volúmenes de venta de 123944 KBDC, obteniendo un porcentaje de crecimiento de mediados del 7% [32]. En la figura 2-7 se puede observar la participación de los sectores que utilizan biodiesel en el país.

Figura 2-7: Utilización por sectores de diesel en Colombia.



Fuente. [32].

Como se puede observar en la gráfica la demanda del diesel ha tenido unos incrementos significativos año a año, este crecimiento ha sido por las políticas que el gobierno nacional generó frente a los precios de los combustibles; condición a que ha generado un aumento gradual en los precios de la gasolina factor que en contraposición a creado una disminución en el consumo; pero que favoreció a la demanda del diesel, otro aspecto es la lenta reducción de los subsidios del biodiesel en comparación con los subsidios a la gasolina.

Para cubrir la demanda de diesel en el país en el 2010, se debió realizar la importación de 47474 KBDC; aspecto que se da por la falta en la capacidad instalada de la producción de las refinarias según proyecciones entre el año 2011 al 2021 se provee un aumento anual del 3,6% siguiendo con un gran consumo en los sectores del transporte, autogeneración de energía eléctrica industrial y un aumento en la implementación en el uso en zonas no interconectadas. Estos factores el gobierno lo está resolviendo basado en dos grandes aspectos: uno en el aumento de la capacidad instaladas en la refinarias existentes y dos en la generación de políticas que permitan la producción de biodiesel.

(Tabla 2-4), se puede apreciar el marco normativo más significativo que se ha planteado como incentivo en la generación e implementación del biodiesel en Colombia.

Tabla 2-4: Marco normativo para el biodiesel en Colombia.

LEGISLACION Y DIRECTICES DE POLITICA	
Ley 693 2001	Marco criterios para la diversificación de la canasta energética a través de los biocombustibles
Ley 939 / 2004	Marco de incentivos para la producción
CONPES de biocombustible	Documento 35 - 10/07: Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia
NORMATIVIDAD TÉCNICA	
Decreto 2629 de 2007	Promoción del uso de biocombustibles
Resolución 18214/2007	Registro de productores y/o importadores de biocombustibles para uso en motores diesel
NTC 1438	Petróleo y sus derivados. Combustibles para motores diesel (B5)
NTC 5444	Biodiesel para uso en motores diésel especiales
NORMATIVIDAD ECONOMICA	
Decreto 2594 / 2007	Establece un fondo de capital de riesgo para apoyar iniciativas productivas, entre ellas los proyectos biocombustibles
Decreto 4051 / 2007	Zonas francas permanentes
Resolución 182185/2007	Establece disposiciones relacionadas con la estructura de precios del ACPM (Diesel) y de la mezcla del mismo con el biocombustible para uso en motores diesel
Resolución 180134 / 2009	Por la cual se modifica la resolución 182185 de Diciembre de 2007, en relación con la estructura de precios del ACPM mezclado con biocombustibles para combustibles en motores diesel
NORMATIVIDAD AMBIENTAL	
Ley 1083 / 2006	Establece normas sobre planeación urbana sostenible
Resolución 180158 / 2007	Por la cual se determinan los combustibles limpios de conformidad con la consagrado en el parágrafo del Artículo 1° de la ley 1083 de 2006

Fuente:[40].

Tomando en cuenta la normatividad y la demanda del país. (Tabla 2-5) se plantea la demanda de biodiesel para cada una de las mezclas vislumbradas para Colombia.

Tabla 2-5: Proyección de la demanda según los porcentajes de biodiesel planteados para Colombia⁹

Año	Demanda KBDC	Importaciones KBDC	% Biodiesel			
			5	10	20	30
2011	123944	47474	8571	17142	34284	51425
2012	130972	49183	9008	18016	36031	54047
2013	137085	50954	9402	18804	37608	56412
2014	142168	52788	9748	19496	38991	58487
2015	147497	54688	10109	20219	40437	60656
2016	152414	56657	10454	20907	41814	62721
2017	156957	58697	10783	21565	43131	64696
2018	161637	60810	11122	22245	44489	66734
2019	166305	62999	11465	22930	45861	68791
2020	171205	65267	11824	23647	47294	70942
2021	176167	67617	12189	24378	48757	73135

Fuente. Autor.

Según los datos planteados (Tabla 2-5), los porcentajes de biodiesel que se emplean para reducir el empleo de diesel fósil; solo se alivia en la reducción de las importaciones cuando se logren obtener mezclas en un porcentaje del 30% en la composición aspecto que tardara varios años e investigaciones y desarrollos para que los equipos y biocombustible tengan rendimientos eficientes.

2.5 Materias primas para el biodiesel

Dentro de las materias primas que se emplean como insumo para la obtención del biocombustible se requieren de aceites o grasas, un alcohol y un catalizador para poder convertir los triglicéridos del aceite en ésteres alquílicos [41].

Esta parte del documento trata sobre cada uno de los insumos y proceso que se (Aceite o grasas, alcoholes y catalizadores), que se requieren para la producción del biodiesel teniendo en cuentas sus características de importancia para el proceso; además se mencionan algunas de las tecnologías que se emplean en la fabricación.

2.5.1 Aceites y grasas

Los principales componentes de los aceites y las grasas son los triglicéridos o también conocidos como ésteres de ácidos grasos unidos a un glicerol. Generalmente los triglicéridos costan de una mol de glicerol y tres mol de ácidos grasos (AG) que por lo general son diferentes. La glicerina tiene tres grupos OH razón por el cual puede estar de

⁹ Las cifras mencionadas en esta proyección no contemplan las futuras ampliaciones de las capacidades de las refinerías de Cartagena y Barrancabermeja.

forma mono, di o triesterificada por los ácidos grasos. Cuando los tres ácidos grasos son iguales en el triglicérido se define como triglicérido simple pero cuando los AG son diferentes se define como triglicérido compuesto; para el caso de los AG estos pueden variar en la longitud de la cadena de carbonos e hidrógenos y el número de enlaces saturados e insaturados (Dobles enlaces). (Tabla 2-6), se puede ver los porcentajes en peso (%p/p) de algunos de los insumos que se pueden emplear para obtener el biocombustible.

Tabla 2-6: Composición %wt de ácidos grasos de diferentes aceites y grasas.

Aceite Ó Grasa	Ácidos Grasos							Referencia
	Láurico (C12:0)	Mirístico (C14:0)	Palmitico (C16:0)	Esteárico (C18:0)	Oleico (C18:1)	Linoleico (C18:2)	Linolénico (C18:3)	
Soja	-	0,1	12,2	2,5	21,5	56,6	7,1	[42]
Algodón	0,1	0,7	20,1	2,6	19,2	55,2	0,6	[43]
Aceite de Palma	0,1	1,0	42,8	4,5	40,5	10,1	0,2	
Manteca de Cerdo	0,1	1,4	23,6	14,2	44,2	10,7	0,4	
Sebo	0,1	0,8	23,3	19,4	42,4	10,7	2,2	
Aceite de Coco	46,5	19,2	9,8	3,0	6,9	2,2	-	[39]
Aceite de fritura	-	-	8,5	3,1	21,3	55,2	5,9	

Fuente: Autor.

Las principales fuentes de obtención de la materia prima (Aceites y grasas) que se requiere para producir el biodiesel generalmente son dos. Uno de ellos son los cultivos oleaginosos y dos los tejidos adiposos o tejidos grasos de animales. Sin embargo un material que presente triglicéridos en su composición puede emplearse para la utilización de producir biodiesel [44] algunos de estos materiales son el AUF, aceites obtenidos de algas, grasas provenientes de tratamientos de aguas, etc. (Tabla 2-7) se mencionan los aceites y grasas que se emplean en la producción del biodiesel.

Tabla 2-7: Aceites y grasas utilizados para obtener biodiesel.

Aceites vegetales		
Convencionales		Alternativos
Aceite de Colza	Aceite de ajonjolí	Aceite de Crambe abyssinica
Aceite de algodón	Aceite de soja	Aceite de Cynara cundunculus
Aceite de coco	Aceite de higuera	Aceite de Jatropha curcas
Aceite de girasol	Aceite de oliva	Aceite de Pogianus
Aceite de palma	Aceite de Maíz	Aceite de Brassica carint
		Aceite de Camelina sativa
Aceite de semillas alteradas genéticamente		
Aceite de Girasol de alto oleico		
Grasas animales		
Sebo de búfalo		Sebo de vaca
Sebo de Cerdo		
Grasa de pescado		Grasa de Pollo
Aceites usados de fritura		
Aceites de otras fuentes		
Aceites de microalgas		Aceite de producciones microbianas

Fuente: Autor

Como se ha mencionado anteriormente las fuentes de obtención de aceites en el país están centradas en cuatro especies que generan aceites vegetales. Estas especies son el algodón, soja, ajonjolí y el aceite de palma. Este último presenta los mayores volúmenes tanto en producción como en hectáreas cultivadas de sembradíos energéticos [45]. Sin embargo el uso comercial de los aceites refinados para la producción de biodiesel es poco rentable debido a los altos costos de la materia prima y la controversia que se tiene frente a que es un recurso alimenticio; pero existen otras fuentes que hasta el momento no se han considerado como el caso de aceites que tienen una calidad inferior tal es el caso de los AUF material que actualmente se desaprovecha en todo el territorio nacional así como en muchos lugares del mundo. Se generan unos volúmenes de producción en la actualidad de 154 millones de toneladas al año [39] que usualmente son obtenidas por el proceso de fritura de los alimentos; en el caso del país no se tiene un estimado actualizado de cuál es la producción de los aceites de fritura según un estudio de la UPME en el año 2001 se produjeron 1,2 millones de barriles al año; que de los cuales se recuperan para procesar 420000 barriles, es decir unos 540 barriles por día (BPD).

La recuperación de estos aceites podría reducir los problemas con la contaminación de las aguas y la acumulación de desechos en los drenajes de agua, la prohibición de los aceites como alimento de los animales domésticos porque durante el proceso de fritura se generan compuestos dañinos que con el tiempo entran dentro de la cadena alimenticia por el consumo de carne en los seres humanos causando problemas en la salud de las personas [46].

- Características de los aceites usados de fritura

Los AUF tienen un aspecto importante de mencionar, el mismo aceite se utiliza varias veces; ésta condición provoca cambios en la composición física y química del aceite por lo general estos cambios son un aumento en la viscosidad, en el calor específico, un cambio en la tensión superficial y por último un cambio en el color. (Tabla 2-8), se puede observar las propiedades físicas y químicas de una muestra de AUF.

Tabla 2-8: Propiedades fisicoquímicas de los aceites usados de fritura.

Parámetro	Valor	Unidades	Norma
Viscosidad Cinemática a 40 °C	40,2	cSt	EN ISO 3104
Densidad a 15°C	926	kg/m ³	EN ISO 12185
Punto de inflamación	286	°C	EN ISO 2719
Índice de Yodo	108	cg I ₂ /g aceite	EN 14111
Índice de saponificación	193,2	mg KOH/g aceite	AOCS CD3 1993
Valor ácido	1,7	mg KOH/g aceite	EN 14104
Contenido de agua	1200	mg/kg	EN ISO 12937

Contenido de azufre	6	mg/kg	EN ISO 20846
Carbón residual	0,18	% m/m	EN ISO 10370
Peso molecular	879	g/mol	

Fuente. [47]

Existen varios inconvenientes al utilizar AUF, para la generación de biodiesel, entre estos encontramos ácidos grasos libres (AGL), agua y otras impurezas sólidas. La calidad del AUF se mide con respecto a su índice de acidez y el índice saponificación. Un alto contenido de agua siempre conduce a la hidrólisis y un alto contenido de AGL conduce a la saponificación condiciones que disminuyen el rendimiento de la cantidad de biodiesel obtenido generalmente esta última condición es porque se supera el 3% de AGL aspecto que disminuye la reacción de transesterificación [48] [49]. Para corregir esto se realiza un pretratamiento del aceite antes de su uso.

2.5.2 Catalizadores

Como las reacciones de transesterificación son lentas al punto de no haber un cambio en la mezcla reaccionante a condiciones normales es necesario el uso de catalizadores. Estos catalizadores puede ser: homogéneos básicos y ácidos, enzimáticos o heterogéneos [50].

▪ Catalizadores básicos o alcalinos

A nivel industrial los catalizadores más usados son los básicos ya que permiten alcanzar velocidades de reacción altas y se puede operar la reacción bajo condiciones moderadas de presión y temperatura, no obstante para el caso en el que se usen como materias primas aceites reutilizados dado que poseen un contenido alto de agua y ácidos grasos libres se promueve la formación de jabones [10] siendo los catalizadores básicos homogéneos poco, ya que implican etapas posteriores de purificación a diferencia de los catalizadores enzimáticos y heterogéneos que no catalizan la producción de jabones, pero una condición importante es que no se tiene mucha información del empleo de este catalizar en el proceso de producción a nivel industrial con aceites usados.

▪ Catalizadores ácidos

La transesterificación usando ácidos como catalizadores es uno de los métodos convencionales para producir biodiesel. De este tipo de catalizadores, el ácido sulfúrico ha sido el más utilizado [51] como catalizador cuando se trabaja con aceites cuyo contenido de ácidos grasos es alto. A pesar de las ventajas de este catalizador se resalta que la reacción es bastante lenta.

▪ Catalizadores enzimáticos

Recientemente muchos investigadores han mostrado interés por el estudio de la transesterificación usando catalizadores enzimáticos [10], la ventaja del uso de este tipo de catalizadores es que son amigables con el medio ambiente, es decir la reacción se efectúa a temperaturas cercanas a 20 - 30 °C, se pueden reutilizar cuando las enzimas se inmovilizan sobre soportes, requieren menos procesos de purificación que con los

catalizadores básicos y la glicerina que se produce es limpia [52]. Por otro lado las desventajas técnicas del uso de enzimas es que las velocidades de reacción son bajas además que las enzimas sufren inactivación ante la presencia de glicerina y alcohol.

▪ Catalizadores Heterogéneos

Los catalizadores heterogéneos son aquellos que se encuentran en una fase diferente a la de los dos reactantes. Actualmente se han probado catalizadores heterogéneos cuya fase activa son: óxidos metálicos principalmente soportados sobre alúminas y silicatos [10].

La mayor de las ventajas de estos catalizadores es que se pueden reutilizar y a diferencia de las enzimas son más estables, es decir se pueden regenerar un mayor número de veces, mientras que por otro lado uno de los mayores problemas de estos catalizadores está asociado a la transferencia de masa debido a que forma una tercera fase distinta a la de los reactantes, como solución a este inconveniente algunos hexanos como co-solventes para promover la miscibilidad de las fases. En adición a esta dificultad también se suman los requerimientos de altas temperaturas y presiones [10] a las razones por las cuales este tipo de catalizadores no han podido ser implementados a nivel industrial.

2.5.3 Alcoholes

Los alcoholes más usados son metanol y etanol, aunque se pueden utilizar otros alcoholes de cadena larga como propanol, butanol, ISO-propanol sin embargo estos alcoholes son más costosos.

Entre metanol y etanol, el metanol es el más costoso, es difícil de manipular ya que requiere medidas de seguridad contra incendios y manipulación, y proviene de fuentes fósiles (A diferencia del etanol que se puede obtener a partir de fuentes renovables), sin embargo permite conversiones de equilibrio mayores debido a que favorece la formación del intermediario metóxido altamente activo [49], además los metil ésteres (Biodiesel del metanol) son menos viscosos que los provenientes del etanol facilitando la combustión en motores diesel principalmente en climas fríos [48]. Sin embargo el etanol presenta una gran ventaja porque es un derivado de fuentes renovables; este alcohol es más soluble en el aceite que el metanol. El etanol presenta un aumento en la transferencia de masa en la reacción de transesterificación. El biocombustible obtenido con etanol (Éster etílico de ácido graso, FAEE) tiene unos puntos menores de enturbiamiento que el biodiesel producido con metanol (Éster metílico de ácido graso, FAME) condición que permite un mayor aumento de almacenamiento del biodiesel [48] [49]. (Tabla 2-9), se realiza la comparación de las propiedades de los biodiesel obtenidos a etanol y metanol.

Tabla 2-9: Tabla de comparación de las propiedades de FAME y FAEE.

Propiedad de combustible	Unidades	Árbitro	FAME	FAEE
Densidad a 15 °C	kg/m ³	834	887	878

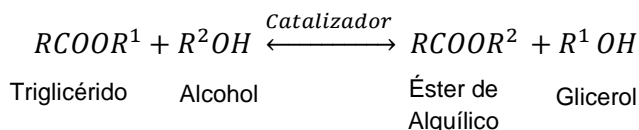
Propiedad de combustible	Unidades	Árbitro	FAME	FAEE
Viscosidad cinemática a 40 °C	cSt	2,7	5,16	4,9
Calorífico bruto	MJ/kg	45,5	39,7	39,5
Bajo valor calorífico	MJ/kg	42,5	36,6	36,8
Número ácido	mg de KOH/g	0,10	0,5	0,27
Carbono (C)	% p/p	86,1	76,9	77,4
Hidrogeno (H)	% p/p	13,9	12,1	12,2
Oxigeno (O)	% p/p	0	10,9	10,4
El contenido de azufre	ppm/peso.	34	0	0
Contenido de agua	ppm/peso.	57	466	420
Peso molecular		211,7	293,2	306,7
Índice de yodo		-	97,5	105,6

Fuente: [48].

2.6 Métodos de elaboración del biodiesel

La elaboración de biodiesel es por el método de la transesterificación; denominado también metanólisis o etanólisis, este nombre lo recibe en funcional del alcohol que se emplea como un reactivo en el proceso. En la figura 2-8 se muestra ecuación química de la reacción de transesterificación.

Figura 2-8: Ecuación química de la reacción de transesterificación.



Fuente: [53]

La transesterificación es el mejor método para la producción de biodiesel. La reacción se establece entre un aceite en presencia de un alcohol con catalizados o sin catalizador para producir biodiesel y glicerol. (Tabla 2-10) Se plantea un resumen comparativo de las características típicas del biodiesel y del diesel petrolífero.

Tabla 2-10: Comparación de las características del biodiesel Vs diesel Fósil

Datos físico - químicos	Biodiesel	Diesel
Composición combustible	Éster metílico ácidos grasos C ₁₂ - C ₂₂	Hidrocarburo C ₁₀ - C ₂₁
Poder calorífico inferior (kcal/kg (aprox))	9500	10800
Viscosidad cinemática (cst a 40°C)	3,5 - 5,0	3,0 - 4,5
Peso específico (g/cm ³)	0,875 - 0,900	0,850
Azufre (P), (% p/p)	0	0,2
Punto ebullición (°C)	190 - 340	180 - 335
Punto inflamación (°C)	120 - 170	60 - 80
Punto escurrimiento (°C)	-15/+16	-35/-15
Número cetano	48 - 60	46
Relación estequiometría aire/comb. (p/p)	13,8	15

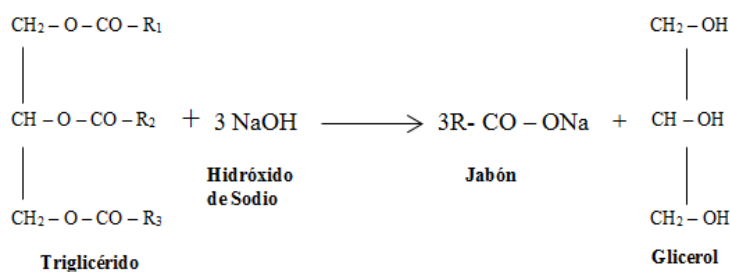
Fuente: [54]

Es decir que hay dos métodos de transesterificación una reacción sin catalizador y una reacción catalizada[43]. En esta reacción el glicerol (G) del triglicérido (TG) se sustituye con un alcohol de cadena corta [44]. El proceso comienza con tres reacciones consecutivas reversibles, los TG se transforman en diglicéridos (DG), monoglicéridos (MG) y los monoglicéridos se conforman en G; cada paso de la reacción genera un éster obteniéndose al final de la reacción tres moléculas de éster y una molécula de glicerol. La utilización de los catalizadores mejora el rendimiento de biodiesel, otro aspecto a considerar el exceso de alcohol desplaza el equilibrio de la reacción al lado del producto.[53] [55].

La transesterificación se puede catalizar con catalizadores homogéneos (Ácidos ó álcali), ó catalizadores heterogéneos (Ácidos ó álcali) ó catalizadores enzimáticos [29]. Aunque los catalizadores alcalinos son la opción más empleada a escala industrial, requiere de condiciones puntuales tales como que los glicéridos y el alcohol deben ser anhidros (<0,06 concentración porcentual en volumen (%v/v)) para evitar que se produzca la saponificación. Además, los triglicéridos deben poseer un baja porcentaje de AGL, para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen también jabones. Por lo cual la reacción de transesterificación tiene unas reacciones secundarias que se pueden dar simultáneamente. Estas reacciones son: la reacción de saponificación y la reacción de neutralización de ácidos grasos libres [23] [56].

En la figura 2-9, se observa la reacción de saponificación. En este proceso sucede que el triglicérido reacciona con el catalizador básico. El catalizador es consumido por el triglicérido, además la presencia de agua en la reacción, genera la formación de jabones (reacción de saponificación), y un subproducto como el glicerol esta reacción es de carácter irreversible y se da debido a que las compuesto de hidróxido de sodio (NaOH) ó hidróxido de potasio (KOH) contienen los grupos OH que reaccionan con el agua presente que a su vez son los responsables de la reacción [15].

Figura 2-9: Reacción de saponificación.

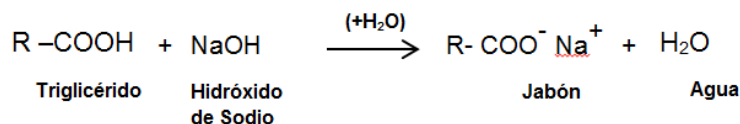


Fuente. [15]

Pero en general se deben manipular aceites y alcoholes esencialmente anhidros, es decir, sin contenido de humedad, debido que el agua ayuda la generación de jabones mediante la reacción de saponificación.

La reacción de neutralización tiene como función eliminar la concentración de AGL en el aceite. En la figura 2-10, se muestra la reacción de neutralización. En esta reacción los ácidos grasos presentes en el aceite vegetal pueden reaccionar con el catalizador básico (Fundamentalmente NaOH) en presencia de agua, ocurriendo asimismo una reacción indeseable, produciendo como en el caso anterior jabón.

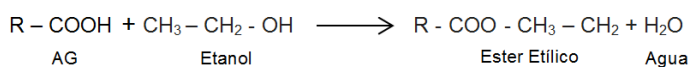
Figura 2-10: Reacción de neutralización.



Fuente: [13]

Otra forma de eliminar los ácidos grasos libres es por medio de una reacción de esterificación¹⁰; este proceso se combina con el proceso de transesterificación con el propósito de aprovechar los AUF y obtener la formación de éster metílicos o etílicos. El método consiste en mezclar un alcohol, ácido sulfúrico y aceite, generalmente se emplea el alcohol como reactivo en exceso, el cual aumenta el rendimiento y desplaza el equilibrio de la reacción hacia el producto (Esterificación de Fischer). Para este caso se emplea el ácido sulfúrico (H₂SO₄) que sirve como catalizador y como medio absorbente del agua (Sustancia higroscópica) que se produce en la reacción; en algunos casos es sustituido por el ácido fosfórico (H₃PO₄) [57]. En la figura 2-11, se puede apreciar la reacción de esterificación.

Figura 2-11: Reacción de esterificación.



Fuente.[13]

Pero el proceso de la esterificación tiene algunos inconvenientes tales como que el alcohol puede sufrir reacciones de esterificación con el H₂SO₄ o la formación de éter, en el caso del AG puede generarse una decarbonilación [38].

2.6.1 Variables que afectan el proceso de la transesterificación

La reacción de transesterificación se afecta por diferentes variables. Estas afectaciones trascienden en la calidad y rendimiento de biodiesel obtenido. Dentro de las variables que

¹⁰ Se define esterificación el proceso que sintetiza un éster. Un éster es un compuesto derivado formalmente de la reacción química entre un ácido carboxílico y un alcohol.

disminuyen la eficiencia de la reacción tenemos: la calidad de los reactivos, la calidad del aceite, es decir, el contenido de ácidos grasos libres y humedad presente, tipo y concentración catalizador, tiempo, temperatura y agitación de la reacción, finalmente la relación molar aceite-alcohol; la comprensión de la relación de las variables mencionadas anteriormente se encuentran relacionadas con el mecanismo de la reacción de transesterificación [12], esto permite identificar unas adecuadas condiciones de operación del proceso que redundaran en el aumento de la eficiencia y las características fisicoquímicas del biocombustible obtenido a partir de aceites de diversas procedencias.

- La calidad del aceite

La cantidad de AG y de agua son unos parámetros o factores importantes para el proceso de transesterificación del aceite. La reacción puede ser completa teniendo en cuenta que el valor de AGL debe ser < 3 %p/p, si la acidez es muy alta se tendrá una menor conversión a ésteres, así como si posee una presencia de humedad tendrá un menor rendimiento en la producción [58]. Le primer factor mencionado requiere el empleo de un catalizador para disminuir el número de acidez; pero tanto el exceso como la carencia del catalizador puede producir la formación de jabón; para el caso de la humedad (Agua) esta reaccionara con el catalizador y también puede formar jabones.

En la mayoría de los procesos de fabricación de biodiesel emplean aceites vegetales refinados un catalizador alcalino y un alcohol (Metanol). Sin embargo como se ha mencionado existen aceites con una calidad inferior (AUF), pero su problema radica en que contiene un elevado número de ácidos grasos que no pueden transformarse en biodiesel cuando se emplea un catalizador homogénea alcalino; por ello se necesita hacer el proceso en dos etapas; la primera etapa realizando una etapa de esterificación y la segunda seria la etapa de transesterificación. Para la primera fase se debe requiere de un alcohol (Generalmente etanol o metanol) con un catalizador homogéneo ácido (Ácido sulfúrico H_2SO_4 o ácido clorhídrico HCl) [49] esta reacción produce ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE) ó ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), después se procede a la segunda fase en el cual emplea un alcohol y un catalizador básico, para obtener los ésteres restantes.

- Concentración y tipo de catalizador

En los procesos de metanólisis o etanólisis alcalina los catalizadores más empleados son KOH y NaOH, juntos en concentraciones de 0,4 a 2 %v/v de aceite. Para los aceites, refinados como crudos, algunos investigadores han establecido que con 1% de catalizador (Tanto hidróxido sódico o potásico) los resultados son satisfactorios siempre y cuando se mantengan constantes los demás parámetros de la reacción. Para el AUF los catalizadores homogéneos ácidos son los pertinentes en la etapa de esterificación pero en la etapa de transesterificación la utilización de catalizadores básicos (NaOH) ha sido mencionada como un reactivo conveniente para el tratamiento de estos aceites, condición que permite menos temperatura y tiempo de reacción, pero con un inconveniente que tienden a propiciar una reacción de saponificación simultánea con el proceso de transesterificación.

En general cuando se utilizan los catalizadores básicos, se debe hacer hincapié en las condiciones de la reacción, primordialmente en la cantidad de catalizador básico y la temperatura, para disminuir al máximo la saponificación. Aunque el proceso de transesterificación, con catalizadores alcalinos, transforman los TG en ésteres metílicos o etílicos en un periodo de tiempo menor con una alta conversión, genera algunos particularidades: generalmente la recuperación del subproducto (Glicerol) presenta alguna dificultad, el catalizador debe ser retirado del producto final, el proceso genera agua alcalina la cual debe ser tratada, los AG y la humedad disminuyen la efectividad de la reacción. Sin embargo también como catalizador se puede emplear el metóxido, este tiene al grupo OH como impureza, aspecto que al emplearlo no genera fácilmente jabones por saponificación pero posee una gran desventaja ya que su utilización es altamente peligrosa.

Otros de los catalizadores de gran importancia en el proceso de obtener el biocombustible son los catalizadores ácidos, aspecto que se había mencionado anteriormente. Este tipo de catalizadores se empleado con buenos resultados en los aceites de baja calidad (AUF) en especial cuando tienen un valor >3 %p/p; como catalizador se han empleado el HCl y H_2SO_4 en diferentes concentraciones; según las investigaciones estable que el H_2SO_4 tienen una mayor actividad catalítica.

Otros catalizadores empleados son los enzimáticos. Estos pueden lograr resultados notables en soluciones tanto acuosos como no acuosos, lo que soluciona alguno de los problemas mencionados anterior; como aspecto importante el glicerol se puede retirar fácilmente y, también, los ácidos grasos contenidos en el aceite reutilizado se pueden convertir completamente en esteres alquílicos; pero tienen una desventaja es que tienen un alto costo en comparación con los catalizadores ácidos y básicos lo cual hace que su uso sea más limitado; algunos de los catalizadores enzimáticos que emplean en la actividad catalítica son las lipasas (enzimas extracelulares y enzimas intracelulares) [35]. En la actualidad se están tratando desarrollar procesos y catalizadores más económicos que permitan un excelente porcentaje en la conversión de esteres. (Tabla 2-11), se plantea un resumen de las ventajas y desventajas de diferentes vías catalíticas que se usan para el proceso de transesterificación.

Tabla 2-11: Ventajas y desventajas catalíticas para la transesterificación.

	Ventajas	Desventajas	Características de la transesterificación
Catálisis alcalina	Es la tecnología más utilizada comercialmente Condiciones moderadas de presión y temperatura. Se obtienen conversiones en tiempos de reacción de 60 min. Aproximadamente.	Requiere que el aceite y el alcohol sean anhidro y limitar el contenido de ácidos grasos libres en la alimentación para evitar la formación de jabones.	Cantidad apreciable de operaciones unitarias para la separación de los productos. Reacción en condiciones atmosféricas. Requiere catalizador alcalino.
Catálisis ácida	Se utiliza en la adecuación del aceite	Los tiempos de reacción son elevados,	Se utiliza como un proceso de pre-

	Ventajas	Desventajas	Características de la transesterificación
	(esterificación de ácidos grasos libres con metanol. Puede procesar materias primas con altos niveles de ácidos grasos libres (Grasas de animales y aceites usados).	por lo que no pueden ser procesos continuos	esterificación antes de realizar dicho proceso vía la catálisis alcalina. No requiere uso de catalizador ácido.
Catálisis de lipasas	La reacción no es afectada por la presencia de agua en las materias primas ni por contenido de ácidos grasos.	Los tiempos de reacción son elevados, por lo que no pueden ser procesos continuos.	Se usan solventes orgánicos como medio de reacción porque mejoran la reactividad y brindan la posibilidad de reutilización. El alcohol se adiciona por etapas, para evitar la inhibición.
Alcoholes supercríticos	Bajos tiempo de reacción. Se pueden procesar materias primas con altos contenidos de ácidos grasos libres y agua. No es necesaria la utilización de catalizador.	Altos costos debido a las condiciones de la reacción a altas temperaturas y presiones.	Se emplean temperaturas y presiones elevadas.

Fuente: [59]

- Temperatura y tiempo de reacción

Estos factores son de gran importancia ya que afectan el proceso de la transesterificación debido a que existe una alta relación entre la velocidad de transformación y el tiempo de reacción. A medida que la temperatura se incrementa, la velocidad y rendimiento de conversión de los TG en esteres alquilos también aumenta. [60]. Algunas investigaciones establecen que la temperatura que debe llevarse a cabo para el proceso de la alcoholólisis es de 55 °C [49]; pero otros establecen que la reacción de transesterificación debe estar por debajo de los puntos de ebullición del alcohol empleado; estas temperaturas se encuentran entre los 60 y 80 °C [49] [60]; no obstante existen desarrollos que han utilizado en sus procesos entre los 25 y 350 °C [44]. Sin embargo se debe resaltar que dependiendo del reactor a emplear la temperatura no deben ser tan altas para evitar una evaporación del alcohol, factor que puede ser un serio problema siempre que no se encuentre con un recipiente seguro frente a la hermeticidad y presión.

Con respecto al tiempo de la transesterificación, se plantea que a medida que incrementa este la conversión de los TG también incrementa [61], pero este la condición de este factor se encuentra directamente relacionado con el catalizador y/o reactor a emplear, debido a que puede tener una gran variación. Los valores que reportan algunas de las investigaciones se encuentran entre los rango de 5 min a 20 h. No obstante algunos productores permiten que el proceso tome un poco más de tiempo con el fin de garantizar una reacción completa, es importante establecer que un exceso de tiempo no produce ningún perjuicio al producto final. Pero si las condiciones no son las óptimas en

términos de temperatura, tiempo empleado, porcentaje de alcohol y cantidad de catalizador se pueden obtener productos parciales (MG y DG). Según un estudio realizado en el departamento de Caquetá Colombia de AUF con experimentación con siete tipos de catalizadores y variables tales como la proporción de catalizador 38:190 (%v/v), tiempo de reacción de 2 h y temperatura de 60 °C se lograron rendimientos de 87,5% de biodiesel con un contenido de 99,53% de FAME's [56].

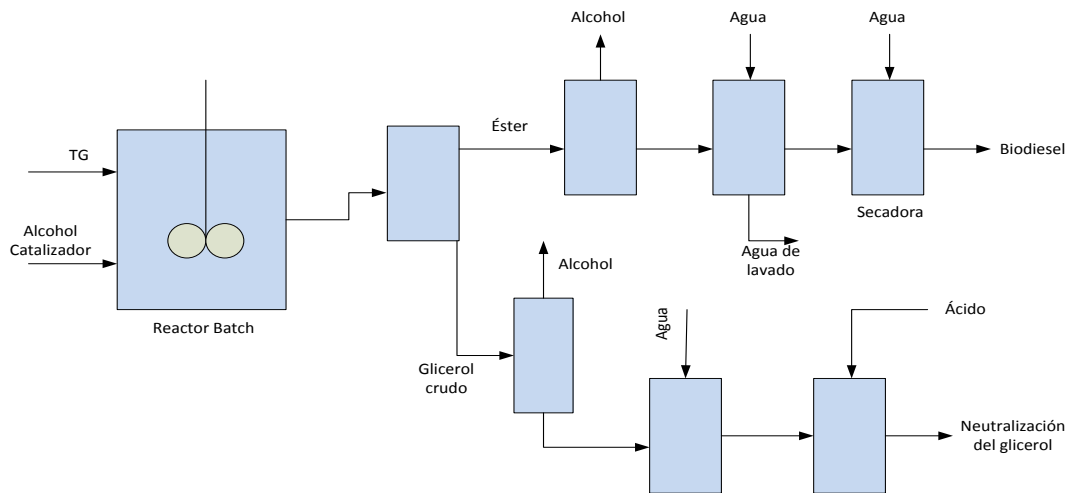
- Agitación

Es otra de las variables de importancia debido a que el aceite en ninguna proporción es capaz de formar una fase homogénea con el alcohol, es decir, el aceite tiene una muy baja solubilidad en el alcohol; por esto la agitación crean pequeñas partículas del alcohol que se dispersan en el interior del aceite obteniendo unas grandes áreas de contacto entre los dos fluidos permitiendo realizando la reacción sin límites por la transferencia de masa. Para el caso de la transesterificación se producen dos fases cuando se detiene la agitación consiguiendo en la parte inferior de la fase se encuentra el glicerol y en la parte superior se encuentra el biodiesel. Algunos reportes establecen que los rangos de velocidad de agitación para el proceso están entre 150 RPM y 1200 RPM. [60].

2.7 Tecnologías para la producción de biodiesel

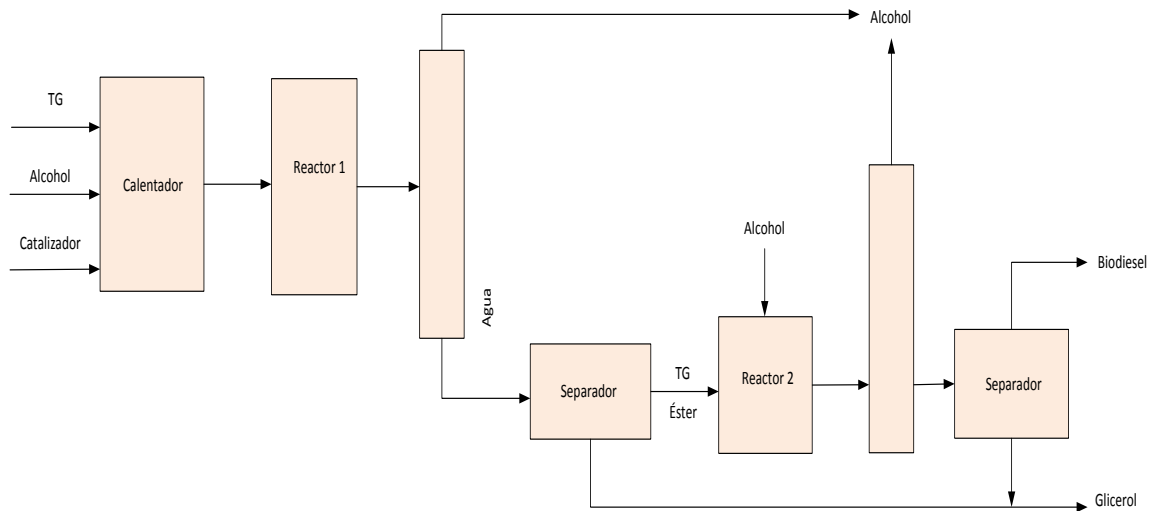
En la aplicación a nivel industrial de los procesos de producción de biodiesel, se tiene el proceso de transesterificación y el proceso de esterificación. Estos procesos se pueden obtener de manera discontinua ó batch (Lotes) ó de forma continua [62]. En general el sistema tipo batch son plantas que se utilizan para una menor capacidad de producción y diferentes calidades de materia prima generalmente utilizan un reactor grande con un agitador dentro de éste. La producción en forma discontinua emplea más tiempo de reacción y separación que el proceso de transesterificación continua debido a que todas las fases de la reacción se ejecutan en el mismo reactor. En la figura 2-12, se tiene un diagrama de un proceso de transesterificación en tipo batch.

El sistema tipo continuo es más implementado en plantas de gran capacidad (>50000 Tm/años) de producción en el cual se tenga un suministro constante de los insumo [59]. Este sistema consta de una cadena de reactores continuos que poseen un sistema de agitación. Estos reactores son los denominados CSRT (Continuos stirred tank reactor), como características importante es que estos reactores se pueden modificar en cantidad de volumen para obtener mayores tiempos de reacción y así conseguir los rendimientos de la transformación de los TG a ésteres; un aspecto importante del empleo de estos reactores es que se debe garantizar el suministro constante y hacer poder realizar la mezcla de la composición; pero como desventaja en los CSTR hay un aumento en la dispersión del glicerol en la fase de ésteres, lo que hace que el tiempo requerido para el proceso aumente, debido a la separación de las fases.

Figura 2-12: Procesos de transesterificación tipo Batch.

Fuente: [33]

En la figura 2-13, se observa un diagrama de un proceso continuo de la reacción de transesterificación.

Figura 2-13: Proceso de transesterificación en sistema continuo.

Fuente: [63].

Aunque los procesos mencionados anteriormente tienen varios factores en común, existe un sin número de opciones de llevar a cabo la producción del biodiesel ya sea desde el aspecto de los insumos como desde los equipos. Existen muchas tecnologías que se pueden combinar variando las condiciones del proceso, así como del suministro de insumos; es importante establecer que la tecnología seleccionada para el proceso está

en función específicamente de la capacidad requerida de producción, calidad, disposición de materias primas, y de la recuperación del catalizador y el alcohol del proceso.

Varios investigadores han informado sobre el uso de diversos tipos de reactores para la producción de biodiésel a partir de aceites refinados y no refinados con unas eficiencias significativas de éxito. Dentro de las tecnologías que se han estudiado para superar las desventajas de los reactores convencionales se tienen:

El reactor de ultrasonido reduce el tiempo de transesterificación en un rango de 15 - 40 min en comparación con el proceso tipo batch los rendimientos obtenidos son del 99% en un tiempo de 5 min empleando una agitación menor. En cuanto a los insumos del proceso se reduce el exceso de alcohol y la cantidad de catalizador a emplear, factor que se puede dar por la alta actividad química que permite el reactor [64]. Otro dispositivo es el reactor de membrana (MRS), instrumento que ha permitido la reducción de la cantidad de agua residual generado durante el proceso a escala industrial, dentro de las características del proceso se han manifestado que el flujo a través de la membrana de 30 - 40 m²/h empleando un tiempo de residencia de 15 min unas ventajas que se obtiene por usar estos reactores son color, la calidad de éster metílico y glicerina las investigaciones reportan que se logran niveles por debajo de los estándares de la norma ASTM D6751/EN 14214 [65].

Otro equipo empleado en la producción de la transesterificación de los aceites es el reactor de hendidura de canal (Stit-channel reactor); este equipo se ha utilizado con catalizadores heterogéneos sólidos (NaOCH) demostrando una superioridad a otros reactores por los bajos costos de fabricación del equipo y obteniendo una alta eficiencia de la reacción [66]. También se ha empleado el reactor de bucle continuo pulsado (Continuous pulsed loop reactor) minimiza el tiempo de residencia, además, proporciona un flujo continuo de producción de biodiesel, las características que se emplean en este reactor son una relación molar de 06:01, frecuencia de oscilación de 6 Hz y una temperatura de 60 °C y tiempos de residencia de 10 min, utilizando materia prima con un contenido de AGL de 0,5 %p/p [48]. Otro de los dispositivos empleados es un reactor de lecho fluidizado estabilizado magnéticamente (MSFBR), este dispositivo presenta varias ventajas sobre otros reactores continuos en términos de la eliminación de la mezcla, una baja caída de presión a través del lecho, y por último el bombeo y transporte del catalizador es mucho más fácil y eficiente debido a la fluidización presente en el proceso. Este tipo de reactores emplea como características una relación molar de 8:1, un caudal de 40 cm³/min, un campo magnético de 225 Oe, un tiempo de reacción de 100 min y por último una temperatura de 65 °C [67]. Otro es el reactor empleado en el proceso de metanol supercrítico, el dispositivo empleado debe soportar altas temperaturas (350 y 400 °C) y altas presiones (25 a 40 MPa), un aspecto importante es que el metanol supercrítico no funciona solamente como un disolvente sino que actuaría como un catalizador ácido [68], en la actualidad este método se ha empleado mucho con aceites de una buena calidad obteniendo unas condiciones eficientes de transformación de ésteres; sin embargo no se tiene una experimentación importante con el uso de AUF.

Entre las ventajas que tiene el proceso son: permite unos grandes porcentajes de agua en el proceso catalítico de la materia prima, al emplear una alta relación de metanol/aceite, la conversión del aceite se puede conseguir en un corto tiempo (Minutos) y por último la fase de separación del catalizador se elimina. Dentro de las desventajas un funcionamiento a presiones y temperaturas muy elevadas, generando un alto costo del proceso por equipos de calefacción y refrigeración implementado al proceso, y unos altas proporciones de metanol:aceite generalmente entre 42:1, esta proporción de excesiva de metanol involucran unos altos costos para la elevación de la temperatura (Evaporación) del metanol que no reaccionara con la proporción de aceite agregado al sistema [69] [70].

2.7.1 Plantas piloto para la producción de biodiesel a partir de AUF

Como se ha mencionado en el ítem anterior el reactor es uno de los elementos de gran importancia en la planificación, diseño y construcción de una planta de producción ya que existen muchas tecnologías en el diseño de reactores pero que a nivel industrial los más utilizados son los reactores tipos continuo y discontinuo (Batch), no obstante la capacidad de producción en el proceso, costo de montaje y mantenimiento, materias primas, materiales de construcción, implementos y accesorios es de gran importancia para la definición del diseño y construcción de la planta de producción.

En la literatura consultada se identifica que se han realizado estudios de diseño de plantas piloto para producción de biodiesel. En Brasil se realizó una investigación reciente en una planta semi-industrial de una capacidad de 10000 L/año que utiliza aceites usados de diferentes calidades empleando metanol con una relación molar de 1:6, catalizador básico (NaOH y KOH) se emplearon en proporciones de 1% y 0,5% según la cantidad de aceite de partida. El rendimiento en el proceso de producción de biodiesel en la planta fue del 82 – 85 %p/p. Del análisis del combustible obtenido la investigación establece que los valores son óptimos para los mono y diglicéridos, pero en el caso de los TG no son aceptables porque todos los análisis a la muestra superan el valor de comparación [71]. Otra investigación, plantea el proceso de producción de biodiesel de la planta piloto de 200 L utilizando aceite Brassica. carinata como materias primas y con alcohol metanol y el uso de hidróxido de potasio como catalizador. Los resultados obtenidos muestran que el rendimiento de ésteres metílicos fue entre 97 – 98 %p/p, sin embargo los rendimientos en peso de biodiesel con respecto a la cantidad inicial de aceite no es del 100% por lo que se estima en reacciones secundarias presentes en el proceso de producción [72].

Un aspecto importante es que la revisión bibliográfica existe muchos estudios en plantas piloto que realizan estudios con diferentes materias primas con catalizadores enzimáticos o básicos con metanol, pero no se plantean estudios a nivel de planta piloto con etanol y AUF.

2.8 Calidad del biodiesel

Las propiedades del biodiesel dependen del tipo de aceite utilizado así como de la tecnología o el proceso usado para su producción, de esta manera ha sido necesario estandarizar el rango de propiedades dentro del cual un biodiesel puede ser utilizado como combustible. El estándar Europeo de especificaciones para el biodiesel **EN14214** Y el estándar americano de especificaciones para mezclas de biodiesel B100 **ASTM 6751**, son los dos estándares internacionales de mayor aceptación [13].

Estos estándares fijan las especificaciones y los métodos experimentales de medición para los FAME cuyo uso es combustible en motores diesel. En la (Tabla 2-9), se tienen algunas características del FAEE que se emplea como biocombustible. En el proceso de determinar la calidad del biodiesel los aspectos más importantes a ser tenidos en cuenta son: la reacción completa hacia monoalquil ésteres, la remoción de la glicerina libre, del catalizador residual y del alcohol que no haya reaccionado y la ausencia de AGL ya que la presencia de impurezas es desfavorable para el buen funcionamiento del motor [55]. Como se puede apreciar (Tabla 2-12), el biodiesel producido debe satisfacer especificaciones de: punto de flash y de nube, contenido de azufre, glicerina, agua y sedimentos, número de cetano y valor ácido. La tabla 2-12, establece una comparación entre las dos normas mencionadas anteriormente que sirven de referentes para evaluar la calidad del biodiesel producido.

Tabla 2-12: Estándar europeo (EN14214) - estándar americano (ASTM D 6751).

Propiedad	Unidades	Estándares del biodiesel	
		EN14214	ASTM D 6751
Contenido de éster	%(m/m)	96,6>	-
Densidad a 15 °C	kg/m ³	860 – 900	-
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	3,5 – 5,0	1,9 – 6,0
Punto de inflamación	°C	120 <	130 <
Punto de nube	°C	-	Reporte
Punto de fluidez	°C	-	-
Carbón residual (Al 10% del residuo de la destilación)	%(m/m)	0,3>	0,5>
Índice de acidez	mg KOH/g	0,5>	0,8>
Índice de cetano	-	51,0<	47,0<
Contenido de azufre	%(m/m)	0,001>	0,0015>
Contenido de cenizas sulfatadas	%(m/m)	0,02>	0,020>
Contenido de agua	mg/kg	0,05>	0,05>
Lamina de cobre a la corrosión (3 h a 50 °C)	Clasificación	1a	3 ^a
Valor de yodo	-	120,0>	-
Éster metil de ácido linoléico	%(m/m)	12,0>	-
Polinsaturado ésteres metílicos (≥ 4 doble enlaces)	%(m/m)	1,0>	-
Contenido de metanol	%(m/m)	0,2>	-
Contenido de monoglicéridos	%(m/m)	0,8>	-
Contenido de diglicéridos	%(m/m)	0,2>	-
Contenido de triglicéridos	%(m/m)	0,2>	-
Glicerol libre	%(m/m)	0,02>	0,02>

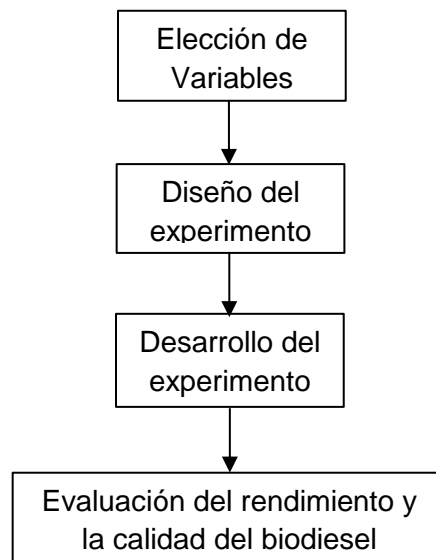
Propiedad	Unidades	Estándares del biodiesel	
		EN14214	ASTM D 6751
Glicerol total	%(m/m)	0,025>	0,024>
Contenido de fosforo	mg/kg	10,0>	10,0>
Temperatura de destilación (90% recuperado)	°C	-	360,0>

Fuente. [73] [74].

3. Ingeniería del Proceso

La primera condición para esta etapa del proyecto es plantear un diseño metodológico que establezca una relación clara de las etapas que intervendrán en el proceso de producción de biodiesel. En la figura 3-1, se plantea un diagrama con las diferentes etapas que se desarrollarán para el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de fritura.

Figura 3-1: Diagrama de bloques del diseño metodológico de la ingeniería de proceso.



Fuente: Autor.

En esta sección se plantea la metodología que se utilizará para la elaboración de biodiesel a partir de aceites de fritura en el laboratorio de biocombustibles del Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, para posteriormente puntualizar el diseño conceptual del proceso de producción basado en los resultados obtenidos en las pruebas del laboratorio. Se inicia con una elección de las variables y los rangos de variación que presentan una gran influencia en la reacción de transesterificación según resultados de investigaciones realizadas por el grupo de investigación APRENA y MDL&GE y luego se define el diseño del experimento con el fin de poder evaluar los factores considerados en el paso anterior. Posteriormente se especifica las condiciones del desarrollo del experimento en el laboratorio para la elaboración del biodiesel, finalmente se presentan los datos obtenidos en la evaluación de la calidad del producto generado.

3.1 Elección de variables.

La selección de las variables está relacionada con las materias primas (Los aceites o grasas, catalizador y alcohol) de otra parte los factores que afectan el proceso en calidad y rendimiento, estas son la calidad de los reactivos, la calidad del aceite o grasa, la relación molar aceite-alcohol, tipo y concentración catalizador, tiempo, temperatura y agitación de la reacción [12].

Para el desarrollo del proyecto, las variables a estudiar en los ensayos experimentales son: relación molar aceite/alcohol, cantidad de catalizador, temperatura, tipo de catalizador, entre otras. Estas variables definirán las condiciones del proceso de producción en el laboratorio, debido a que tienen un gran efecto en la calidad y rendimiento del biodiesel obtenido por el proceso.

- Calidad y pureza de los reactivos.

La pureza, acidez y contenido de agua, son factores de un gran impacto en la reacción de transesterificación; es claro que la calidad de las materias primas establece el rendimiento y calidad del biodiesel producido. Para este caso, los aceites de fritura tienen características diferentes a los aceites purificados o crudos (Material sin emplear), porque durante el proceso de cocción de los alimentos, el aceite se calienta a temperaturas de 160 – 190 °C [39] con largos periodos sin ningún control de las condiciones atmosféricas, además que el aceite se emplea varias veces.

El uso y calentamiento somete al aceite a sufrir una reacción termolítica¹¹, una reacción oxidativa¹² y una reacción hidrolítica¹³ además de ir adquiriendo material sólido por los alimentos. Las reacciones provocan cambios físicos y químicos en el aceite, pero estos cambios están en función del tipo de aceite y de su composición. Una consecuencia de estos cambios está enmarcado en el incremento del contenido de AGL en los aceite de fritura. Este último aspecto junto con el contenido de agua, deben estar en rangos admisibles con el fin de generar un producto de excelente calidad.

Aunque no solo el aceite debe cumplir con condiciones específicas, el alcohol y el catalizador deben ser anhidros, ya que el contenido de agua en estos materiales aumenta las posibilidades de la formación de jabones por saponificación generando dificultades en el proceso de purificación del biocombustible.

¹¹ Se produce en ausencia de oxígeno a altas temperaturas. Por lo general esta reacción afecta a los ácidos grasos insaturados, formando compuestos diametrales (dímeros saturados, compuestos policíclicos).

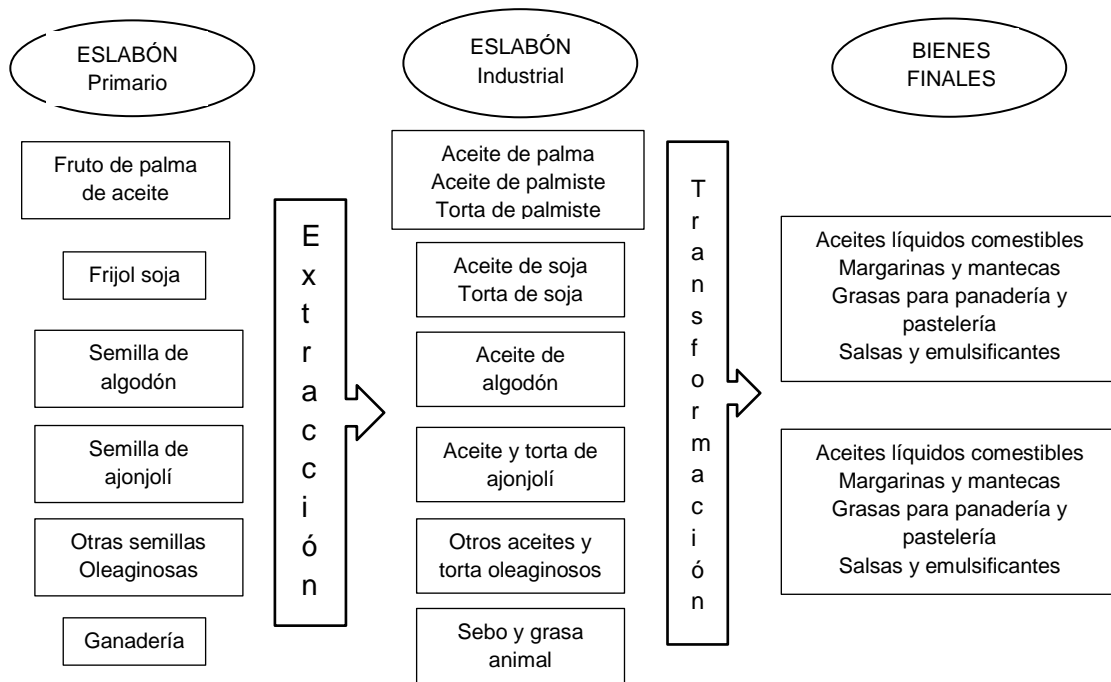
¹² Se produce cuando el oxígeno en el aire disuelto en el aceite o grasa reacciona principalmente con acyglycerols insaturados que resultan en la formación de diversos productos de oxidación.

¹³ Se produce cuando una parte del agua evaporada durante la preparación de los alimentos se disuelve en el aceite e induce a la formación de ácidos grasos libres.

- Aceite

En el país actualmente la cadena de producción de aceites y grasas se ha centrado en dos grandes fuentes de origen netamente agropecuario: material vegetal oleaginoso y el material animal, en la figura 3-2, se puede observar los eslabones de la cadena de producción de los materiales que más se emplean para la elaboración de las grasas y los aceites; la utilización de estos productos está centrada en la alimentación humana, animal y en el uso industrial.

Figura 3-2: Eslabones de la cadena de producción de aceites y grasas en Colombia.



Fuente. [75]

En Colombia, la producción de aceite está centrada en cuatro productos: La palma de aceite, la soja, el algodón, ajonjolí, siendo el de mayor producción, el aceite de palma con 974 millones de toneladas al año (t/año) ocupando el primer lugar dentro de los países latinoamericanos y el quinto en el mundo en producción, contando con un área sembrada de 452 mil hectáreas al año (ha/año) 2012 [75]. Aunque existe un gran potencial para aumentar las áreas cultivadas y la producción en el 2014, existe una gran preocupación sanitaria debida a que desde los últimos 20 años, se han perdido 100 mil hectáreas de cultivos por enfermedades. Según cifras de Fedepalma el rendimiento en los productos obtenidos de la palma de aceite (Racimos de fruto de palma de aceite, aceite de palma crudo y almendra de palma), han tenido un rango de variación de -8,3 a -10,5 condición que ha generado la importación de 48,5 t/año de aceite de palma crudo [75]. Estos aspectos mencionados son una gran amenaza para la utilización de este aceite en la producción del biodiesel así como en la sostenibilidad de los márgenes de empleo actuales del biocombustible en sectores del transporte e industrial.

Para el caso de las otras materias primas mencionadas anteriormente, la producción de los semillas es muy inferior comparada con la almendra de palma: soya 88,5 kt/año algodón 46,5 kt/año, ajonjolí 1,7 kt¹⁴ [75]. Estas semillas se emplean por lo general en la industria alimenticia y algunas pequeñas proporciones en productos para el ganadería; lo que es poco práctico y poco rentable debido a la baja tasa de producción, lo que aumentaría los costos en la materia prima a su vez que el principal inconveniente de estas materias primas es el potencial de utilización en recursos alimenticios.

Un material que a nivel del mundo y el país que no tiene una gran utilización son los aceites usados de cocina, sin embargo este material puede ser una excelente alternativa por su bajo costo y los altos volúmenes de producción en muchos lugares del mundo. En la Tabla 3-1, se observa el volumen de aceite de cocina usado disponible en algunos lugares del planeta. Para el caso del país y en especial de la ciudad de Bogotá un proyecto del año 2010 efectuado por la Universidad de América estableció con una muestra de 30 hogares de la localidad tercera de Santa Fe una producción de 10 L/semana, es decir que cada hogar en promedio genera 335 mL/semana de material que por lo general es desechado en los efluentes de agua [76] o vertidos a la basura.

Tabla 3-1: Producción de aceite de cocina usado de algunos países.

País	Producción (Millones de t/año)
China	4,5
Europeo	0,7 - 1,0
Estados Unidos	10
Japón	0,45 - 0,57
Malasia	0,5
Canadá	0,12
Taiwan	0,07

Fuente: [39]

A nivel mundial se estima que el aceite usado de cocina generado es de 15 millones de t/año. No obstante esta cifra es mucho más alta basado en la producción de aceites y grasas lo que puede presumir que la falta de conciencia, el desconocimiento en la reutilización de este producto, así como una falta de un correcto reciclaje llevaran a un grave problema medioambiental y de salud pública.

Teniendo presente las razones antes mencionadas se empleara el aceite usado de cocina para el proyecto debido a que el biodiesel que se obtiene permite abaratar los costos de producción siempre que se tenga una materia prima de una buena calidad. Teniendo en cuenta que las grandes compañías generadoras de biodiesel no utilizan este tipo de material, es importante fomentar el uso de aceites usados como materia prima para la producción de biodiesel, lo cual permitiría dar un aporte a la industria de los biocombustibles y por último un aprovechamiento adecuado de un producto que está

¹⁴ Un kilotón ó kilotonelada es una unidad de masa que equivale a mil toneladas.

generando problemas serios en la flora, fauna y salud de los humanos si no se buscan alternativas para su reutilización.

▪ Catalizador

Los catalizadores son una clase de sustancias que genera algunos cambios químicos en el desarrollo de una reacción sin que este no sufra ningún cambio durante el proceso de la reacción. Como la reacción (Transesterificación) de producción del biodiesel es lenta es necesario emplear un catalizador que permita aumentar la velocidad de la reacción entre los reactantes. Entre los catalizadores que se pueden emplear para este proceso se tiene: homogéneos básicos ó ácidos, enzimáticos y heterogéneos [29] [50], sin embargo existe una limitada información de los métodos de catálisis de la transesterificación con aceites usados de cocina debido a que las industrias emplean como materia prima otros aceites. En la Tabla 3-2, se presentan algunas condiciones para diferentes catalizadores que se emplearon con aceites de alto contenido de AGL.

Tabla 3-2 Catalizadores empleados en la transesterificación de aceites usados de cocina.

Catalizador	Las condiciones de reacción				Rendimiento	Observación	Referencia
	Temperatura ° C	Tipo de Alcohol (relación molar alcohol/ aceite)	Catalizador % peso	Tiempo de reacción (Horas)			
Catalizador básico homogéneo							
NaOH	60	Metanol (7:01)	1,1	0,33	88,8%	El exceso de catalizador utilizado condujo a la formación de jabón	Leung y Guo (2006)
KOH	87	Metanol (9:01) ^{uu}	6	2	87% ^{uuu}	-	Demirbas (2009)
Catalizador ácido homogéneo							
H ₂ SO ₄	95	Metanol (20:01)	4	20	Conversión = > 90%	-	Wang et al.(2006)
H ₂ SO ₄	70	Metanol (245:1)	41,8 ^a	4	99%	-	Zheng et al.(2006)
H ₂ SO ₄	65	Metanol (30:1)	1	69	Conversión = 99%	-	Freedman et al.(1984)
Dos pasos: catalizador ácido seguido por catalizador básico							
Sulfato férrico seguido por KOH	Ácido: 95	Ácido: Metanol (10:1)	Ácido: 2	Ácido: 2	Conversión = 97%	-	Wang et al.(2006)
	Base: 65	Base: Metanol (6:1)	Base: 1	Base: 1			
Sulfato férrico seguido por KOH	Ácido: 100	Ácido: Metanol (9:1)	Ácido: 2	Ácido: 2	96%	-	Patil et al.(2010)
	Base: 100	Base: Metanol (7,5:1) ^{uu}	Base: 0,5 ^{uu}	Base: 1			
Sulfato férrico seguido por CaO	Ácido: 60	Ácido: Metanol (7:1)	Ácido: 0,4	Ácido: 3	81,3%	-	Wan Omar et al.(2009)
	Base: 60	Base: Metanol (7:1)	Base: No se especifica claramente	Base: 3			
Catalizador básico heterogéneo							
CaO	Temperatura	Metanol	0,85	1	66%	Se detectó jabón	Kouzu et

Catalizador	Las condiciones de reacción				Rendimiento	Observación	Referencia
	Temperatura °C	Tipo de Alcohol (relación molar alcohol/aceite)	Catalizador % peso	Tiempo de reacción (Horas)			
	de reflujo de metanol: 60-65	(12:1)				de calcio	al.(2008a)
K ₃ PO ₄	60	Metanol (6:1)	4	2	97,3%	-	Guan et al, 2009
La palma de aceite cenizas	60	Metanol (18:1)	5,35	0,5	71,7%	-	Chin et al.(2009)
Catalizador ácido heterogéneo							
WO ₃ /ZrO ₂	75	Metanol en ácido oleico (19.4:1)	No se especifica claramente	20	FFA conversión = 85%	Se utilizó reactor de lecho	Park et al.(2008)
Zeolita Y (Y756)	460	Metanol (6:1)	No se especifica claramente	0,37	26,6%	-	Brito et al.(2007)
Carbono-base catalizador derivados de almidón	80	Metanol (30:1)	10	8	92%	-	Lou et al.(2008)
H ₃ PW ₁₂ O ₄₀ ·6H ₂ O (PW ₁₂)	65	Metanol (70:1)	3,7 ^a	14	87%	4 Å zeolita se utiliza al mismo tiempo para absorber agua	Cao et al.(2008)
Zr _{0,7} H _{0,2} PW ₁₂ O ₄₀ (ZrHPW)	65	Metanol (20:1)	2,1	8	98,9%	Catalizador nanoestructurado contiene sitios ácidos dobles	Zhang et al.(2009)
ZS/Si	200	Metanol (18:1)	3	5	98%	-	Jacobson et al.(2008)
SO ₄ ²⁻ /TiO ₂ -SiO ₂	200	Metanol (9:1)	3	4 ^{de}	90% ^{una}	-	Peng et al.(2008)
SO ₄ ²⁻ /SnO ₂ -SiO ₂	150	Metanol (15:1)	3	3	92,3%	-	Lam et al.(2009a)
Catalizador enzimático							
Pseudomonas cepacia (PS 30)	38,4	Etanol (6,6:1)	13,7	2,47	96%	La segunda porción de la lipasa SP 435 (5% wt) se añadió a los medios de reacción después de 1 h	Wu et al.(1999)
<i>Candida antarctica</i> (Novozym 435)	30	Metanol (3:1)	4	50	Conversión = 90,4%	Metanólisis lote de tres pasos	Watanabe et al.(2001)
Novozym 435	30	Metanol (3:1)	4	50	Conversión = 90,9%	Tres-paso metanólisis continua en diferente velocidad de flujo	Watanabe et al.(2001)
Novozym 435	40	Metanol (4:1)	4	12	88	Terc-butanol se utiliza como co-disolvente	Halim y Harun Kamaruddin (2008)
<i>Bacillus subtilis</i> encapsulados en partículas magnéticas (biocatalizador celular magnética)	40	Metanol (1:1)	3	72	90	El metanol se añadió en dos etapas	Ying y Chen (2007)
<i>Rhizopus oryzae</i>	40	Metanol (4:1)	30	30	88 - 90%	El metanol se añadió en tres etapas.	Chen et al.(2006)
Inmovilizada <i>Penicillium expansum</i> en resina D4020	35	Metanol (1:1)	No se especifica claramente	7	92,8%	El metanol se añadió en tres etapas. Gel de sílice azul se utiliza para	Li et al.(2009)

Catalizador	Las condiciones de reacción				Rendimiento	Observación	Referencia
	Temperatura ° C	Tipo de Alcohol (relación molar alcohol/aceite)	Catalizador % peso	Tiempo de reacción (Horas)			
						adsorber el exceso de agua.	

Fuente: [77]

De las seis subdivisiones de catalizadores que muestra la tabla anterior, se seleccionaron los catalizadores homogéneos debido a que actualmente el biodiesel se produce con catálisis homogénea de aceites refinados. Los catalizadores alcalinos empleados son el NaOH o KOH [5]. Estos catalizadores se utilizan en la industria debido a varias razones:

- En la fase de escalamiento de proceso el empleo de hidróxidos tiene una mayor utilización debido a que son menos corrosivos, más económicos y presenta un rendimiento muy eficiente (87 – 89%) en comparación a otros catalizadores, como es el caso del metóxido de sodio que es más costoso y los reactantes deben estar totalmente libres de agua.
- Los costos de los catalizadores básicos son relativamente bajos, debido a que no tienen complejos procesos de producción, además que las materias primas son de fácil obtención permitiendo una buena disponibilidad de estos catalizadores. Pero al realizar una valoración de los costos entre el NaOH y KOH se encontró que el primero es más económico que el segundo (Anexo A).
- En las condiciones de reacción tienen, unas características apropiadas, debido a que cataliza la reacción a unas bajas temperaturas (60 °C) y a la presión atmosférica; esta condición se ve reflejada en la costos energéticos del proceso debido a que la temperatura que se emplea debe ser menor que el punto de ebullición del alcohol, ya que se vaporiza y disminuiría la reacción en la interfaces alcohol/aceite/biodiesel [78].
- La eficiencia o el rendimiento de la reacción de transesterificación está afectada por el %p/p de AGL (<0,5) y el valor ácido (<1 mg de KOH/g aceite), aunque algunas investigaciones establecen para el caso de los catalizadores básicos que toleran un mayor contenido AGL (<0,5 - ≤2 %p/p) [39], sin embargo es importante que el contenido de estos sea lo más bajo posible. Otro aspecto importante es que la eficiencia se incrementa proporcionalmente con el aumento en la cantidad de NaOH, teniendo para 1,1 %p/p, el rendimiento es 88,8 % [39] empleando metanol, pero si se adiciona un exceso del catalizador da lugar a la formación de una emulsión y posteriormente a la formación de geles.
- Se ha encontrado que el rendimiento del proceso de catálisis básica aumenta con el tiempo reacción. Un estudio catalizado por medio básico y etanol se consiguió un rendimiento bajo en un periodo de 120 min y en una sola etapa del proceso; posteriormente en esta misma investigación se planeó desarrollar la producción en dos etapas una de esterificación y otra de transesterificación obteniendo alta calidad según la norma EN 14214 y unos buenos rendimientos (94,5 %p/p) en el mismo periodo de tiempo [79].

- La seguridad industrial de la manipulación del hidróxido de sodio establece que el compuesto puede causar quemaduras muy severas causado por la ingestión y contacto, condiciones de muy alta peligrosidad ya que puede generar daños permanentes; aspecto que puede afectar en gran medida los ojos y la piel debido a la manipulación de este producto durante el proceso, además este producto es de alta toxicidad inhalado afectando las vías respiratorias. Al igual que el NaOH, el hidróxido de potasio es un producto químico de un alto cuidado porque la manipulación puede desprender polvo o niebla el cual puede ser inhalado causando quemaduras en el tabique y las membranas mucosas. Estos factores dependen de la concentración y duración de la exposición; pero al tener un contacto directo con la piel y los ojos puede causar una destrucción severa y quemaduras u ulceraciones. Por último estos compuestos son muy corrosivos a la vez que absorben rápidamente el agua a partir del aire y el contacto con la humedad, esto puede producir liberación de calor. Estos aspectos que son de gran importancia en el caso de la manipulación de los hidróxidos, se les debe prestar una alta atención en la selección y utilización de los elementos de protección personal. Dentro de estos elementos se cuenta con gafas con protección lateral, guantes, overol de PVC, botas de caucho y respiradores con filtro (Anexo B).

Basado en las razones mencionadas anteriormente el catalizador seleccionado es hidróxido de sodio debido a que obtiene fácil, la velocidad de reacción es muy rápida para el proceso de transesterificación, además que para el proceso de la reacción no requiere de unas grandes condiciones y a su vez una energía menos intensiva con una mayor condición de eficiencia del proceso según los datos de la tabla 3-2, por otro lado es uno de los catalizadores más utilizados a nivel industrial, económico y con una buena disponibilidad en el mercado, se emplearán para el proceso experimental concentraciones de 0,5 y 0,7 %/p/p [12] [80].

- Alcohol

Para el proceso de producción del biodiesel se pueden utilizar diferentes alcoholes entre ellos butanol, propanol, iso-propanol, metanol y etanol, siendo de estos los más empleados a nivel industrial los dos últimos. Pero la utilización de los primeros se debe a su alto costo y a que en las condiciones de reacción, los reactantes deben estar libre de agua, ya que por esto pierden su efectividad en el proceso de la alcoholólisis. En el caso del metanol, es el más empleado a nivel industrial e experimental en el mundo como se puede observar en la tabla 3-2. Este compuesto es derivado del gas natural, es miscible con el agua, alcoholes, ésteres y con la mayoría de los solventes orgánicos, además de las ventajas en la polaridad y cadena corta del alcohol asimismo que puede reaccionar de forma rápida [77]; otro factor es que su costo es relativamente bajo (Anexo A). El rendimiento de los metil ésteres de ácidos grasos es menor en comparación con los étil ésteres de ácidos grasos[79].

Otro alcohol que se emplea es el etanol; el país es el segundo productor a nivel de Suramérica. Según Fedebiocombustible, la tasa media de producción en el 2013 es 870

mil barriles por día (bpd), consiguiendo una producción al año aproximadamente de 13,3 mil millones de galones; según pronósticos de la entidad en el 2014 se espera una producción en promedio de 915 KBD ó 14 mil millones de galones por año (gl/año), en 2014. En la actualidad el etanol es un producto de gran impacto debido a que es un biocombustible que es netamente renovable producido a partir de los cultivos bioenergéticos (Caña de azúcar) [81] además que se emplea en bebidas alcohólicas. Este tipo de alcohol a nivel industrial de la producción de biodiesel ha sido poco estudiado, porque su producción está centrada en satisfacer la demanda para el empleo en la mezcla con la gasolina. En comparación a la seguridad en el manejo de sustancias con el metanol este es menos peligroso en la manipulación, ya que es una sustancia menos toxica, menos inflamable, no obstante se debe tener las condiciones de seguridad personal mencionadas anteriormente para tener un contacto con esta sustancia.

Al utilizar cualquiera de los dos alcoholes más empleado es necesario tener una agitación mecánica que beneficia la transferencia de masa [82]. Un aspecto importante en la selección del alcohol es que debe ser anhidro ($0,1 \leq 0,3$ %p/p de proporción de agua), porque el contenido de agua en los reactantes promueve la hidrólisis de los esterres a AGL y a su vez la producción de jabones [44]. Al mismo tiempo que cuando se emplea estos alcoholes se deben reportar un informe semestral del manejo de estas sustancias según la resolución 009 de Febrero 18 de 1987 de la Dirección Nacional de Estupefaciente, donde establece el control en las compras, importaciones, distribución, consumo, producción y almacenamiento cuando se manipulan cantidades superiores a 5 L de estos alcoholes porque en el país su uso se desvía como materia prima para la generación de estupefacientes.

El alcohol que se empleará para el proceso de obtención del biodiesel es el etanol, porque es un alcohol que tiene una alta aceptabilidad para la condiciones ambientales, aunque tiene un poco más de costo que el metanol según lo mencionado con anterioridad ha mostrado mayores rendimientos que el metanol, su estudio en la producción de biodiesel ha sido poco experimentado y mucho más en el empleo con aceite usado de cocina. En cuanto a las características del biodiesel obtenido con etanol presenta una menor viscosidad, densidad y un valor ácido con una pequeña diferencia en el poder calorífico, factores que afectan el empleo del biodiesel, almacenamiento y producción.

- Relación molar aceite/alcohol

Esta variable se establece debido a que la estequiometria de la reacción necesita una proporción aceite:alcohol 1:3, esta se debe conservar en el proceso de la transesterificación con catalizador básico, para obtener tres moles de etil éster de ácido graso y una mol de glicerol pero como la alcoholisis es reversible, se requiere suministrar un exceso de alcohol con el propósito de mover el equilibrio de la reacción y a su vez conseguir una reacción directa consiguiendo aumentar la formación de alquilésteres.

La literatura reporta relaciones molares aceite/alcohol desde 1:543 [36] no obstante se debe tener en cuenta que una alta cantidad de alcohol obstaculizaría la disociación del

glicerol por el aumento en la solubilidad [83]. Sin embargo la relación molar adecuada para la reacción se debe definir por procesos experimentales, debido a que esta proporción está en función del tipo y calidad del aceite empleado [36]. Las investigaciones han reportado (Tabla 3-2), que para la producción de biocombustibles con aceite usado y metanol se han empleado relaciones entre un rango de 1:1 – 70:1 pero no se consiguen datos puntuales para el etanol y el aceite usado de fritura.

Las relaciones molares que se emplearan para la experimentación son 1:5, 1:7, con estos factores se podrá determinar la cantidad de alcohol en exceso que se debe agregar lo cual tiene una influencia directa en el costo del producto y en los procesos de separación posteriores con el ánimo de recuperar dicha materia prima, así como establecer la relación que tiene la mejor influencia en rendimiento y en la calidad del producto.

- Temperatura y tiempo de reacción

Según los reportes de la literatura, la temperatura de la transesterificación ocurre a diferentes valores, esta condición está sujeta al tipo de aceite y tipo de catalizador que se empleen en el proceso; para el caso específico de aceite usado de cocina las temperaturas que se reportan se encuentran en un rango de 30 – 460 °C (Tabla 3-2), intervalos de valores que varían por el tipo de catalizador a emplear. Según las investigaciones establecen que el aumento de la temperatura es directamente proporcional al rendimiento pero posteriormente de un tiempo definido no hay una notable diferencia en el rendimiento. Por lo general la reacción se desarrolla a un valor cercano al punto de ebullición del alcohol (Etanol 78 °C), las temperatura que se seleccionaron para la experimentación son 50, 60 °C.

Con respecto al tiempo de la reacción, es similar a las condiciones de temperatura, es decir el tiempo es directamente proporcional a la conversión de los ésteres de ácidos grasos, los datos según la literatura están entre 5 min – 20 h, esto dependiendo del tipo de aceite, equipo y proceso de catálisis a utilizar, para el caso del aceite usado de fritura (Tabla 3-2), las condiciones de operación empleadas están entre 0,33 – 72 h, condición que está relacionada con el tipo de catalizador como se puede observar en la tabla mencionada anteriormente. Así que el tiempo que se selecciona para la producción del biodiesel empleando etanol y NaOH es de 1 h.

- Agitación

Este factor es de gran importancia porque el aceite no forma una fase homogénea con el alcohol. Lo cual hace necesario que esta variable sea de mucho cuidado debido a que aumenta la transferencia de masa. Por lo que la agitación debe permitir un fluido turbulento que debe estar alrededor de los 10000 Reynolds. Como se mencionó los valores de la velocidad de agitación están entre los 150 y 1200 RPM. Es así como para esta variable se selecciona una velocidad de 200 RPM entre el rango mencionado anteriormente [48].

- Agente de lavado

Los reportes mencionan que después de la etanolisis se debe llevar a cabo una separación del biodiesel y el subproducto (Glicerol). Se debe realizar un lavado al biodiesel, en esta etapa se requiere de una sustancia que permitirá la eliminación de residuos de jabones y alcohol presentes en el biocombustible, que son los primeros residuos formados por las reacciones secundarias. Para el proyecto, los agentes de lavado que se emplearan son ácido acético ($C_2H_4O_2$) y agua a 40 °C.

3.2 Diseño del Experimento

Para poder desarrollar la parte experimental del proyecto en el laboratorio, se requiere plantear un diseño experimental donde se definan los valores de cada una de los factores que afectan la unidad experimental (Biodiesel) y observar, analizar y concluir sobre la variable de respuesta. Para esta investigación se estableció como variable de respuesta el rendimiento obtenido en el proceso de producción. Esta respuesta es la relación entre la masa de biodiesel producida (Refinado) y la masa de aceite usado de fritura empleado para su producción. Los factores seleccionados son: La relación molar aceite:alcohol, porcentaje en peso de catalizador, temperatura y el agente de lavado; no obstante el último factor es una condición de diseño y las otras tres son las variables con las que se planteara el diseño. Antes de empezar con el desarrollo del modelo experimental es necesario realizar la caracterización físico-química del AUF, posteriormente se plantearan los rangos y niveles para cada factor, datos que están relacionados con los artículos relacionados con el proyecto, por último se establecerá y desarrollará el modelo del diseño.

3.2.1 Caracterización físico-química del aceite usado de fritura

En primer lugar es de aclarar que el AUF proviene de los hoteles Estelar ubicados en la ciudad de Bogotá. Esta participación de la cadena de hoteles Estelar se debe a las estrategias de alianza realizada por los directores de los grupos de investigación de la Universidad Nacional de Colombia (APRENA Y MDL&GE) y la empresa privada con el fin de realizar la investigación para la solución de problemas a los que se ven avocadas las organizaciones. Los hoteles emplean para sus procesos de fritura la marca de aceite Z, en la figura 3-3, se aprecia algunas de las muestras envasadas en recipiente plástico de 20 L, que el hotel provee a la institución educativa. El aceite marca Z, es producido en el país por la empresa Team. A los aceites se les debe realizar unas pruebas que definirán algunas características de tipo físico (Densidad, viscosidad, punto de fusión e índice de refracción) y de tipo químico (Índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxido, índice de saponificación y índice de éster).

- Características físicas.

Densidad: Esta característica puede variar dependiendo del fabricante y la calidad de la materia prima con la que se elaboró el aceite. Esta prueba para el aceite es la relación

entre su peso y su volumen, y en este caso está afectado por la temperatura, es decir, que se puede determinar la variación de la densidad con respecto a un cambio de temperatura.

Viscosidad: Es una medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia o fluir de un líquido. Para el caso de los aceites la viscosidad disminuye con un incremento en la insaturación y con un decrecimiento de la masa molar de sus ácidos grasos.

En cuanto a la condición física del aceite recolectado por el hotel se tiene que es una sustancia homogénea en su textura y color, condición debido a que los restaurantes de estos lugares cuentan con estándares de calidad que establecen el número de veces de uso del aceite. El aceite tiene un color negro, olor muy fuerte, presenta una muy poca cantidad de sólidos, es denso, poco viscoso, los recipientes generalmente presentan dos fases, una menos densa y una más densa. La fase densa presenta un color más negro, un olor mucho más fuerte y tiene una textura muy pastosa que se encuentra pegada a las paredes del recipiente plástico.

Figura 3-3: Muestra de aceite usado de fritura recolectado



Fuente: Autor

La Tabla 3-3, muestra los datos obtenidos de la caracterización física de las muestras de aceite usado que se empleara como materia prima para la producción de biodiesel.

- Caracterización química

Índice de refracción: Se conceptualiza como la razón de la velocidad de la luz, en el vacío con respecto a la velocidad de la luz en aceite a analizar, los instrumentos realmente lo que hacen es medir la relación de la velocidad de la luz aire en lugar del vacío. El índice de refracción está dentro de unos rangos para cada aceite o material, lo que sirve para identificar un tipo de aceite o investigar las alteraciones en el mismo, además que el valor

de refracción es concerniente con el grado de saturación que puede estar afectado por la reacción de oxidación que sufre el aceite.

Índice de acidez: Es el número de mg de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (Moléculas que no se encuentran unidas a una molécula de glicérido), de 1 g de aceite. Esto se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución estándar de KOH. Un valor elevado del índice muestra el alto grado de hidrólisis que ha liberado a los ácidos grasos de su enlace éster con la molécula de glicérido original. Los aceites refinados deben tener un nivel de AGL inferior al 0,2% como ácido oleico para ser aptos para su empleo a nivel alimentario.

Este índice es importante para el proceso la reacción de transesterificación, debido a que los ácidos grasos reaccionan con el catalizador de la transesterificación dando lugar a la saponificación (Jabones), conduciendo a la disminución en el rendimiento de la producción de biodiesel.

Índice de peróxido: Mide el estado de oxidación inicial de un aceite, este se asocia al enranciamiento de los aceites por lo general es un proceso natural, donde la composición de estos se altera con el tiempo, generando un cambio en las propiedades organolépticas, entre otras cosas. Cuando se menciona un cambio organoléptico se establece un cambio en el sabor, esta alteración que ha sufrido un proceso oxidativo intenso. El enranciamiento puede ser por hidrólisis o por oxidación.

Cuando se dice que es por hidrólisis los acilglicéridos de los aceites se hidrolizan liberando ácidos grasos y glicerina. Pero cuando es por oxidación el proceso consiste en la incorporación del oxígeno en el doble enlace del ácido graso insaturado (Ya sea libre o incorporado en un acilglicérido) para formar peróxidos e hidroperóxidos. Este valor se expresa en mili-equivalente de oxígeno por kilogramo (kg) de aceite (meq O_2 /kg). El índice de peróxido es un buen índice de la calidad del aceite, estableciendo que un aceite fresco debe estar por valores <1 . Los peróxidos e hidroperóxidos son compuestos relativamente estables y se transforman progresivamente en aldehídos, cetonas condición que se manifiesta en problemas de olor en el aceite.

La velocidad de oxidación aumenta por el incremento en la temperatura, a través de la exposición del oxígeno del aire, presencia de luz y contacto con materiales pro-oxidantes (Cobre, latón, bronce, etc.), además el proceso de fritura favorece este proceso en el aceite.

Índice de Yodo: Es el número de miliequivalente (meq) o partes de yodo absorbidas por 100 partes de peso de sustancia. Este índice nos permite obtener el número de insaturaciones de los AG en el aceite. Un aceite cuando se encuentra completamente saturado tendrá un índice de yodo = 0.

El valor obtenido establece una relación con el punto de fusión del aceite, tomando como condición que a mayores insaturaciones es menor el punto de fusión del aceite. Dado

que las insaturaciones de los AG se mantienen después del proceso de la alcoholisis, el punto de fusión del biodiesel está relacionado al del aceite de procedencia.

Contenido de humedad: La humedad (Agua) y otros materiales volátiles son sin duda las impurezas. El contenido de agua para los aceites refinados es <0,1%; para los aceites crudos se encuentra entre 0,1 - 0,3%.

Una cantidad de agua en el aceite produce la hidrolisis de los triglicéridos. El proceso de la hidrolisis consiste en la reacción (Rompimiento) de las uniones entre los ácidos grasos y el glicerol generando AGL, MG, DG y/o G. Este proceso se acelera en el aceite por un aumento de altas temperaturas y presión así como una cantidad excesiva de agua. Este último proceso de aceleración de la hidrolisis se ven abocados los aceites que se emplean para la preparación de los alimentos. Existen varios métodos para determinar la humedad pero por lo general se hace por el método de evaporación de la misma; otro método muy aplicado es Karl Fischer. Método que químicamente mide la cantidad de agua contenido en la muestra.

Índice de saponificación: Este se define por el número de miligramos de KOH necesario para saponificar 1 gr de aceite. Un aspecto importante es que este valor se emplea para establecer aproximadamente la masa molar promedio del aceite utilizado

Material insaponificable: Son todos los compuestos que contiene el aceite que no reaccionan con hidróxido de potasio ó de sodio para producir jabones. Dentro de estos compuestos encontramos aceites minerales, esteroides, tocoferoles y fosfolípidos, moléculas que no hacen parte de los ácidos grasos ni del glicerol pero que en general conforman el 95% de casi todos los aceites. Los compuestos no son solubles en agua pero si en solventes orgánicos usados en la determinación de esta propiedad. El valor obtenido define la cantidad aproximada de material insaponificable disuelto en el aceite.

Después de haber mencionado las características más relevantes de las pruebas en los aceites, para el desarrollo de esta parte del proyecto se analizaron las propiedades de índice de acidez, índice de saponificación, masa molar. Estas pruebas se seleccionaron por la disponibilidad de equipos en el laboratorio. Para obtener el valor ácido se empleó hidróxido de Sodio (NaOH); con una concentración 0,1 para neutralizar el aceite diluido en etanol, como indicador se utiliza fenolftaleína. Respecto a la evaluación del índice de saponificación se empleó el hidróxido de potasio al 0,5 en solución de etanol, a una temperatura igual a 60 °C durante 1 h, posteriormente la solución se valora con ácido clorhídrico (HCl) de 0,5 en la concentración. El objetivo de plantear estas dos pruebas es para obtener el masa molar del AUFS que se empleara en el desarrollo del proyecto (ecuación 1) [47].

$$M = 56.1 * 1000 * \frac{3}{IS-VA} \quad (1)$$

Donde:

M: Masa molar (g/mol)

IS: Índice de Saponificación (mg KOH/g aceite)

VA: Valor ácido (mg KOH/g aceite).

Los resultados obtenidos de la caracterización química se presentan en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Datos de la caracterización físico-química del aceite usado en el laboratorio.

Parámetro	Valor	Unidad	Norma
Densidad a 15 ^o C	921,5	kg/m ³	EN ISO 12185
Viscosidad a 40 ^o C	25,65	cSt	EN ISO 3104
Índice de acidez	7,65	mg KOH/ g aceite	EN 14104
Índice Saponificación	207,1	mg KOH/ g aceite	AOCS CD3 1993
Masa molar	843,8	g/mol	-

Fuente. Autor

Se realiza una comparación (Tabla 3-4), de los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas en el laboratorio con algunos de los reportados en la literatura.

Tabla 3-4: Comparación de datos obtenidos con datos reportados.

Parámetro	Valor Reportado [47]	Valor Obtenido	Unidades
Viscosidad Cinemática a 40 °C	40,2	25,65	cSt
Densidad a 15°C	926	921,5	kg/m ³
Índice de saponificación	193,2	207,1	mg KOH/g aceite
Valor ácido	1,7	7,65	mg KOH/g aceite
Masa molar	879	843,8	g/mol

Fuente: Autor

Es posible observar que entre los masa molar existe una pequeña diferencia o cercanía entre los datos de la tabla, a pesar de la discrepancia existente entre el índice de saponificación y el valor ácido; sin embargo, este último parámetro determina que se debe realizar un proceso de esterificación al aceite antes de utilizarlo para el proceso de producción del biodiesel debido a que el valor obtenido está por encima de casi cuatro veces al reportado y casi siete veces al valor límite máximo óptimo para el proceso.

Se espera que el aceite tenga las condiciones adecuadas para su empleo, ya que con las condiciones (Exceso de AGL) el catalizador tenderá a la neutralización de los AG o la reacción de saponificación (Formación de jabones) condiciones que son un gran problema en la producción y que es directamente proporcional con el rendimiento.

Después de haber desarrollado y establecido la caracterización del aceite, seguidamente se establecerán los factores con sus respectivos rangos y niveles condición que se encuentra soportada por datos reportados en la literatura consultada. A partir de los subtópicos mencionados en el numeral 3.1, se establecerán las condiciones mencionadas (Tabla 3-5).

Tabla 3-5: Factores y rangos y niveles de diseño

Factores		Niveles	
Nombre del factor	Rango	Niveles	Número de niveles
Relación molar aceite/alcohol mol/mol	1:543	1:5 ; 1:7	2
Porcentaje en peso de catalizador (%p/p)	0,5 – 2	0,5 ; 0,7	2
Temperatura (°C)	30 – 460	50 ; 60	2
Agente de lavado	Agua (40°C) – ácido acético	Agua (40 °C) ; ácido acético	2
Tratamientos			2*2*2*2=16

Fuente: Autor

Basado en los factores de la tabla 3-5, se establece que el modelo que se empleara para el diseño experimental es un modelo factorial 2^K , donde K son los factores y 2 representa los niveles de cada factor, que para el caso es $K = 4$. Para el diseño factorial se establece que se tiene un total 2^4 tratamientos por lo que en total se tiene 16 experimentos. Las restricciones para el experimento son la velocidad de la agitación (200 RPM), el tiempo (1 h), la presión (Atmosférica). Los demás valores planteados en la tabla anterior se han decidido tomar cercanos a los valores óptimos mencionados en la selección de variables y observar que ocurre con valores cercanos a los datos óptimos y si la variación es significativa en el rendimiento obtenido en el proceso de producción. Para el desarrollo experimental se utilizara la técnica de contraste de Yate. Esta técnica establece que para cada factor debe existir un nivel alto (+) y un nivel bajo (-). (Tabla 3-6).

Tabla 3-6: Niveles de los factores.

Nombre del Factor	Nivel Alto (+)	Nivel Bajo (-)
Relación molar aceite/alcohol mol/mol	1:7	1:5
Porcentaje en peso de catalizador (%p/p)	0,7	0,5
Temperatura (°C)	60	50
Agente de lavado	Ácido acético	Agua (40°C)

Fuente: Autor

Posteriormente se plantea una matriz de combinación de tratamientos. En esta se establece la numeración del ensayo, combinación de los tratamientos y los factores de diseño (Relación molar aceite/alcohol (A), %p/p de catalizador (B), Temperatura (C), agente de lavado (D)). En este último elemento de la matriz se designa el nivel para cada combinación, definiendo que el factor positivo es el evaluado y el factor negativo para los que no se estén relacionando. Para los tratamientos que tengan los niveles mas bajos se denota con uno "(1)" a su vez que este sería ensayo que tendría la posición uno y el último ensayo tendría el nivel más alto (Tabla 3-7).

Tabla 3-7: Matriz de combinación de tratamientos.

Ensayo	Combinación de tratamientos	Factores			
		A	B	C	D
1	(1)	-	-	-	-
2	A	+	-	-	-

Ensayo	Combinación de tratamientos	Factores			
		A	B	C	D
3	B	-	+	-	-
4	C	-	-	+	-
5	D	-	-	-	+
6	AB	+	+	-	-
7	AC	+	-	+	-
8	AD	+	-	-	+
9	BC	-	+	+	-
10	BD	-	+	-	+
11	CD	-	-	+	+
12	ABC	+	+	+	-
13	ABD	+	+	-	+
14	ACD	+	-	+	+
15	BCD	-	+	+	+
16	ABCD	+	+	+	+

Fuente: Autor.

Después se construyó la combinación de tratamientos con sus respectivos datos en cada factor (Tabla 3-8).

Tabla 3-8: Matriz de combinación de tratamientos para la producción de biodiésel en el laboratorio.

Ensayo	Combinación de tratamientos	Factores			
		A	B	C	D
1	(1)	1:5	0,5	50	Agua (40 °C)
2	A	1:7	0,5	50	Agua (40 °C)
3	B	1:5	0,7	50	Agua (40 °C)
4	C	1:5	0,5	60	Agua (40 °C)
5	D	1:5	0,5	50	Ácido acético
6	AB	1:7	0,7	50	Agua (40 °C)
7	AC	1:7	0,5	60	Agua (40 °C)
8	AD	1:7	0,5	50	Ácido acético
9	BC	1:5	0,7	60	Agua (40 °C)
10	BD	1:5	0,7	50	Ácido acético
11	CD	1:5	0,5	60	Ácido acético
12	ABC	1:7	0,7	60	Agua (40 °C)
13	ABD	1:7	0,7	50	Ácido acético
14	ACD	1:7	0,5	60	Ácido acético
15	BCD	1:5	0,7	60	Ácido acético
16	ABCD	1:7	0,7	60	Ácido acético

Fuente: Autor.

Para desarrollar la técnica de Yates se tienen las siguientes consideraciones para la construcción de la tabla para el cálculo de contraste (Tabla 3-9):

- Colocar las combinaciones del tratamiento en el respectivo orden estándar.
- Seguidamente se colocan una columna marcada (1), esta columna se encuentra dividida en dos iguales una parte superior y una parte inferior. Los datos de parte superior o la mitad de (1) se toman sumando los dos primeros datos de la combinación de tratamiento ((1)+A), el siguiente dato de esta misma columna se obtiene tomando los dos siguientes datos (B+AB); de esta forma se completara los demás resultados. Para la otra mitad inferior se procede de la misma forma explicada anteriormente pero el resultado es la diferencia entre estos (A-(1)) y se continua con este método hasta obtener todos los resultados de la columna (1)

- Posteriormente se adiciona al lado derecho de (1) una columna que se denominara (2), para conseguir los datos de esta columna, se repite de la misma forma descrita con que se obtuvieron los datos de la columna (1).
- Los métodos mencionados con anterioridad se deben repetir hasta que se tenga k columnas para un experimento 2^k . Un aspecto para poder identificar cual es esa k columna es que el primer dato de la columna k será el gran total de los resultados del experimento. Cada número siguiente será un contraste en los totales de los tratamientos. [84].

Tabla 3-9: Desarrollo del método de YATES para un experimento 2^4 factorial.

Combinación de tratamientos	(1)	(2)	(3)	Identificación
(1)	(1)+A	(1)+A+B+AB	(1)+A+B+AB+C+AC+BC+ABC	Total
A	B+AB	C+AC+BC+ABC	D+AD+BD+CD+ABD+ACD+BCD+ABCD	Contraste A
B	C+AC	D+AD+BD+ABD	A-(1)+AB-B+ AC-C+ABC-BC	Contraste B
AB	BC+ABC	CD+ACD+BCD+ABCD	AD-D+ABD-BD+ACD-CD+ABCD-BCD	Contraste AB
C	D+AD	A-(1)+AB-B	B+AB-(1)-A+BC+ABC-C-AC	Contraste C
AC	BD+ABD	AC-C+ABC-BC	BD+ABD-D-AD+BCD+ABCD-ABD-CD	Contraste AC
BC	CD+ACD	AD-D+ABD-BD	AB-B-A+(1)+ABC-BC-AC+C	Contraste BC
ABC	BCD+ABCD	ACD-CD+ABCD-BCD	ABD-BD-AD+D+ABCD-BCD-ACD+CD	Contraste ABC
D	A-(1)	B+AB-(1)-A	C+AC+BC+ABC-(1)-A-B-AB	Contraste D
AD	AB-B	BC+ABC-C-AC	CD+ACD+BCD+ABCD-D+AD-BD-ABD	Contraste AD
BD	AC-C	ABD+BD-D-AD	AC-C+ABC-BC-A+(1)-AB+B	Contraste BD
ABD	ABC-BC	ABCD+BCD-CD-ACD	ACD-CD+ABCD-BCD-AD+D-ABD+BD	Contraste ABD
CD	AD-D	AB-B-A+(1)	BC+ABC-C-AC-B-AB+(1)+A	Contraste CD
ACD	ABD-BD	ABC-BC-AC+C	BCD+ABCD-CD-ACD-BD-ABD+D+AD	Contraste ACD
BCD	ACD-CD	ABD-BD-AD+D	ABC-BC-AC+C-AB+B+A-(1)	Contraste BCD
ABCD	ABCD-BCD	ABCD-BCD-ACD+CD	ABCD-BCD-ACD+CD+ABD+BD+AD-D	Contraste ABCD

Fuente: [84]

Por último la suma de cuadrados de los efectos principales y los efectos de interacción se obtienen elevando al cuadrado las entradas en la columna k y dividiendo entre $2^k n$. Donde n es el número de réplicas y 2^k es la suma de los cuadrados de los coeficientes de los contrastes individuales

Seguidamente se valora el rendimiento de acuerdo con las combinaciones de los tratamientos, estableciendo que se efectuará un ensayo por cada tratamiento. Con los datos correspondientes a la variable de respuesta (Rendimiento de biodiesel), se genera el análisis estadístico obteniendo una tabla de análisis de varianza (ANOVA), la cual proporcionará las condiciones más adecuadas para cada uno de los factores y a su vez permite establecer que pruebas son las más óptimas. La construcción del ANOVA se elaboró por medio del diseño de experimento (DOE) factorial (Anexo D), la cual se puede resumir en que la suma de cuadrados de los efectos principales (Un factor) y los efectos de interacción entre dos, tres y cuatro factores se obtienen elevando al cuadrado las

entradas en la columna k y dividiendo entre $2^k n$. Donde n es el número de réplicas y 2^k es la suma de los cuadrados de los coeficientes de los contrastes individuales, y junto a los datos requeridos en la tabla de varianzas para el diseño (Anexo E). En la tabla de varianzas cada efecto principal o la interacción entre los efectos se requiere determinar un grado de libertad (Ver ecuación 3-2)

$$GL_i = N^{\circ}_{Niveles} - 1 \quad (3-2)$$

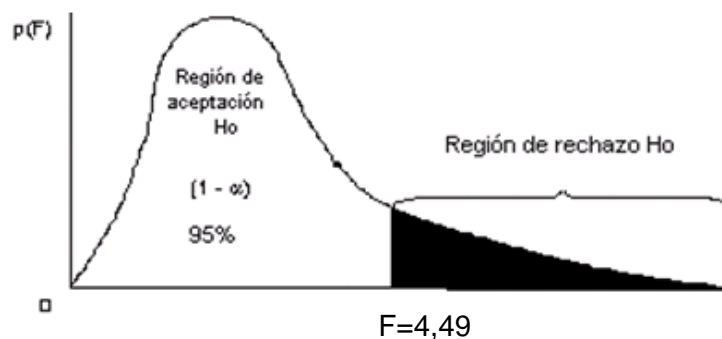
Donde:

i : Es cualquier combinación de tratamientos

$N^{\circ}_{Niveles}$: 2. Porque se plantea un nivel alto y un nivel bajo.

Para establecer que interacciones de las variables tiene un alto significado en la producción de biodiesel, se determina el valor crítico 0.05 para una distribución F (f) con 1 y 16 grados de libertad para cada una de las fuentes de variación y se compara con un dato de la tabla F para $\alpha = 0.05$. $f_{(0.05, 1, 16)} = 4,49$, con esto se puede establecer en que región se encuentra cada tratamiento; es decir, que datos que estén en la región probable aceptan la hipótesis (H_0) o datos que se encuentren en la región crítica se rechaza la hipótesis (H_0). Observar la figura 3-4.

Figura 3-4: Grafica de Distribución F



Es necesario plantear las hipótesis para cada uno de los ensayos (Anexo F) y a partir del gráfico y el valor de F , se puede establecer en que área se encuentra la hipótesis.

3.3 Desarrollo del diseño de experimentos.

Se desarrollará en dos partes, la primera en la especificación de la cantidad de los reactivos para la ejecución del experimento y la segunda parte que trata todo lo relacionado en el montaje experimental en el laboratorio.

3.3.1 Cantidad de reactivos

Los reactivos a los cuales se le determinarán sus cantidades son:

- Aceite usado de fritura de soja.

Cada ensayo empleara 200 mL de aceite. La cantidad es la misma para todas las corridas, este volumen está determinado por el volumen máximo admisible del reactor existe en el laboratorio. El reactor tiene una capacidad de 500 mL.

- Etanol (C₂H₆O)

La proporción de alcohol está en función de la relación molar aceite/alcohol planteadas en la tabla 3-5; lo cual especifica que la cantidad variara según la relación. El etanol es reactivo del (96%) y el proveedor es Alquímicos.

La primera condición que se debe identificar para calcular la cantidad de etanol es determinar la masa promedio de ácidos grasos y la masa promedio de triglicéridos. Un aspecto en esta parte es identificar cual es la naturaleza del aceite usado. Como se mencionó anteriormente el aceite usado de fritura es marca Z y este aceite tiene como aceite principal el aceite de soja. Según los datos obtenidos (Tabla 2-6) en la revisión bibliográfica, se extrae (Tabla 3-10), de la composición en %p/p de ácidos grasos que tiene el aceite de soja y los datos del AG y TG.

Tabla 3-10: Composición de ácidos grasos del aceite usado de fritura de soja

Ácidos grasos	Formula	Aceite usado de fritura de Soja				
		Contenido % p/p	Masa molar AG (g/mol)	Masa molar TG (g/mol)	Masa molar AG (g/mol)	Masa molar TG (g/mol)
Mirístico (C14:0)	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	0,1	228,37	723,1	0,23	0,72
Palmítico (C16:0)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	12,2	256,42	807,27	31,28	98,49
Esteárico (C18:0)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2,5	284,48	891,43	7,1	22,29
Oléico (C18:1)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	21,5	282,46	885,39	60,73	190,36
Linoléico (C18:2)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	56,6	280,44	879,34	158,73	497,8
Linolénico (C18:3)	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	7,1	278,43	873,29	19,77	62
Total	-	100	-	-	277,8	871,7

Fuente: Autor

Se determina la masa molar (M) de cada uno de los ácidos grasos (ecuación 3-3) de los cuales está compuesto el aceite.

$$M_{AG \text{ Mirístico}} = (M_{\text{Carbono}} \times N^{\circ} \text{Carbonos}) + (M_{\text{Hidrogeno}} \times N^{\circ} \text{Hidrogenos}) + (M_{\text{Oxigeno}} \times N^{\circ} \text{Oxigenos}) \dots \dots (3-3)$$

$$M_{AG \text{ Mirístico}} = \left(12,011 \frac{g}{mol} \times 14\right) + \left(1,00794 \frac{g}{mol} \times 28\right) + \left(15,9994 \frac{g}{mol} \times 2\right)$$

$$M_{\text{Mirístico}} = 228,37 \text{ g/mol}$$

Posteriormente se determina la masa molar de cada uno de los triglicérido (TG) (ecuación 3-4), que componen el aceite:

$$M_{TG} = ((M_{AG} - 1) * 3) + 41 \dots \dots \dots (3-4)$$

$$M_{TG \text{ laurico}} = ((228,37 \text{ g/mol} - 1) * 3) + 41 = 723,1 \text{ g/mol}$$

Obtenidos todos las M_{TG} se determinara la masa exacta del AG y del TG en el aceite (ecuación 3-5).

$$M_{TG} = M_{TG} \times \frac{\% p/p_{TG}}{100} \dots \dots \dots (3-5)$$

$$M_{AG} = 228,37 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{0,1}{100} = 0,23 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$M_{TG} = 723,1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{0,1}{100} = 0,72 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Al conseguir todas las masas molares exactas se obtiene el promedio AG y TG para el aceite usado de fritura de soja (AUFS), (Tabla 3-11).

Tabla 3-11: Masas molares promedio del ácido graso y triglicérido para el aceite usado de soja.

AG	Formula	AUFS		
		Contenido %p/p	Masa molar AG (g/mol)	Masa molar TG (g/mol)
Mirístico (C14:0)	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	0,1	0,23	0,72
Palmítico (C16:0)	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	12,2	31,28	98,49
Esteárico (C18:0)	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2,5	7,1	22,29
Oléico (C18:1)	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	21,5	60,73	190,36
Linoléico (C18:2)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	56,6	158,73	497,8
Linolénico (C18:3)	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	7,1	19,77	62
Total	-	100	277,8	871,7

Fuente: Autor

Adquiridos los datos de la masa molar del aceite, además de los datos anteriores se requiere calcular la densidad del aceite usado. Para medir la densidad del líquido se hace la siguiente operación:

Realizar las mediciones de las masas de los picnómetros (Tabla 3-12):

Tabla 3-12: Pesado de los picnómetros.

Pesado	Medición
Picnómetro vacío	17,44 g
Picnómetro con el aceite usado de soja	26,56 g

Fuente: Autor

Posteriormente se realiza la diferencia entre el picnómetro lleno y el picnómetro vacío; el valor obtenido será la masa del aceite usado de soja. El promedio de la masa de aceite

usado de soja es 9,21 g. Para este ensayo se empleó un volumen de 9,90 mL. Luego se determinará la densidad del aceite (ρ) (ecuación 3-6):

$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(3-6)$$

Donde:

m = masa; V = Volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{9,21 \text{ g}}{10 \text{ mL}} = 0,921 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \text{ ó } 921 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Con los datos ya determinados se puede comenzar con el cálculo de las cantidades de los reactivos (Catalizador, alcohol), requeridos para la alcoholisis:

El primer reactivo que se trabajará será el etanol para este caso según el diseño de experimentos se emplearán dos relaciones molares 1:5; 1:7. El siguiente procedimiento se desarrollará solo para la primera relación planteada ya que el mismo proceso se efectuara para la otra relación, por lo cual de la segunda solo se darán los resultados. Los pasos que se desarrollan son:

Determinar la cantidad del volumen de aceite para un mol de aceite (ecuación 3-7):

$$\rho_{\text{Aceite}} = \frac{M_{TG}}{V_{\text{aceite}}} = V = \frac{M_{TG}}{\rho_{\text{Aceite}}} \dots\dots\dots(3-7)$$

$$V_{\text{aceite}} = \frac{M_{TG}}{\rho_{\text{Aceite}}} = \frac{871,7 \text{ g}}{0,921 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = 946,5 \text{ mL}$$

Después la cantidad del volumen de etanol para un mol de etanol a partir de la ecuación 3-7:

$$\rho_{\text{Etanol}} = \frac{M_{\text{Etanol}}}{V_{\text{Etanol}}} = V_{\text{Etanol}} = \frac{M_{\text{Etanol}}}{\rho_{\text{Etanol}}}$$

Donde: $M_{\text{Etanol}} = 46,06844 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$; $\rho_{\text{Etanol}} = 789,00 \text{ kg/m}^3$ ó $0,789 \text{ g/mL}$

$$V_{\text{etanol}} = \frac{46,06844 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0,789 \text{ g/mL}} = 58,39 \text{ mL}$$

Con la relación estequiométrica (ecuación 3-8), se determina la cantidad de etanol para 200 mL de aceite usado de soja. La condición de la cantidad de aceite que se estableció se clarifica en el numeral 3.3.1.

$$V_{\text{Aceite definido}} \times \frac{1 \text{ mol aceite}}{V_{\text{aceite}}} \times \frac{5 \text{ mol Etanol}}{1 \text{ mol aceite}} \times \frac{V_{\text{etanol}}}{1 \text{ mol Etanol}} \dots\dots\dots(3-8)$$

$$200 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ mol aceite}}{946,5 \text{ mL}} \times \frac{5 \text{ mol Etanol}}{1 \text{ mol aceite}} \times \frac{58,39 \text{ mL}}{1 \text{ mol Etanol}} = 61,69 \text{ mL de etanol}$$

El cálculo de la estequiometría establece que para un volumen de 200 mL de AUFS y una relación molecular de 1 mol de aceite y 5 moles de etanol se requiere un volumen de 61,7 mL de etanol para obtener una reacción completa. Para la segunda relación molar

(1:7), se requiere una volumen de 86,4 mL para que se produzca una reacción completa de transesterificación.

- Catalizador (NaOH)

La cantidad de catalizar es también una proporción variable en los ensayos ya que depende del porcentaje que se determine según los cálculos estequiométricos. Según el DOE se emplearan dos porcentajes en peso de catalizador (0,5 y 0,7). El NaOH es en escamas con una pureza del 98%. Adquirido en Alquimicos. El siguiente procedimiento se desarrollara solo para el caso de 0,5 %p/p establecido, ya que el mismo proceso se efectuara para calcular el 0,7 %p/p por lo cual de este solo se mencionara el resultado. La cantidad de NaOH está dado por:

Para calcular el 0,5 %p/p del NaOH que se necesita para la reacción (ecuación 3-9 y ecuación 3-10):

$$m_{NaOH} = m_{aceite} \times \text{porcentaje catalizador} \dots\dots\dots(3-9)$$

Donde:

$$m_{aceite} = V_{Aceite} \times \rho_{aceite} \dots\dots\dots(3-10)$$

$$m_{aceite} = 200 \text{ mL} \times 0,921 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 184,2 \text{ g}$$

Remplazar:

$$m_{NaOH} = 184,3 \text{ g} \times 0,5 \% = 0,921 \text{ g de NaOH}$$

Determinar el exceso de NaOH. Esta cantidad tiene la finalidad de neutralizar los ácidos grasos libres contenido en la fase esterificada. Con la siguiente relación estequimétrica se determina este exceso (ecuación 3-11):

$$m_{aceite} \times \frac{\% \text{ AGL}}{100 \%} \times \frac{1 \text{ mol}_{AG}}{M_{AG}} \times \frac{1 \text{ mol}_{NaOH}}{1 \text{ mol}_{AG}} \times \frac{M_{NaOH}}{1 \text{ mol}_{NaOH}} \dots\dots\dots(3.11)$$

Donde: $M_{NaOH} = 39,997 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$; $\rho_{NaOH} = 2,13 \text{ g/mL}$

$$184,2 \text{ g} \times \frac{4,6}{100} \times \frac{1 \text{ mol}_{AG}}{277,8 \text{ g/mol}} \times \frac{1 \text{ mol}_{NaOH}}{1 \text{ mol}_{AG}} \times \frac{39,997 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol}_{NaOH}} = 1,22 \text{ g de NaOH}$$

El cálculo total de NaOH ((T_{NaOH}) ecuación 3-12):

$$T_{NaOH} = m_{NaOH \text{ al } 0,5\%} + \text{Exceso}_{NaOH} \dots\dots\dots(3-12)$$

$$T_{NaOH} = 0,921 \text{ g} + 1,22 \text{ g} = 2,1 \text{ g}$$

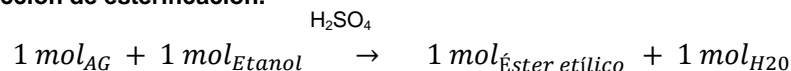
La cantidad de NaOH es de 2,1 g y como solvente de este compuesto se empleara 61,7 mL de etanol anhidro. El peso del NaOH es necesario para la estequiometria de la reacción de transesterificación que se efectuará para un volumen de 200 mL de aceite

usado de soja y una relación molecular de 1:5, para obtener una reacción completa. Para el otro porcentaje (0,7%) peso se requiere (1:7), un peso de 2,5 g de NaOH se requiere produzca una reacción total y como solvente emplea es el etanol anhidro.

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La cantidad de catalizador es también una proporción variable en los ensayos ya que depende del porcentaje que se determine para las corridas. La importancia de la determinación de catalizador es lograr disminuir el índice de acidez en el aceite usado de fritura de soja (7,65 mg KOH/g) obtenido de las muestras de aceite. El proceso estequiométrico de la reacción de esterificación se muestra en la figura 3-5.

Figura 3-1: Reacción de esterificación.



Fuente: autor

El H_2SO_4 empleado en la reacción es del (98%). Adquirido en Alquimicos. Para determinar la cantidad de H_2SO_4 se emplea el siguiente procedimiento:

Lo primero es establecer la cantidad de aceite empleado y después calcular la cantidad de reactantes. Para este caso 200 mL de aceite usado.

Después se calcula la masa de aceite despejando la ecuación 3-6:

$$\rho = \frac{m}{V} = m = \rho \times V$$

$$m_{aceite} = 0,921 \frac{g}{mL} \times 200 \text{ mL} = 184,2 \text{ g}$$

Calcular el 0,5 % p/p de la masa de H_2SO_4 que se necesita para la reacción (ecuación 3-13).

$$m_{H_2SO_4} = m_{aceite} \times \text{porcentaje catalizador} \quad (3-13)$$

Remplazar:

$$m_{H_2SO_4} = 184,2 \text{ g} \times 0,5 \% = 0,921 \text{ g}$$

Determinar el exceso de H_2SO_4 . Esta cantidad tiene la finalidad servir como catalizador y permitir la transformación de los AGL a esteres (reacción de esterificación), disminuyendo la proporción de AGL en el aceite. Con la siguiente relación estequiométrica se determina este exceso (ecuación 3-11):

$$m_{aceite} \times \frac{\% AGL}{100 \%} \times \frac{1 \text{ mol}_{AG}}{M_{AG}} \times \frac{1 \text{ mol}_{H_2SO_4}}{1 \text{ mol}_{AG}} \times \frac{M_{H_2SO_4}}{1 \text{ mol}_{H_2SO_4}}$$

Donde: $M_{H_2SO_4} = 98,079 \text{ g/mol}$; $\rho_{H_2SO_4} = 1,84 \text{ g/mL}$

$$184,2 \text{ g} \times \frac{7,65}{100} \times \frac{1 \text{ mol}_{AG}}{277,8 \text{ g/mol}} \times \frac{1 \text{ mol}_{H_2SO_4}}{1 \text{ mol}_{AG}} \times \frac{98,079 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol}_{H_2SO_4}} = 4,98 \text{ g de } H_2SO_4$$

El cálculo total de ácido sulfúrico ((T_{H₂SO₄}) ecuación 3-12):

$$T_{H_2SO_4} = m_{H_2SO_4 \text{ al } 0,5\%} + Exceso_{H_2SO_4}$$

$$T_{H_2SO_4} = 0,921 \text{ g} + 4,98 \text{ g} = 5,9 \text{ g}$$

Calculo del volumen de H₂SO₄ despejando la ecuación 3-6:

$$\rho_{H_2SO_4} = \frac{m_{H_2SO_4}}{V_{H_2SO_4}} = V_{H_2SO_4} = \frac{m_{H_2SO_4}}{\rho_{H_2SO_4}}$$

$$V_{H_2SO_4} = \frac{5,9 \text{ g}}{1,84 \text{ g/mL}} = 3,20 \text{ mL}$$

Calculo de las moles de aceite (ecuación 3-14):

$$n_{Aceite} = \frac{m_{aceite}}{M_{aceite}} \quad (3-14)$$

$$n_{Aceite} = \frac{184,2 \text{ g}}{871,7 \text{ g/mol}} = 0,21 \text{ mol}$$

Para los cálculos de moles de etanol a emplear se establece la siguiente relación:

$$1 \text{ mol}_{AG} \rightarrow 1 \text{ mol}_{Etanol}$$

$$0,21 \text{ mol} \rightarrow x$$

Despejamos:

$$X_{mol \text{ etanol}} = \frac{0,21 \text{ mol} \times 1 \text{ mol}_{Etanol}}{1 \text{ mol}_{aceite}} = 0,21 \text{ mol}_{Etanol}$$

Calcular la masa de etanol despejando la ecuación 3-14:

$$n_{Etanol} = \frac{m_{Etanol}}{M_{Etanol}} = m_{Etanol} = n_{Etanol} \times M_{Etanol}$$

$$m_{Etanol} = 0,21 \text{ mol}_{Etanol} \times 43,068 \text{ g/mol}_{Etanol} = 9,10 \text{ g}$$

Calcular volumen de C₂H₆O

$$\rho_{Etanol} = \frac{m_{Etanol}}{V_{Etanol}} = V_{Etanol} = \frac{m_{Etanol}}{\rho_{Etanol}}$$

$$V_{Etanol} = \frac{9,10 \text{ g}}{0,789 \text{ g/mol}} = 11,5 \text{ mL}$$

Calcular el volumen total de etanol para la relación molar 1:5.

$$V_{T. Etanol} = 11,5 \text{ mL} \times 5 = 57,5 \text{ mL}$$

La cantidad de H_2SO_4 es de 3,20 mL en volumen necesario para la estequiometría de la reacción de esterificación que se efectuara para un volumen de 200 mL de aceite usado de soja y una relación molecular de 1:5, etanol de 57,5 mL para obtener una reacción completa. Para el porcentaje de 0,7 %p/p y relación molar (1:7), se requiere un volumen de 3,40 mL de H_2SO_4 se requiere produzca una reacción total empleando un volumen de etanol de 80,8 mL y 200 mL aceite usado.

- Ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$)

Depende del porcentaje de catalizador para cada corrida. Esta sustancia se adiciona al proceso, al finalizar el tiempo de reacción con la finalidad de bloquear la reacción, en promedio este se deja actuar por término de 5 min en el producto. El ácido acético empleado es de tipo glacial (99%). Adquirido en Alquimicos.

Determinar la masa de ácido acético para un porcentaje de catalizador de 0,5% en peso. Esto se determina a partir de la siguiente relación estequiométrica (ecuación 3-14).

$$m_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2} = m_{\text{NaOH}} \times \frac{1 \text{ mol}_{\text{NaOH}}}{M_{\text{NaOH}}} \times \frac{1 \text{ mol}_{\text{Á. acético}}}{1 \text{ mol}_{\text{NaOH}}} \times \frac{M_{\text{Á. acético}}}{1 \text{ mol}_{\text{Á. acético}}} \dots\dots\dots(3-14)$$

Donde: $M_{\text{Á. acético}} = 60,05 \text{ g/mol}$; $\rho_{\text{Á. acético}} = 1,05 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ó $1,05 \frac{\text{g}}{\text{mL}}$

Remplazar:

$$m_{\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2} = 0,921 \text{ g de NaOH} \times \frac{1 \text{ mol}_{\text{NaOH}}}{39,997 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \times \frac{1 \text{ mol}_{\text{Á. acético}}}{1 \text{ mol}_{\text{NaOH}}} \times \frac{60,05 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol}_{\text{Á. acético}}} = 1,38 \text{ g de C}_2\text{H}_4\text{O}_2$$

Luego obtenemos el volumen de $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$:

$$\rho_{\text{Á. acético}} = \frac{m_{\text{Á. acético}}}{V_{\text{Á. acético}}} = V_{\text{Á. acético}} = \frac{m_{\text{Á. acético}}}{\rho_{\text{Á. acético}}}$$

$$V_{\text{Á. acético}} = \frac{1,38 \text{ g}}{1,05 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = 1,3 \text{ mL}$$

Un aspecto importante es que ácido acético se comercializa con una concentración del 99%, el volumen se divide en este porcentaje, obteniendo:

$$V_{\text{Á. acético}} = \frac{1,3 \text{ g}}{0,99} = 1,3 \text{ mL}$$

Para el caso del porcentaje de catalizador de 0,5% en peso, se requiere de ácido acético un volumen de 1,3 mL, para poder neutralizar la reacción de transesterificación y para el caso del porcentaje de catalizador de 0,7 %p/p, se requiere de ácido acético un volumen de 1,9 mL, para neutralizar la reacción de alcoholisis.

Después de calculados los datos o cantidad de cada uno de los reactivos que emplearan en el proceso de producción del biodiesel se muestran (Tabla 3-13).

Tabla 3-13: Cantidad de Reactivos para el proceso de producción de biodiesel a nivel laboratorio.

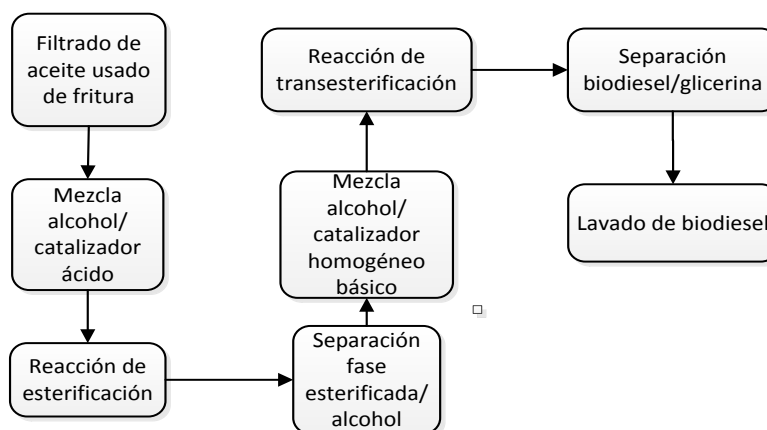
Reactivos	Cantidad	
Aceite usado de fritura	200 mL	
C ₂ H ₆ O	1:5	1:7
	61,7 mL	86,4 mL
NaOH	0,5 %p/p	0,7 %p/p
	2,1 g	2,5 g
H ₂ SO ₄	0,5 %p/p	0,7 %p/p
	3,2 mL	3,4 mL
C ₂ H ₄ O ₂	0,5 %p/p	0,7 %p/p
	1,3 mL	1,9 mL

Fuente: Autor

3.3.2 Montaje experimental de la producción de biodiesel en el laboratorio

El montaje experimental para la fabricación del biodiesel se efectuó en el laboratorio de la biocombustibles líquidos ubicado en el edificio de Química de la Universidad Nacional de Colombia, donde se desarrollaron las siguientes etapas: El primer proceso fue la filtración del aceite usado, luego se realizó la mezcla del alcohol/catalizador homogéneo ácido (H₂SO₄), luego se efectúa la reacción de esterificación, seguido de la separación de la fase esterificada y el exceso de alcohol, a continuación se realiza la preparación de la mezcla de alcohol/catalizar básico (NaOH), seguida de la reacción de transesterificación (Fase esterificada mezclada con alcohol/catalizador básico), después se efectuó la separación del biodiesel y glicerina, consecutivamente se realiza el lavado. En la figura 3-5 se observa un diagrama de proceso general donde se resume los pasos mencionados anteriormente para la obtención del biodiesel en el laboratorio.

Figura 3-5: Diagrama de proceso general de producción de biodiesel a escala laboratorio.

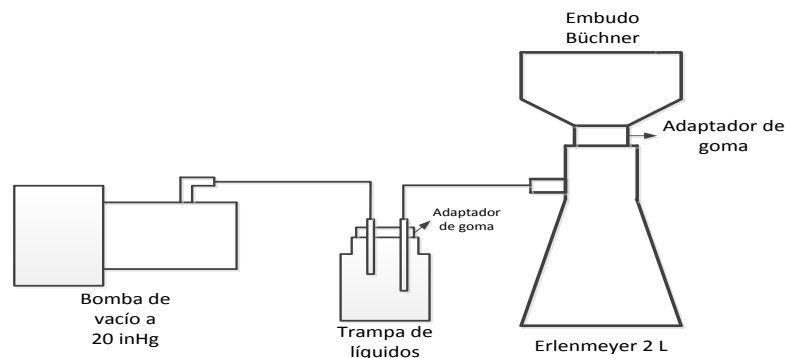


Fuente: Autor.

- Filtración de aceite usado de fritura.

Se realizó la filtración de 4 L del AUF. Para este proceso se empleó una bomba de vacío a una presión de 20 inHg con el propósito de acelerar la filtración por gravedad, la succión se realiza del lado del Erlenmeyer con el fin de forzar el paso de la solución por medio del papel filtro. El papel filtro empleado para el proceso fue de 5 micras (μ). En la figura 3-6, se puede apreciar el esquema del montaje efectuado para realizar el proceso de filtrado.

Figura 3-6: Esquema de montaje del proceso de filtrado del aceite usado de fritura



Fuente: Autor.

- Mezclado de alcohol/catalizador homogéneo ácido

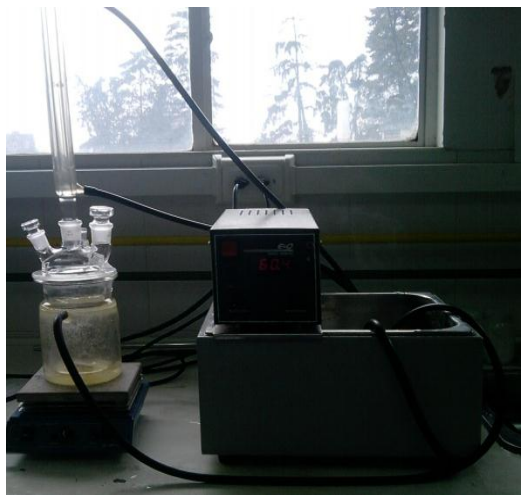
Se miden los volúmenes establecidos para el etanol y H_2SO_4 , luego se adiciona en proporciones de 3 mL de ácido al alcohol hasta completar la medida establecida. La disolución del ácido sobre el alcohol debe ser con una agitación lenta y controlada teniendo en cuenta que este proceso genera una reacción muy exotérmica en algunos casos si se agrega demasiada cantidad de ácido el alcohol no puede absorber el calor produciendo una reacción muy violenta (Ebullición instantánea y repentina del ácido) dando lugar a salpicaduras violentas.

- Reacción de esterificación

Para la reacción se empleó un reactor de cuatro bocas de capacidad de 500 mL, un agitador magnético, una plancha de agitación, un baño de termostato con controlador de temperatura, un termómetro y un condensador lineal. En la figura 3-7, se puede observar el montaje efectuado en esta etapa.

El proceso que se realizó fue cargar el aceite filtrado al reactor, este se calienta a una temperatura adecuada para el ensayo según el diseño, instantáneamente se activa el sistema a 200 RPM, después de obtenida la temperatura en el aceite se adiciona la solución de etanol-catalizador ácido, se debe garantizar que todas las bocas del reactor y condensador estén selladas, además de esperar la solución obtenga de nuevo la temperatura planteada para el ensayo seguidamente se deja la reacción por un tiempo de 60 min según los datos planteados del diseño.

Figura 3-7: Montaje del proceso de esterificación.



Fuente: Autor

- Separación de la fase esterificada, exceso de alcohol y agua

Para esta fase se empleó un embudo de separación de 500 mL. Este proceso consistió en que después de finalizado el tiempo de reacción, el producto obtenido es vertido al embudo y después es dejado por un tiempo de 12 h para obtener con seguridad una buena separación entre las fases generadas. En la figura 3-8, se muestra la separación de las fases.

Figura 3-8: Separación de fases del proceso de esterificación.



Fuente: Autor

- Mezclado de alcohol/catalizador homogéneo básico

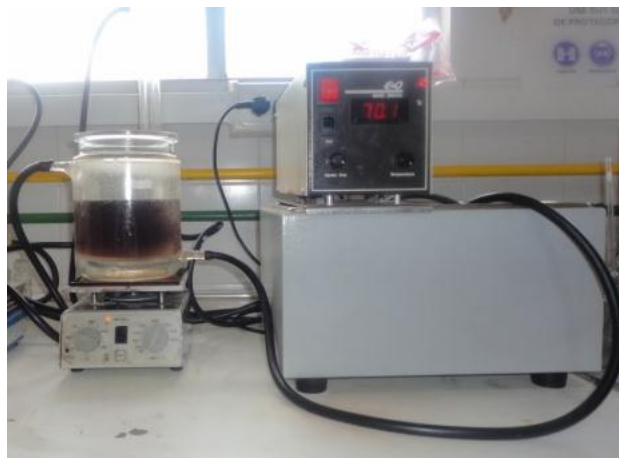
Se mide el volumen de alcohol definido para el ensayo, posteriormente se pesa la proporción de NaOH requerido, luego se adiciona el catalizador al etanol. Para lograr la disolución del catalizador se emplea una plancha magnética a una temperatura de 40 °C y un agitador magnético a 500 RPM.

- Reacción de transesterificación

Para este proceso se emplearon los mismos equipos del proceso de esterificación, efectuando el mismo montaje y las mismas condiciones de velocidad de agitación y tiempo de reacción.

El proceso para el desarrollo de la reacción es cargar en el reactor de 200 mL de fase esterificada, se debe calentar hasta la temperatura de reacción definida para el ensayo en cuestión, al conseguir esta temperatura se debe verter la mezcla de etanol/NaOH producida en la etapa anterior al balón (Conservando su temperatura), cuando se alcance la temperatura de reacción del ensayo, se dejara efectuar la reacción por tiempo de 1 h, luego se agrega la proporción de ácido acético determinada para neutralizar la reacción. Esto se deja con las mismas condiciones por un periodo de 15 min más deteniendo el sistema de agitación y temperatura. En la figura 3-9 se puede ver el montaje de la producción de biodiesel en el laboratorio.

Figura 3-9: Montaje de la producción de biodiesel en el laboratorio.



Fuente: Autor

- Separación de biodiesel y glicerina

Esta etapa se efectuó de la misma forma que el proceso de separación de la fase esterificada descrita anteriormente. En la figura 3-10 se puede observar los productos obtenidos por el proceso de decantación.

- Lavado de biodiesel

Después de realizar la separación de las fases, el biodiesel debe lavarse para purificarse y alcanzar la mayor concentración de etil ésteres. El lavado tiene la función de eliminar trazas de glicerol, catalizador, alcohol, jabones o gomas que pueden no haber reaccionado, este proceso se debe efectuar hasta lograr neutralizar. El biodiesel se lava por dos formas según el planteamiento del DOE.

Un lavado se realiza con agua a 40 °C, el volumen que se emplea de agua es la tercera parte del volumen de biodiesel obtenido. El volumen de agua empleado se dividió

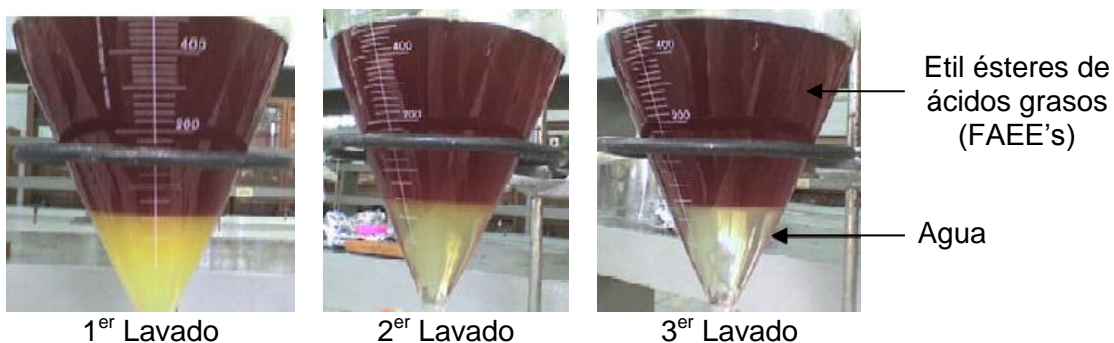
efectuando tres lavados. Un aspecto importante es que la vertida del agua en el biodiesel debe ser lento para que puede tener un contacto homogéneo con todo el biocombustible y así pueda arrastrar al fondo del balón las trazas de las impurezas, posteriormente se dejara separar las fases por lo cual no se puede establecer un tiempo; este proceso se repite tres veces. En la figura 3-11, se puede observar algunas imágenes de la etapa en mención.

Figura 3-10: Decantación de los etil éster de ácidos grasos producidos a partir de aceites de fritura de soja.



Fuente: Autor

Figura 3-11: Proceso de lavado del biodiesel con agua a 40 °C.



Fuente: Autor.

El otro lavado efectuado a algunos de los ensayos fue con ácido acético, el volumen del agente de lavado se utilizó en dos lavados y posteriormente se efectuó un tercer lavado con agua desionizada. En cada lavado se debe dejar un tiempo aproximado de 12 h, para dejar separar las fases y después se extrae el agente de lavado, obteniendo así el biodiesel. (Ver figura 3-12).

Figura 3-12: Biodiesel producido a partir de aceite de fritura de soja.



Fuente: Autor.

3.4 Análisis de la calidad y rendimiento del biodiesel producido.

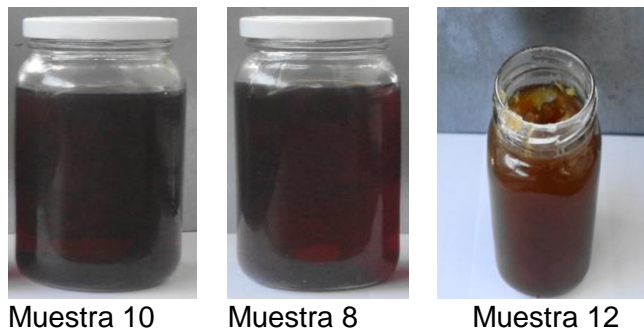
En esta parte se plantearán el análisis de los resultados del biodiesel obtenido. Este análisis se planteará de forma cualitativa y cuantitativa.

3.4.1 Análisis cualitativo

- Análisis de Apariencia

El biodiesel obtenido o producido es un líquido a temperatura ambiente sin ningún contenido de sólidos o geles, tiene una variación de colores entre el dorado y marrón oscuro. La variación en los colores está definida por el tipo de materia prima usada [85]. El DOE estableció la elaboración de 16 productos de biodiesel cada una con una diferencia entre la interrelación de las variables. En cuanto al caso de la apariencia de biodiesel el promedio de las muestras tienen un color marrón; solo 5 muestras un color marrón más oscuro (3, 4, 5, 10; 14), con respecto a no tener sólidos y geles en el producto solo 8 presentan físicamente y visualmente estas características (muestras 2, 3, 5, 7, 8, 11, 13, 16); las demás muestras restantes (1, 4, 6, 9, 10, 12, 14, 15) presentan geles y sólidos en la fase líquida de las muestras, figura 3-13.

Figura 3-13: Muestras de biodiesel con geles y sin geles



Fuente: Autor.

Al concluir con respecto al análisis de apariencia del biodiesel, se observa que el porcentaje de catalizador interviene en la estabilidad del producto, debido a que ensayos

que tienen entornos afines, manifiestan características de apariencia semejantes. La proporción de muestras que presentan un contenido de materiales no deseados son los ensayos que utilizan un menor porcentaje en peso de catalizador (0,5 %p/p) equivalente al 50% de las muestras; condición que puede estar influenciada porque la cantidad del catalizador empleada en la reacción de transesterificación no es la adecuada, aspecto que permite la formación de jabón debido a la neutralización de los AGL con el catalizador homogéneo básico, así se puede aumentar la formación de geles en las muestras definidas anteriormente.

En cuanto a las muestras que presentan un color marrón más oscuro al color promedio en general, se concluye que el aumento en la opacidad del producto es debido a que los FAEE contienen una proporción de agua en su molécula, aspecto que pueden estar afectado debido al lavado del biodiesel con agua a 40 °C, a la técnica del proceso de lavado con este agente o a un tiempo inadecuado de espera de la separación de las fases variables o proceso que influyen en la apariencia final del producto.

3.4.2 Análisis Cuantitativo

- Densidad del Biodiesel

Es una propiedad física de análisis de los biocombustibles según las normas tanto americana, como la europea. La densidad es la propiedad de una sustancia que relaciona la masa de determinada cantidad de material con el volumen que ocupa. Para la determinación de esta propiedad se utilizará el principio de flotación de Arquímedes mediante la utilización de un hidrómetro, al cual se le conoce también como densímetro de inmersión o aerómetro, leyéndose la gravedad específica y multiplicándose por la densidad del agua a 4 °C para obtener la densidad de la sustancia. Para la determinación de la densidad se utilizó un densímetro digital (Tabla 3-14)

Tabla 3-14: Densidades del biodiesel producido en el laboratorio.

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad (g/mL)	0,912	0,899	0,877	0,900	0,897	0,897	0,935	0,886
Ensayo	9	10	11	12	13	14	15	16
Densidad (g/mL)	0,895	0,895	0,910	0,896	0,886	0,911	0,868	0,885

Fuente: Autor.

En conclusión para la determinación de la densidad se tomaron muestras diferentes de cada una de los 16 productos de ésteres etílicos obtenidos en pruebas efectuadas en el laboratorio a partir del DOE planteado en la tabla 3-8. Seguidamente se mide la densidad cada muestra. Para determinar si el biodiesel producido cumple con las normas se revisaron tanto las normas europeas como las colombianas donde se encontró que el intervalo de densidad que especifica la norma europea EN14214 y la NTC 5708 es de 0,860 g/ml - 0,9 g/ml, por lo que 5 muestras (1, 6, 7, 11, 14), no cumplen con esta especificación ya que sobrepasan el rango permitido; los valores obtenidos de las 11

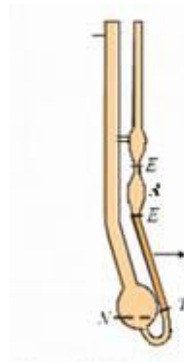
muestras (2, 3, 5, 8, 9, 10,12,13,15,16), restantes se encuentran en el intervalo de la densidad que estipula la normas mencionadas, es decir, el biodiesel producido es satisfactorio en cuanto a esta propiedad.

- Viscosidad del Biodiesel

La viscosidad es la resistencia que ofrece un fluido ante deformaciones tangenciales y depende de cada sustancia y de la temperatura. La determinación de esta propiedad para el biodiesel se hará mediante la medición del tiempo que tarda una cantidad definida de biodiesel en pasar por un tubo de pequeño diámetro por acción de la gravedad y la confrontación de este valor con una curva de calibración del equipo, que relaciona ese tiempo con la viscosidad cinemática.

Para la determinación de la viscosidad del biodiesel producido se tomó una muestra de las 16 muestras producidas y se aplicó el procedimiento para la determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos en Laboratorio de Combustibles y Lubricantes de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia. Para esto se utilizó un viscosímetro capilar de Ostwald tamaño 100 (figura 3-14)

Figura 3-14: Viscosímetro de Ostwald.



Para el cálculo de la viscosidad cinemática se tuvo en cuenta la siguiente fórmula:

$$C = \frac{v}{t} \quad (3-15)$$

Donde:

C = Constante del viscosímetro

v = Viscosidad cinemática para el líquido estándar (mm²/s)

t= Tiempo de flujo en segundos.

El viscosímetro utilizado tiene una constante de un valor 0,015737 cSt/s. Se midieron tiempos de flujo de cada muestra, los resultados obtenidos (Tabla 3-15) se muestran a continuación.

En cuanto al análisis de resultados de la viscosidad cinemática obtenida de cada una de las muestras se concluye que todo el biodiesel producido con aceite de fritura de soja se

obtuvieron valores satisfactorios y cumplen con la norma Colombiana y norma ASTM. (Tabla 3-16)

Tabla 3-15: Viscosidad cinemática de biodiesel de aceite de fritura de soja

Muestra	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática (cSt)
1	320,17	5,04
2	285,32	4,50
3	316,45	4,98
4	320,78	5,05
5	319,53	5,03
6	313,99	4,94
7	319,53	5,03
8	319,6	5,03
9	282,18	4,44
10	306,84	4,83
11	314,69	4,95
12	282,66	4,44
13	232,58	5,09
14	301,25	4,74
15	284,21	4,47
16	310,12	4,88

Fuente: Autor

Tabla 3-16: Datos de la norma Colombia y ASTM de viscosidad cinemática

Propiedad	Unidades	Requisito	Método de ensayo
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	1,9 - 6,0	ASTM D 445
			ISO 3104
		3,5 - 5	EN 14214

Fuente. Norma ASTM D 445

Como se observa, Ahora se comparó el valor con el reportado por la norma europea EN14214, concluyendo que 6 de la muestran (1, 4, 5, 7, 8, 13), no cumplen con este estándar porque superan los valores máximos de la norma, condición que se puede atribuir a que no se efectuó un excelente proceso de separación, conservando trazas de residuos subproductos en el biodiesel.

- Contenido de cenizas

En la determinación del contenido de cenizas se siguió el procedimiento referente a determinación del contenido de cenizas en productos derivados del petróleo, el cual es el usado por el Laboratorio de Combustibles y Lubricantes de la Universidad Nacional de Colombia. Para la aplicación de dicho método se analizaron cada una de las 16 muestras; el procedimiento que se efectuó en cada una de las muestras es:

Calentar el crisol que se va a utilizar para la prueba de 700 a 800 °C por 1 min a 10 min. Enfriar a temperatura ambiente en un desecador, y con una balanza pesarlo con una precisión de 0,1 mg.

Cuando la muestra es suficientemente móvil, mezclar bien antes del pesaje. La mezcla es necesaria para distribuir el catalizador y otras partículas a lo largo de la muestra. Una mezcla satisfactoria por lo general se puede lograr en 10 min de agitación manual o 10 min utilizando un agitador mecánico. Examinar la homogeneidad de la muestra antes de proceder.

Colocar 100 g de muestra del combustible en el crisol.

Calentar cuidadosamente el crisol con un quemador a gas o su equivalente, hasta que el contenido pueda ser encendido por la llama. Mantener el crisol a una temperatura en la que la muestra se continúa quemando a una velocidad uniforme y moderada dejando sólo el residuo carbonáceo, es decir, cuando cesa la combustión.

La muestra de la prueba puede contener agua que puede causar salpicaduras. El operador deberá calentar la porción de ensayo con cautela mientras se usan equipos de protección individual adecuados, tales como gafas de seguridad y guantes. Si las salpicaduras son muy graves, para que el material se escape de las fronteras del crisol, se debe desechar la muestra de prueba. Si se descarta la primera muestra, añadir 2 ± 1 mL de 2-propanol (Inflamable) a una segunda muestra de prueba mientras se agita con una varilla de vidrio y se calienta la muestra.

Calentar el residuo en el horno a 775 ± 25 °C hasta que todos los materiales carbonosos hayan desaparecido, por lo menos 30 min. Enfriar el plato a temperatura ambiente en un desecador, y con una balanza pesarlo; esta debe tener una precisión de 0,1 mg.

Recalentar el plato a 775 ± 25 °C durante, al menos 20 min, enfriar en un desecador, y pesar de nuevo. Repita el calentamiento, refrigeración y proceso de pesaje hasta que pesadas consecutivas no difieren en más de 0,5 mg.

Los datos tomados en la práctica del laboratorio para la cuantificación de cenizas (Tabla 3 - 17), se muestra a continuación:

Tabla 3-17: Datos de la prueba de contenido de cenizas.

Muestra	Masa muestra inicial (g)	Masa cenizas (mg)
1	20,0211	2,88
2	20,0193	0,92
3	20,017	2,54
4	20,4105	1,03
5	20,0165	2,02
6	20,0071	0,60
7	20,0572	2,26
8	20,0592	0,95
9	20,0356	2,45

Muestra	Masa muestra inicial (g)	Masa cenizas (mg)
10	20,0213	1,12
11	20,071	2,34
12	20,2151	1,15
13	20,0233	1,98
14	20,0611	1,01
15	20,3172	1,66
16	20,0481	1,05

Fuente: Autor

Para calcular la masa de ceniza como un porcentaje de la muestra original se debe aplicar (ecuación 3-16):

$$\text{Cenizas, masa \%} = (w/W) \times 100 \quad (3-16)$$

Dónde: w = masa de cenizas en gramos.

W = masa de la muestra en gramos.

Los resultados obtenidos en la determinación de cenizas (Tabla 3-18) se muestran:

Tabla 3-18: Contenido de cenizas de biodiesel obtenidos experimentalmente

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8
% Cenizas	0,144	0,046	0,126	0,050	0,100	0,029	0,112	0,047
Ensayo	9	10	11	12	13	14	15	16
% Cenizas	0,122	0,056	0,116	0,057	0,099	0,050	0,082	0,052

Fuente: Autor

De acuerdo con las normas internacionales y nacionales ASTM D6751 y NTC 5444 el porcentaje máximo permitido de cenizas en el biodiesel es de 0,02%. Analizando los resultados de la tabla anterior, se puede evidenciar que ninguna de las 16 muestras de biodiesel con aceite de fritura de soja no cumplen con el estándar de la norma, solamente la muestra 6 es la que se aproxima al límite máximo permitido por las normas en mención. Las otras 15 muestras valoradas muestran que el porcentaje de las cenizas tiene un rango de valores entre 0,046 - 0,144% datos que están muy lejos de parámetro permitido, una causa posible puede ser que las muestras tengan presencia de sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles y al catalizador no eliminado en el proceso de separación. Este parámetro es importante ya que las cenizas pueden ser abrasivas y pueden contribuir al desgaste del inyector, bomba de inyección, pistón y anillos, además de favorecer a la formación de depósitos en el motor y la colmatación de filtros. Otro aspecto que se plantea alrededor de las cenizas es que teniendo en cuenta que a mayor contenido de cenizas el combustible presenta un poder calorífico menor, el cual es de gran importancia para el adecuado funcionamiento del motor, se puede afirmar que el poder calorífico del combustible obtenido no es muy aceptable.

- Índice de acidez

El índice de acidez se define como los mg de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar 1 g de muestra. Para la determinación de los ácidos presentes en la muestra se hace una neutralización de estos utilizando una base, con la ayuda de un indicador en la muestra se puede evidenciar el punto en el que se neutralizan los ácidos presentes en la muestra con la cantidad de base gastada para neutralizarlos.

La determinación del índice de acidez fue realizada en el titulador Automático Karl Fisher con muestras de 5 g aproximadamente, disueltos en 40 mL de solución acuosa de i-propanol y etanol y utilizando una solución de KOH 0,1 de concentración. El método que se aplicó para este procedimiento fue el estipulado en la norma ASTM - D 664. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3-19:

Tabla 3-19: Datos del índice de acidez del biodiesel producido en el laboratorio.

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8
Índice de acidez, (mg KOH/g de muestra)	0,498	0,505	0,676	0,401	0,230	0,495	0,624	0,399
Ensayo	9	10	11	12	13	14	15	16
Índice de acidez, (mg KOH/g de muestra)	0,577	0,367	0,434	0,389	0,486	0,423	0,321	0,413

Fuente: Autor

Los resultados mostrados en la tabla 3-19, muestran que los índices de acidez obtenidos para el biodiesel a partir del lavado con ácido acético fueron menores que los datos obtenidos con el lavado con agua, lo cual sugiere que la absorción con ácido acético es mejor en cuanto a la remoción de ácidos libres en el biodiesel, además de haber sido un método de purificación para el biodiesel en el que se invirtió menor tiempo, además que no se empleó una gran cantidad de agua que se utilizó en el otro método.

Haciendo una comparación con los valores obtenidos de la literatura y de las especificaciones de las normas mostradas (EN 14214 IA = máximo 0,5 y ASTM-D 6751 IA = máximo 0,8), se puede observar que los índices de acidez obtenidos mediante lavado con ácido acético cumplen el parámetro de la norma europea y las normas americanas caso contrario al proceso de lavado efectuado con agua que algunos no cumplen la norma europea o se encuentran muy cercanos al rango máximo permitido pero según la norma americana si cumplen todas la muestras con este parámetro. Teniendo en cuenta el último aspecto mencionado se puede establecer que todas las muestras cumplen con la norma Colombia y el biocombustible sería aceptado para su uso según la propiedad del índice de acidez.

- Punto de nube

El punto de nube es la temperatura a la cual una nube aparece por primera vez en un líquido, cuando este es enfriado bajo condiciones preestablecidas; este índice de

temperatura más baja del producto determina la utilización para ciertas aplicaciones. El procedimiento para esta prueba es para productos derivados del petróleo y lubricantes transparentes y con puntos de nube por debajo de 49 °C. La metodología empleada es la planteada en la norma ASTM-D 2500.

La determinación del punto de nube se realizó a todas las muestras de biodiesel producida en el laboratorio los cuales tuvieron en su procedimiento purificación (Lavado) con agua; mientras otras muestras emplearon como medio de purificación el ácido acético. Para obtener los datos del punto de nube de cada muestra se empleó un equipo termostato de inmersión marca JULABO ® (Figura 3-15), usado por el Laboratorio de Combustibles y Lubricantes de la Universidad Nacional de Colombia.

Figura 3-15: Termostato de inmersión.



Fuente: Laboratorio de Combustibles y lubricantes de la Universidad Nacional de Colombia.

El procedimiento empleado para la obtención de los datos es el siguiente:

Llenar la jarra haciendo fluir lentamente el aceite claro hasta el nivel marcado.

Sellar muy bien la jarra con el corcho, el cual tiene puesto el termómetro apropiado para la prueba. Si el punto de nube está por encima de -36 °C use el termómetro para nube alta y fluidez, si está por debajo utilizar el termómetro para nube baja y fluidez.

Ajustar el corcho y el termómetro de tal manera que la jarra y el termómetro queden coaxiales y el bulbo del termómetro toque fondo de la jarra.

Colocar la jarra en la chaqueta que está inmersa en el baño, que está en una temperatura entre -1 °C y 2 °C.

Para cada cambio de temperatura en el termómetro de 1 °C remover la jarra de la chaqueta pero sin mover bruscamente el aceite, inspeccionar la nube y colocar nuevamente en la chaqueta. Esto no debe demorar más de 3 s.

Si no aparece la nube cuando el aceite se ha enfriado hasta 10 °C, sacar la jarra y llevar al baño de -18 a -15 °C. No saque la chaqueta. Cuando el baño llegue a la temperatura especificada insertar nuevamente la jarra en la chaqueta.

Si no aparece la nube cuando el aceite se ha enfriado hasta -7 °C sacar la jarra y llevar al baño de una temperatura de -32 a -35 °C e insertar nuevamente la jarra en la chaqueta cuando el baño llegue a esta temperatura.

Los datos obtenidos se muestran a continuación (Tabla 3-20):

Tabla 3-20: Temperatura del punto de nube del biodiesel producido en el laboratorio

Muestra	Punto de nube (°C)	Literatura	Referencias
1	8	No se reporta con respecto al aceite usado de fritura de soja y etanol	[83] Morse 2008
2	7		
3	5		
4	3		
5	6	Solo se reportan datos para biodiesel de palma – lavado con agua. (17 ± 1 °C)	
6	7		
7	8		
8	4		
9	7	Solo se reportan datos para biodiesel de soja – lavado con agua (1 ± 1 °C)	[84] Boshui 2010
10	8		
11	8		
12	4		
13	3		
14	6		
15	7		
16	5		

Fuente: Autor

El análisis de resultado para esta propiedad es algo complicado debido a que las normas no reportan un rango para evaluar la propiedad, solamente las norma ASTM – D 6751 plantea la posibilidad de comparar con reportes de literatura, pero para los aceites de fritura de soja y el etanol no se encuentran reportes para poder comparar si los datos obtenidos son los adecuados según otros estudios. En la literatura solamente se mencionan estudios efectuados a partir de material refinado de aceite de palma y de aceite de soja y empleando como purificación del biocombustible agua; estos datos se mencionan en la tabla anterior y a partir del dato obtenido de soja se establecerá una conclusión a posteriori de esta propiedad.

El resultado obtenido por reporte para el biodiesel de soja esta dentro de un rango de 0 - 2 °C. Basado en este intervalo podemos decir que ninguna de las muestras obtenido en el laboratorio cumplen con el parámetro de evaluación. De los puntos de nube obtenidos solo dos muestras (4, 13), poseen una diferencia de 1 °C, por el valor máximo del rango

de comparación, definiendo que el 87% de las muestras no se encuentran en el intervalo de comparación, lo cual hace importante resaltar que para el aceite de fritura de soja se obtuvieron valores muy lejanos, condición que nos indica que posiblemente el biodiesel de este tipo de aceite sea inadecuado a temperaturas levemente bajas ya que la formación de cristales sería un problema de importancia en el motor; otro posible aspecto que propia tenerse en cuenta en esta valoración es que la forma del lavado influyo en los datos obtenidos; pero es de aclarar que sería una conclusión mas significativa si se encontrara el valor teórico del punto de nube para el aceite de fritura de soja y etanol.

- Contenido de agua

Para la determinación de esta propiedad se emplea el método Karl Fischer, este método se emplea de referencia para numerosas sustancias. Se trata de un procedimiento de análisis químico basado en la oxidación de dióxido de azufre con yodo en una solución de hidróxido metílico. La estimación de la muestra se puede realizar de forma volumétrica o coulométrica. En el método volumétrico se añade una solución Karl Fischer que contiene yodo hasta que se advierte la primera traza de yodo sobrante. La cantidad de yodo convertido se determina a partir del volumen en bureta de la solución Karl Fischer con contenido en yodo; para el segundo caso, se determina el contenido de agua en partículas por millón (ppm). El procedimiento con que se desarrolla esta prueba esta definido por la norma americana ASTM – D 130. Este se muestra a continuación:

En el recipiente para la muestra se coloca una pequeña cantidad de la sustancia de análisis del cual se desea evaluar su contenido de agua. La muestra debe estar en un recipiente protegido contra la humedad.

Se va añadiendo poco a poco la solución indicada como reactivo Karl Fischer.

El yodo de esta solución no se coloca directamente sino que es generado en el momento por un proceso electrolítico auxiliar. La razón de esto es que la cantidad de yodo adicionado depende de la energía eléctrica usada para generar este yodo y se mide el yodo con precisión en base a la electricidad (Método potenciométrico).

El punto final de equilibrio se da cuando hay exceso de yodo y la solución toma el color ladrillo oscuro propio del yodo. Se consume 1 mol de yodo por cada mol de agua.

Los resultados obtenidos se muestran (Tabla 3-21), a continuación:

Tabla 3-21: Porcentaje del contenido de agua en el biodiesel producido en el laboratorio.

Muestra	Contenido de agua (Método Karl Fischer)
1	0,154 %
2	0,260 %
3	0,061 %
4	0,138 %
5	0,220 %

Muestra	Contenido de agua (Método Karl Fischer)
6	0,216 %
7	0,088 %
8	0,070 %
9	0,221 %
10	0,062 %
11	0,121 %
12	0,056 %
13	0,078 %
14	0,123 %
15	0,098 %
16	0,054 %

Fuente: Autor

Como conclusión de la prueba, el contenido de agua de las diferentes muestras estuvo por encima del máximo permitido por los estándares. EN 14214 (Máximo 0,05) y ASME-D 6751 (Máximo 0,05), por lo cual según los datos de las pruebas el biodiesel obtenido aceleraría la corrosión en los tanque de almacenamiento, así como la formación de emulsiones, procesos de oxidación hidrolítica e incluso una posible reducción en el tiempo de almacenamiento debido al crecimiento microbiano en los FAEE. Las causas de los valores tan elevados del porcentaje de agua en el producto es que no existe un buen método de separación ó lavado del producto.

En cuanto al proceso de separación se debe realizar algunas pruebas del tiempo en las etapas del proceso de separación (Reacción de esterificación, lavado con agua), debido a que no tener un tiempo adecuado en estas etapas quedando trazas de agua en el producto. Además esto lo podemos corroborar con el mencionado en el análisis de la apariencia el color tan marrón del biodiesel generado.

3.4.3 Análisis del rendimiento

Este análisis está sustentado en el análisis del DOE, condiciones que se plantearon en el capítulo 3.2, donde se mencionan los rangos y niveles de cada uno de los factores del diseño de experimentos, seguidamente con estos factores se plantea la matriz de combinación de tratamiento (Tabla 3-7), y a partir de esta se realizó la Tabla 3-8 donde se planteaba el valor de cada factor en su respectivo ensayo. Ya obtenidos la producción y evaluada la calidad de cada uno de los 16 experimentos, es necesario evaluar la respuesta del estudio (Rendimiento de biodiesel) del experimento y establecer algunas condiciones de la variabilidad en el rendimiento del proceso. Para obtener el porcentaje del rendimiento de cada una de los ensayos realizados en el laboratorio, se estableció mediante la relación entre el peso del biodiesel y el peso del aceite usado de fritura de soja. En la Tabla 3-22, se plantean los pesos y los rendimientos del biodiesel obtenido en cada producción.

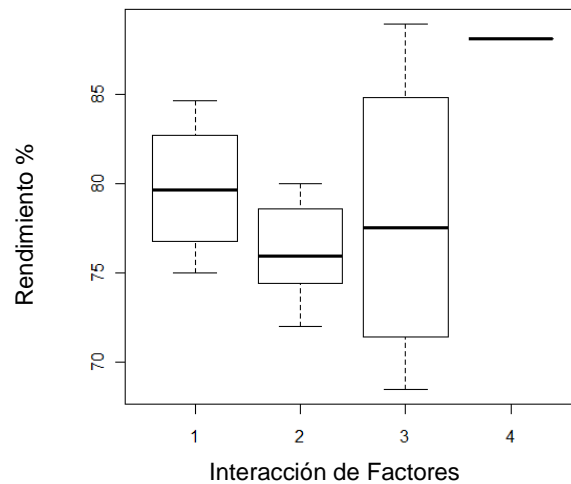
Tabla 3-22: Datos de rendimiento de las producciones de biodiesel obtenida en el laboratorio.

Ensayo	Combinación de tratamientos	Peso del AUFS (g)	Peso de biodiesel (g)	Rendimiento (%)
1	(1)	184,4	134,61	73,0
2	A	183,9	144,36	78,5
3	B	184,1	155,74	84,6
4	C	184,7	149,23	80,8
5	D	184,3	138,22	75,0
6	AB	184,2	132,62	71,9
7	AC	184,3	136,38	74,4
8	AD	184,6	147,68	80,0
9	BC	184,9	142	76,8
10	BD	185,1	139,01	75,1
11	CD	184,1	144,70	78,6
12	ABC	183,9	163,48	88,9
13	ABD	184,3	126,24	68,5
14	ACD	184,3	147,44	80,7
15	BCD	183,9	136,63	74,3
16	ABCD	184,2	162,28	88,1

Fuente: Autor

En la figura 3-16, se realizó un gráfico de Blox Plot. Donde se plantearon las medias del rendimiento de los efectos principales (1), las media de la interacción de dos factores (2) la media de la interacción entre tres factores (3) y por último la internación entre los cuatro factores.

Figura 3-16: Grafica de Blox Plot de las interacciones de los factores Vs rendimiento



Fuente: Autor

Como se mencionó anteriormente para la validación de estos datos se efectuó con la técnica de contrastes de Yates (Tabla 3-9) en la cual se realizó la identificación de cada uno de los cálculos de contrastes que se debe efectuar. El procedimiento que se desarrollara a continuación solo se mostrara para dos tratamientos (ABD, ABCD) que obtuvieron el mayor rendimiento de biodiesel. Para obtener los cálculos del tratamiento ABD se realizó:

Se establece el rendimiento obtenido de la producción de biodiesel según los factores definidos para el ensayo

Ensayo	Combinación de tratamiento	Factores				Rendimiento %
		Relación molar	%p/p	T °C	Agente de lavado	
12	ABC	1:7	0,7	60	Agua (40 °C)	88,9
16	ABCD	1:7	0,7	60	Ácido acético	88,1

Fuente: Autor

Posteriormente se utiliza la combinación de tratamientos obtenidos en la tabla 3-9 siguiendo la descripción que se menciona de la técnica de contraste de Yates para el experimento; descripción que permite obtener los valores de las columnas 1, 2, 3 y el valor del contraste.

Ensayo	Combinación de tratamientos	(1)	(2)	(3)	identificación
12	ABC	BCD+ABCD	ACD- ABD+ABCD- BCD	CD-BD- AD+D+ABCD-BCD- ACD+ABD	Contraste ABC
		162,4	15,9	0,1	53,984
16	ABCD	ABCD-BCD	ABCD-BCD- ACD+ABD	ABCD-BCD- ACD+ABD- CD-BD- AD+D	Contraste ABCD
		13,8	11,7	233	- 62,832

Fuente: Autor

Para los otros 14 procedimientos, se mencionan los resultados que se muestran en la Tabla 3-23.

Tabla 3-23: Resultados obtenidos por el método de Yates

Ensayo	Rendimientos %	(1)	(2)	(3)	identificación
1	73,0	151,5	308,1	628,2	
2	78,5	150,5	320,9	620,3	13,093
3	84,6	155,2	298,6	-14	191,36
4	71,9	165,7	321	13,7	-8,8
5	80,6	155	-7,1	15,8	- 47,52
6	74,4	163,9	5,7	3,9	18,656
7	76,6	159,3	-16	0,4	-82,192
8	88,9	162,4	15,9	0,1	53,984
9	75,0	5,5	5,1	12,8	-16,192
10	80,0	-12,6	10,5	23,1	9,8
11	75,1	-6,4	-11,4	12,8	2,4
12	68,5	12,1	3,1	17,5	22,416
13	78,6	5,0	-18,1	5,4	- 30,912
14	80,7	-6,6	18,5	20,9	17,28
15	74,3	2,1	-11,6	36,6	49,616
16	88,1	13,8	11,7	23,3	- 62,832

Fuente: Autor.

Basados en los resultados de la tabla 3-23 y las formulas planteadas en el Anexo C y D, se plantea la tabla ANOVA del DOE establecido para este estudio. En la tabla 3-24 se muestra los resultados del ANOVA para el rendimiento del proceso de producción de biodiesel en el laboratorio a partir de aceite usado de fritura de soja y etanol.

Tabla 3-24: Análisis de varianza para el DOE del rendimiento del proceso de producción biodiesel.

Ensayo	Fuente de Variación	Efecto	Suma de cuadros	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-Calculado
Efecto Principal						
2	A	209,5	10,71	1	10,71	0,15
3	B	11,96	2288	1	2288	33,28
4	C	-2,97	141,1	1	141,1	2,05
5	D	-1,012	16,19	1	16,19	0,23
Interacción de dos factores						
6	AB	-0,550	4,84	1	4,84	0,07
7	AC	1,166	21,75	1	21,75	0,32
8	AD	-0,61	6,0	1	6,0	0,08
9	BC	- 5,14	422,2	1	422,2	6,14
10	BD	0,15	0,36	1	0,36	0,005
11	CD	1,41	31,4	1	31,4	0,45
Interacción de tres factores						
12	ABC	3,37	182,142	1	182,14	2,67
13	ABD	-1,9	59,7	1	59,7	0,86
14	ACD	1,08	18,66	1	18,66	0,27
15	BCD	3,10	153,86	1	153,86	2,23
Interacción de cuatro factores						
16	ABCD	-3,93	246,7	1	246,7	3,58
ERROR			1099,95	16	68,74	
TOTAL			4703,69	31		

Fuente: Autor.

Seguidamente con la tabla ANOVA se probara las hipótesis basados en el P-valor (Pr) que se basa en los F-calculados (Fc) de la Tabla 3-24, a partir de la suposición de $Pr(4,49 > F_c)$ bajo $\alpha = 0.05$, con estas condiciones se establece en que región de la figura 3-4 se encuentra cada tratamiento. Como por ejemplo para el tratamiento de A se acepta la hipótesis, debido a que el Fc es menor del Pr, es decir, el Fc se encuentra en la región de aceptación de la figura 3-4. Región que define que existe una confiabilidad del 95% de que el rendimiento obtenido en la producción de biodiesel a partir de aceite usado de fritura de soja es un proceso con buenas condiciones de reproducibilidad. En la tabla 3-25 se observa las otras valoraciones de la aceptación o rechazo de las H_0 planteadas en el Anexo E, para evaluar la efectividad del rendimiento del biodiesel.

Tabla 3-25: Prueba de hipótesis de los tratamientos para la producción de biodiesel

Ensayo	Fuente de Variación	Efecto	F-Calculado	$Pr(4,49 > F_c)$	H_0
2	A	209,5	0,15	4,49	Aceptada
3	B	11,96	33,28	4,49	Rechazada
4	C	-2,97	2,05	4,49	Aceptada
5	D	-1,012	0,23	4,49	Aceptada

Ensayo	Fuente de Variación	Efecto	F-Calculado	Pr(4,49>Fc)	H ₀
6	AB	-0,550	0,07	4,49	Aceptada
7	AC	1,166	0,32	4,49	Aceptada
8	AD	-0,61	0,08	4,49	Aceptada
9	BC	- 5,14	6,14	4,49	Rechazada
10	BD	0,15	0,005	4,49	Aceptada
11	CD	1,41	0,45	4,49	Aceptada
12	ABC	3,37	2,67	4,49	Aceptada
13	ABD	-1,9	0,86	4,49	Aceptada
14	ACD	1,08	0,27	4,49	Aceptada
15	BCD	3,10	2,23	4,49	Aceptada
16	ABCD	-3,93	3,58	4,49	Aceptada

Fuente: Autor.

De la tabla 3-25, se puede establecer según el Pr, el 87,5% de los ensayos cumplen con el valor de comparación del que se planteó para evaluar la respuesta definida del diseño de experimento (Rendimiento de biodiesel), basados en esta condición podemos mencionar que solo dos hipótesis de las fuentes de variación (B, BC) no cumplen con el valor de valoración, se puede establecer que el rendimiento de B que esta 6,5% por encima de la media general el no cumplimiento del parámetro afecta la interacción de las otras variables. Para el ensayo 3 (Variación B), el rendimiento se encuentra 6,5% por encima de la media general, sin embargo al realizar la comparación con el F-calculado obtenido y el Pr, la hipótesis se rechaza debido a que el valor del F-calculado supera 6 veces al valor de comparación, definiendo que el dato de 33,28 del Fc para el ensayo 3, está por fuera de la región de aceptación de la hipótesis. Este incumplimiento del parámetro Fc, es debido a que el %p/p de catalizador que se estableció para el ensayo afecta la interacción y reacción de las otras variables que intervienen en el experimento; con respecto a la hipótesis de la interacción BC es rechazada ya que existe una diferencia de 1,65 por encima del Pr y a su vez el rendimiento de biodiesel está por debajo de la media general en 1,28%. El rechazo establecido del ensayo es por el %p/p de catalizador (0,7 %p/p) que se estudió en la prueba, generando una producción que no cumple con el dato de comparación Pr.

Otro aspecto importante de mencionar es que la media del rendimiento de biodiesel lavado con agua a 40 °C es de 69% y la media del rendimiento conseguida con ácido acético es de 68,3%, lo que establece que el agente de lavado (Factor D) no afecta el rendimiento del biocombustible, debido a que solo hay una diferencia del 0,7% entre las medias de los rendimientos conseguidos con cada uno de los agentes de lavado en estudio

Otras evaluaciones que se plantean a partir de la tabla de pruebas de hipótesis (H₀) para cada una de las fuentes de variación son:

- El factor A, (Relación molar aceite:alcohol), tiene un alto efecto significativo sobre el rendimiento de la reacción de transesterificación, ya que el efecto es positivo,

ya que al aumentar el relación molar aumenta el rendimiento por esta razón selecciona el nivel más alto del experimento 1:7.

- El factor B, (%p/p de catalizador), tiene un efecto significativo sobre el rendimiento de la reacción de transesterificación, ya que al incrementar la concentración de catalizador incrementa el rendimiento; motivo que permite establecer 0,7 % p/p.
- El factor C, (Temperatura), tiene un efecto negativo sobre el rendimiento de la reacción, valor que permite definir que la temperatura no tiene efecto negativo en proceso, pero que según la revisión bibliográfica no recomienda utilizar una temperatura cercana al punto de evaporación del alcohol por lo cual se utilizara la temperatura de 60 °C.
- El factor D, (Agente de lavado), no tiene efecto sobre el rendimiento de la reacción, ya que el valor obtenido en el efecto es negativo, para este condición se seleccionara el agua como agente de lavado ya que es un elemento de fácil acceso y utilización.
- La interacción de los tratamientos AB, (Relación aceite:alcohol y %p/p catalizador) no tiene un efecto significativo sobre el rendimiento de la reacción, por el valor negativo que se obtuvo en el efecto, por lo cual se puede seleccionar cualquier combinación, sin embargo el % del rendimiento del biocombustible obtenido con estos factores se encuentra 6% por debajo del rendimiento de la media general, aspecto que puede verse afectado por el tiempo de reacción.
- La interacción de los tratamientos AC, (Relación aceite:alcohol y temperatura), aunque según datos del efecto si plantea una buena relación con el dato, en puntos anteriores se mencionó que entre estos factores el que tiene un alto efecto en el rendimiento es la relación molar, sin embargo el % p/p de catalizador tiene un nivel bajo pero no es aconsejable trabajar con la relación molar de 1:7, temperatura de 60 °C y agente de lavado agua.
- La interacción de los tratamientos AD (Relación aceite:alcohol y agente de lavado) caso de interacción que según dato del efecto no es significativo en el rendimiento, condición que como en la interacción anterior la relación molar es la condición principal en el tratamiento, por lo cual se debe trabajar con 1:7.
- La interacción de los tratamientos BC, (%p/p catalizador y temperatura), tiene un efecto poco significativo en el rendimiento del biodiesel obtenido por el valor negativo del efecto, pero se considera que se debe trabajar con el 0,7 %p/p de catalizador por las condiciones mencionadas anteriormente.
- La interacción de los tratamientos BD; (%p/p catalizador y agente de lavado) su efecto es significativo en las condiciones de la reacción de alcoholisis, pero se considera que el efecto está definido es por el %p/p de catalizador mas no por el agente de lavado.
- La interacción de los tratamientos CD, (Temperatura y agente de lavado), aunque según el dato del efecto es positivo y esto establece que es combinación importante en la reacción, según se mencionó anteriormente las medias entre el rendimiento obtenido entre los dos agentes de lavado tienen una variación pequeña y con lo respecto a la temperatura se aconseja elaborar la producción con 60 °C.

- La interacción de los tratamientos ABC, (Relación aceite:alcohol, %p/p catalizador y temperatura), esta combinación entre los tratamiento tiene un alto efecto sobre el rendimiento de la producción de biodiesel debido a que esta combinación obtuvo el mayor rendimiento (88,9%) de todos lo ensayos elaborados en el laboratorio, además que es un dato cercano al obtenido en la literatura (Tabla 3-2), lo que define que se debe trabajar con una relación molar de 1:7, un %p/p de catalizador de 0,7 y una temperatura de 60 °C.
- La interacción de los tratamientos ABD, (Relación aceite:alcohol, %p/p catalizador y agente de lavado) y la interacción de los tratamientos ACD, (relación aceite:alcohol, temperatura y agente de lavado), basado en los datos de los efectos no tiene una condición relevante en la reacción de transesterificación. Sin embargo el efecto en el rendimiento de este experimento está definido por el factor A y B y la influencia del factor de temperatura, debido a que con una temperatura de 60 °C se obtiene un rendimiento de 2% por encima de media global.
- La interacción de los tratamientos BCD, (%p/p catalizador, temperatura y agente de lavado) tiene un efecto significativo en la reacción de transesterificación, pero de los tres factores el factor principal B, obtiene mejores rendimientos con un valor de 1:7.
- La interacción de los tratamientos ABCD, (Relación molar aceite:alcohol, %p/p catalizador, temperatura y agente de lavado), no tiene efectos significativos por el dato negativo obtenido en el efecto, además que está combinación obtuvo el segundo rendimiento más alto (88,1%) de las muestras. Esto porque el ensayo de la producción de biodiesel trabajo bajo los factores de relación molar aceite:alcohol (1:7), %p/p catalizador (0,7), temperatura 60 °C.

A partir del análisis establecido para el análisis de la hipótesis se establece que las mejores condiciones obtenidas en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de fritura de soja y etanol son:

- Relación molar aceite:alcohol de 1:7.
- %p/p catalizador de 0,7.
- Temperatura de 60 °C.
- Agente de lavado Agua a 40 °C.

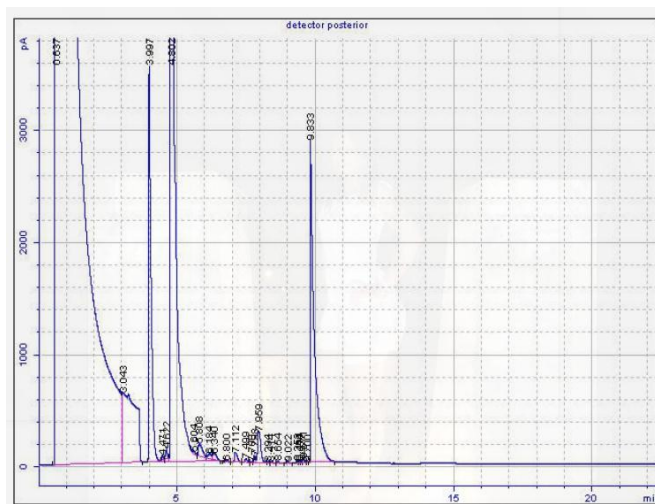
Pero según los parámetros o estándares, un aspecto de gran importancia es la evaluación de la calidad del biodiesel, donde se establezcan el contenido de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos al producto obtenido. Para la identificación de estos contenidos es necesario realizar una cromatografía de gases; prueba que por su alto costo solo se efectuara al producto que se obtuvo con las mejores condiciones en el proceso de producción de biodiesel en el laboratorio.

- Contenido de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos

Como se mencionó anteriormente para determinar el contenido de monoglicéridos y diglicéridos en el biodiesel se empleó la técnica de análisis por cromatografía de gases. Para esto se usó la técnica estandarizada por el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia que se encuentra acorde con los métodos estándar ASTM 6584 y EN 14214. El procedimiento que se efectúa para este análisis consiste, en la preparación de las muestras; las cuales son una mezcla de 3 mg de la muestra, 5 mg de Tricaprina (Estándar interno), 2 gotas de Piridina y hexano (Llevar la mezcla hasta 1,5 mL). Esta muestra está contenida en vial apropiado para el procedimiento.

A continuación se realizó la cromatografía de gases inyectando 1 µL de la muestra preparada en el inyector del equipo. El equipo antes del procedimiento fue preparado y ajustando a la temperatura del detector e inyector (350 °C) y a una temperatura de 120 °C el horno. Además el equipo está conectado a un computador que mediante el programa Cerity QA/QC versión A.04.05 procesa los datos y genera el cromatograma de la prueba. En la figura 3-17, se muestra el cromatograma obtenido a partir del biodiesel obtenido en el laboratorio del ensayo 12.

Figura 3-17: Cromatograma de la muestra de biodiesel obtenido con el ensayo 12 a partir de aceite de fritura y etanol.



Fuente: Autor

Después de obtener el cromatograma de la muestra del ensayo 12, se obtuvieron los resultados arrojados por el programa en la Tabla 3-26, que se muestra a continuación.

Tabla 3-26: Cromatograma de la muestra de biodiesel de las mejores condiciones producidas en el laboratorio con el ensayo 12.

	Señal	Tiempo de retención (min)	Área (pA x s)
Solvente	1	0,637	19631,727
	1	3,043	21401,5772
	1	3,997	19993,9851
	Área total		41395,5623

	Señal	Tiempo de retención (min)	Área (pA x s)
Ésteres etílicos de ácidos grasos	1	4,471	167,5155
	1	4,622	306,6746
	1	4,802	133983,876
	1	5,604	154,63653
	1	5,808	1147,02616
	1	6,184	409,98489
	1	6,34	619,83801
	1	6,8	46,85757
	1	7,112	612,85192
	Área total		
Monoglicéridos	1	7,499	164,93753
	1	7,7	14,28076
	1	7,798	208,39154
	1	7,959	2274,68755
	1	8,294	22,7411
	1	8,414	49,01392
	1	8,654	57,26508
	1	9,022	27,93721
	1	9,353	40,79859
	1	9,416	40,98457
	1	9,477	64,80673
	1	9,571	124,2723
	1	9,7	20,17736
	Área total		
Tricaprina	1	9,833	27174,8972

Fuente: Informe del programa Agilent Cerity QA/QC

Basado en estos resultados se procede a encontrar los pesos de cada una de las sustancias detectadas para así encontrar la composición del Biodiesel. A partir de la ecuación 3-16. [86].

$$y = ax + b \quad (3-16)$$

Donde:

a y b: son las constantes encontradas para cada uno de los estándares de ésteres etílicos o ésteres metílicos, monoglicéridos y triglicéridos, en la tabla 3-27 se puede observar los datos.

Tabla 3-27: Estándares cromatograficos

Estándar cromatográfico	a	b
Palmitato de metilo	1,6844	0,0148
Oleato de metilo	1,6369	0,0458
Palmitato de etilo	1,9468	0,0082
Oleato de etilo	1,9031	0,0019
DL- α palmitina	1,1374	-0,0765
Dipalmitina	0,8235	0,0004
Tripalmitina	1,1888	-0,0079
Trioleína	0,8491	-0,0022

Fuente: [86]

De esta ecuación la variable independiente o señal de entrada es la relación entre el peso del estándar primario/peso del estándar interno en las abscisas, como se observa en la ecuación 3-17.

$$x = \frac{W}{W_s} \quad (3-17)$$

Donde:

W: Peso del mismo patrón cualquiera.

W_s : Peso de tricaprina empleado.

Como respuesta cromatográfica o variable dependiente es la relación de áreas de pico asociadas a los mismos, comportándose linealmente. (Ecuación 3-18)

$$y = \frac{A}{A_s} \quad (3-18)$$

Donde:

A: Área de pico de un patrón cualquiera.

A_s : Área de pico de la tricaprina.

De esta forma podemos encontrar los pesos de cada una de las sustancias detectadas [86] , las unidades de estos pesos están en mg:

$$W = \frac{W_s}{a} * \left(\frac{A}{A_s} - b \right) \quad (3-19)$$

Un aspecto que se debe establecer antes es la $A_s = 27174,8972$ y $W_s = 5$ mg. Planteando la ecuación (3-19), se calcula el contenido de monoglicéridos encontrados en la muestra de biodiesel a partir de aceites usados de fritura soya y etanol, los demás datos solo se mencionaran debido a que el proceso que se efectúa es el mismo para los demás pesos del contenido dentro de la muestra de biodiesel.

$$W = \frac{W_s}{a} * \left(\frac{A_{Total}}{A_s} - b \right)$$

$$W = \frac{5}{1,1374} * \left(\frac{3110,29424}{27174,8972} - (-0,0765) \right)$$

$$W = 0,84 \text{ mg}$$

Los pesos de todas las sustancias y el porcentaje en peso de la muestra de biodiesel obtenido en el laboratorio se pueden apreciar en la tabla 3-28:

Tabla 3-28: Composición de la muestra de biodiesel obtenido en el laboratorio con las mejores condiciones del ensayo 12.

	W (mg)	% p/p
FAEE	22,57	96,41
Monoglicéridos	0,84	3,59
Diglicéridos	0	0
Triglicéridos	0	0
Total	23,41	100

Fuente: Autor.

La cromatografía de gases permitió verificar la presencia de los ésteres etílicos de ácidos grasos que son el principal componente del biodiesel siendo 96,41% para el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite usados de fritura de soja y etanol obtenido en el laboratorio. Un aspecto importante que se puede observar en el cromatograma, infiriendo que no hay presencia de aceite (TG) en el producto final, significando que todos reaccionaron para formar FAEE's, MG y DG. De acuerdo a la norma EN 14105 y ASTM D6584 el contenido máximo de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos presente en el biodiesel debe ser 0,8%, 0,2%, 0,2% respectivamente. Los resultados muestran que el contenido de monoglicéridos no cumple con lo exigido pero los diglicéridos y triglicéridos si cumplen las condiciones de normatividad. Los monoglicéridos presentes se deben a la posible formación de estos durante la reacción.

Teniendo ya los parámetros del proceso, se elaboró la Tabla 3-29, en base a los datos de las propiedades de la muestra que contenga las variables mencionadas anteriormente. Valores que se reportaron en el numeral 3.4 de este documento.

En conclusión se logra establecer que el biodiesel con mejor rendimiento (88,9%), obtenido en el laboratorio a partir de aceite usado de fritura de soja y etanol, se desarrolló a partir del proceso de producción que tiene la relación molar aceite:alcohol de 1:7, %p/p catalizador de 0,7, temperatura de 60 °C y agente de lavado agua a 40 °C, sin embargo según el estudio desarrollado para sus propiedades se observa que la muestra no cumple en: el parámetro de contenido de cenizas con una diferencia por el rango superior de 0,037%, el contenido de agua con una variación de 0,006% por encima del valor estándar y con el contenido de monoglicéridos de 2,5% superior al estándar de la norma, sin embargo se considera que la no superación de estos parámetros se debe a la presencia de agua en el biodiesel, aspecto que pudo ser por tiempos muy cortos en el proceso de separación entre las fases. En cuanto al caso del contenido de monoglicéridos se plantea la posibilidad de que se produjeron como subproductos en las diferentes etapas que suceden dentro del mecanismo de la reacción.

Tabla 3-29: Propiedades del biodiesel obtenido del ensayo 12 con las mejores condiciones a partir de aceite de fritura y etanol.

Parámetro	Valor obtenido	Valor reportado		Unidad	Norma
		EN14214	ASTM D 6751		
Densidad a 15°C	899	860-900	-	kg/m ³	EN ISO 12185
Viscosidad a 40°C	4,45	3,5 – 5,0	1,9 – 6,0	mm ² /s	ASTM D445
Contenido de cenizas	0,057	0,02 Máx.	0,020 Máx	%(m/m)	ASTM – D 6751
Índice de acidez	0,39	0,5 Máx	0,8 Máx	mg KOH/ g aceite	EN 14104
Punto de nube	4,0	-	-	°C	ASTM-D 2500
Contenido de agua	0,056	0,05 Máx	0,05 Máx	%	ASTM-D 130
Masa molar	303,15	-	-	g/mol	[48]
Monoglicéridos	3,59	0,8 Máx	-	%(m/m)	EN14105
Diglicéridos	0	0,2 Máx	-	%(m/m)	EN14105
Triglicéridos	0	0,2 Máx	-	%(m/m)	EN14105

Fuente: Autor.

4. Ingeniería Conceptual del proceso de producción de biodiesel

La Ingeniería Conceptual corresponde a la primera fase o etapa de un proyecto de ingeniería, en la cual se analiza y comprende la necesidad que se plantea, se crea o establecen alternativas a la solución, en donde se establece que tipo de tecnología se aplicara. En esta fase se emite un concepto que se generó por la combinación de aspectos químicos, físicos y biológicos que permiten plantear un resultado a la idea proyectada, no sin antes de hacerle una evaluación a la alternativa desde la parte técnica, económica y social.

Un aspecto importante en el diseño conceptual para la elaboración del biodiesel es establecer el tipo de proceso (Batch o continuo), los flujos de salidas y entradas, los balances de energía y materia y finalmente construir de flujo de proceso (PFD) [85]. Los principales conceptos a examinar y establecer en esta fase del proyecto son: productos y capacidad de producción, diagramas de procesos, diagramas de bloques, flujos de materiales, listados de equipos preliminares, planos de alternativas, etc.

4.1 Capacidad de producción

Este punto se divide en el planteamiento de dos aspectos.

- Capacidad Instalada. Se opta por una planta que posee una capacidad instalada de 53550 L/año. La capacidad mencionada anteriormente se estableció por el consumo semanal de aceite de fritura que produce el sector hotelero y el volumen de producción que estableció la investigación efectuada en la localidad tercera de la ciudad de Bogotá, sin embargo es de mencionar que faltaría incluir la producción de los pequeños establecimientos (Restaurantes, locales de comida rápida, puestos cajelleros, etc) de comidas que tienen las diferentes localidades de la ciudad.
- Capacidad de producción. Esta capacidad se define por las condiciones mencionadas en el numeral 3.4.3. En este punto, se establece la opción para la producción de biodiesel con las mejores condiciones de rendimiento (88,9%) de biocombustible obtenido en el laboratorio. Basados en estos aspectos mencionados se define que la planta de producción de biodiesel tendrán una capacidad de producción de 47606 L/año.

4.2 Tipo de proceso para la producción de biodiesel.

Para llevar a cabo el proceso, primero fue necesario definir las variables del proceso mediante el desarrollo experimental en el laboratorio (3.3.2). El proceso que se empleara para la producción de biodiesel es el proceso tipo Batch bajo las condiciones establecidas en la etapa de experimentación de laboratorio.

Este proceso es una buena alternativa debido a la flexibilidad que presenta en los ajustes de los equipos, proceso y producto, además que este tipo de proceso se emplea en plantas que tienen una menor capacidad de producción y diferentes calidades de materia prima, además que la viabilidad del proyecto es la de definir los parámetros para la construcción de una planta piloto, y posteriormente en condiciones de tipo semi-industrial.

Se establece el tamaño del lote (T_L) diaria, que se necesita para efectuar la producción planteada de 47606 L de biodiesel/año. Para esto se establece que los días trabajados son 340 días, debido a que los otros días restantes se asumen como los días de vacaciones laborales que a su vez servirán para efectuar procesos de mantenimiento y condiciones de imprevistos ya sean por equipos, suministros de materia prima, etc. En la ecuación 4-1, se puede observar la obtención de tamaño del lote (T_L).

$$T_{L \text{ al día}} = \text{Producción} \times \text{relacion del tiempo de producción} \quad (4-1)$$

$$T_{L / \text{ día}} = 47606 \frac{L}{\text{Año}} \times \frac{1 \text{ año}}{340 \text{ días}} = 140 \frac{L}{\text{ día}}$$

Entonces la capacidad de producción diaria será de 140 L/día, para efectuar la producción se tendrá solo un reactor tipo batch, ya que el espacio de instalación no es muy grande (25,5 m²), y la capacidad de producción no es muy alta. Además el tiempo de cada producción elaborado en el laboratorio fue aproximadamente de 8 h, otro aspecto que debe mencionar es que la carga del aceite al tanque de almacenamiento es manual, por esta razón se establece que la condición la planta trabajara 12 h diarias, con estos datos se establecerá el número de lotes que se fabricaran por día.

$$N_L = \frac{12 \text{ h}}{\text{ día}} \times \frac{1 \text{ lote}}{8 \text{ h}} = 1,5 \frac{\text{ lote}}{\text{ día}}$$

Teniendo en cuenta estos datos anteriores, se definirá el tamaño que tendrá un lote:

$$T_L = \frac{140 \frac{L}{\text{ día}}}{1,5 \frac{\text{ lote}}{\text{ día}}} = 93,3 \frac{L}{\text{ lote}} \approx 0,0933 \frac{m^3}{\text{ lote}}$$

El tamaño que tendrá entonces un lote por cada producción es de 93,33 L/Lote; para esto se empleará un reactor con un tamaño de 150 L/Lote. Este dispositivo se cargara solamente con el 70% de su volumen con los reactivos que intervienen en el proceso, ya que el otro 30% se deja por condiciones de seguridad debido a la generación de gases

de algunos de los reactivos, espacio para permitir una adecuada homogenización en la agitación de los reactivos y así obtener una reacción completa en el proceso.

4.3 Requerimientos del proceso

Dentro de este aspecto se menciona que la ruta química que se empleará en el proceso es la esterificación catalítica del aceite usado de fritura de soja en medio ácido con etanol y la reacción de transesterificación de la fase esterificada por medio de un catalizador homogéneo básico con etanol, ya mencionada la ruta química se tratarán las materias primas y los servicios adicionales que se utilizarán en el proceso.

- **Materias Primas.** Toda la justificación de la selección de las materias primas se definió en el capítulo selección de variables (3.1). De acuerdo con estos resultados, las materias primas que se emplearán para el proceso de producción del biodiesel serán:

Aceite Usado de fritura de soja, suministrado por el hotel Estelar ubicado en la ciudad de Bogotá. Este material es enviado por el hotel al laboratorio de combustibles líquidos del edificio de Química.

Etanol (C_2H_6O) con pureza del 96%

Hidróxido de sodio (NaOH), en escamas con una pureza del 98%

Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), del 98%.

Ácido acético ($C_2H_4O_2$), glacial del 99%

- **Servicios.** Los servicios adicionales requeridos para el proceso de producción del biocombustible son:

Agua caliente a una temperatura de 65 °C. Elemento que se empleará en el calentamiento de las materias primas dentro del reactor.

Agua a temperatura ambiente. Sustancia que se empleará para condensar el vapor de etanol en el interior del reactor.

Energía Eléctrica a 110 V, para conexión de motores, bombas, resistencias eléctricas.

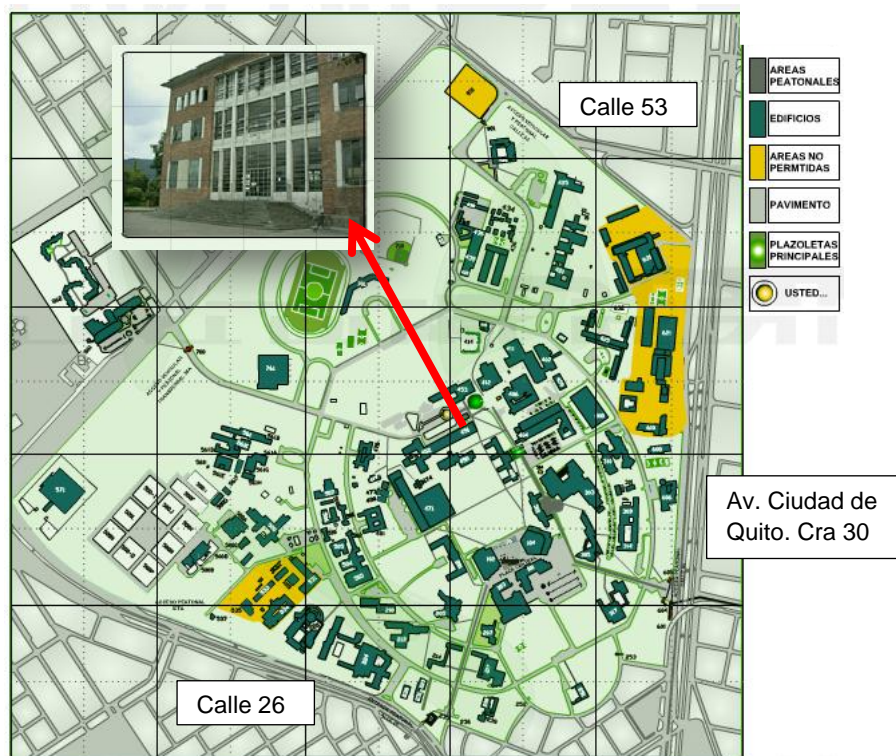
Un aspecto de gran importancia está en obtener un producto con unos rangos ajustados a los parámetros establecidos en las normas ASTM D6751 ó EN14214.

4.4 Ubicación y plan plot de la planta piloto de biodiesel

La planta se ubicará en la ciudad de Bogotá D. C, en el Laboratorio de Biocombustibles del Departamento de Química (Edificio 451), de la Universidad Nacional de Colombia, ver figura 4-1. Se decide este lugar debido a diversos factores: La ubicación estratégica para recepción de la materia prima y transporte del biodiesel generado, por que se cuenta con equipos y laboratorios cercanos para efectuar controles de calidad del biodiesel generado en la planta, por contar con laboratorios y personal de otras disciplinas que colaboraran en el montaje, puesta punto y futuros mantenimientos de la planta, por último se cuenta con un espacio físico que cuenta con área aproximada de 25,5 m² y 7 m de altura,

condiciones adecuadas de ventilación, servicio de agua, eléctricas y controles contra incendios.

Figura 4-1: Ubicación de la planta piloto de biodiesel

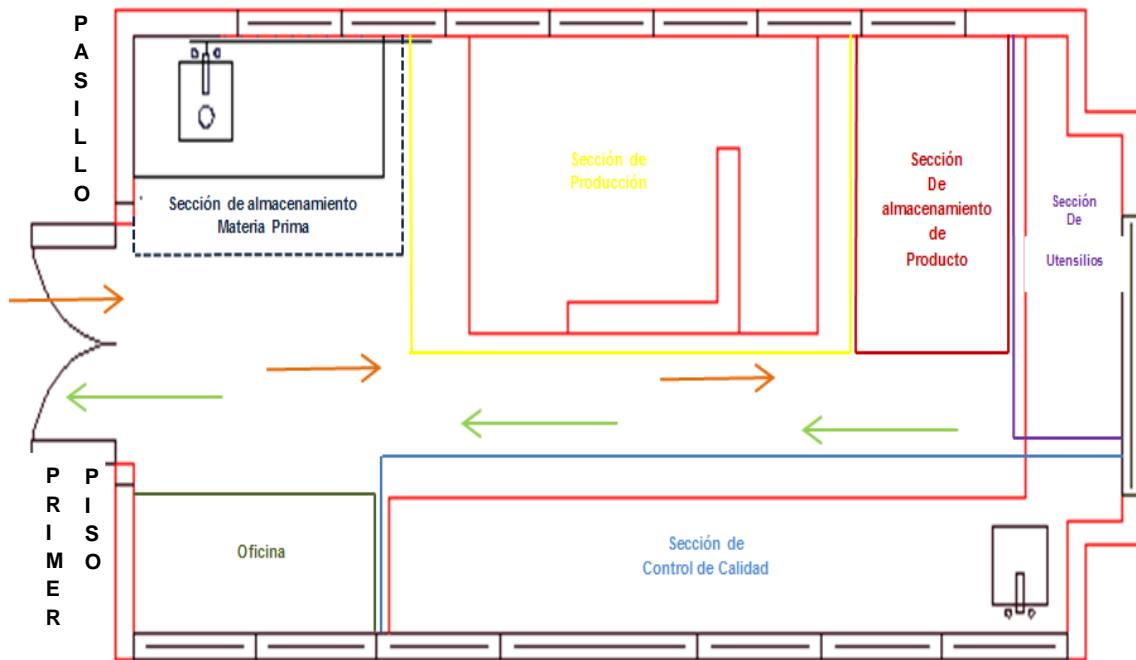


Fuente: www.recursosfisicos.unal.edu.co

Definida la ubicación, se establece el plot plant¹⁵ de la planta ya que para todo el diseño del proceso se debe conocer de forma clara la distribución de cada una de las partes que componen la planta. En la figura 4-2, se observa el diseño de la distribución del Laboratorio de Biocombustibles donde se ejecutara el montaje de la planta piloto (Sección de producción) para el proceso de generación del biodiesel a partir de aceite de fritura y etanol.

¹⁵ Se conoce también como plano maestro. Es el diagrama de distribución de equipos, espacios, que comúnmente se conoce como vista aérea. Tiene el objetivo fundamental de mostrar la distribución de los espacios.

Figura 4-2: Plano maestro de la distribución del laboratorio de biocombustibles.



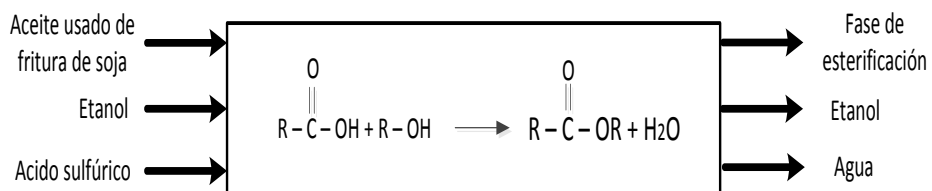
Fuente: Autor

4.5 Diagramas de proceso

4.5.1 Diagrama general de entradas y salidas

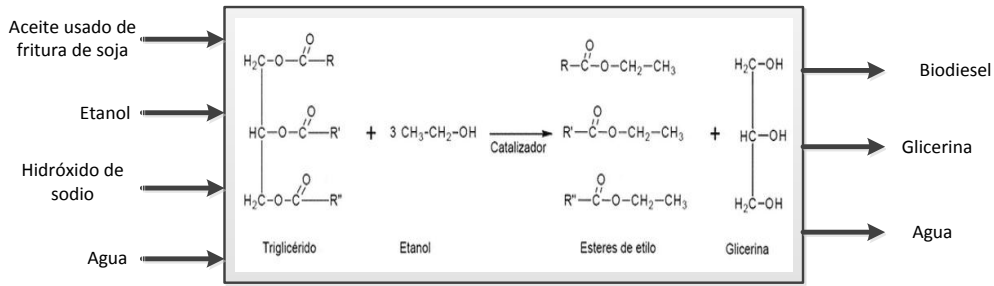
Como se mencionó en capítulos anteriores el proceso para la producción de biodiesel con aceite usado de fritura de soja, se desarrollará en la reacción de esterificación (Figura 4-3), y la reacción de transesterificación (Figura 4-4). Debido al índice de acidez que posee esta materia prima, se plantean dos diagramas generales de entradas y salidas donde se muestran los reactivos que ingresan y los productos o subproductos obtenidos en cada una de las reacciones.

Figura 4-3: Diagrama general de entradas y salidas para la esterificación



Fuente: Autor

Figura 4-4: Diagrama de entrada y salidas del proceso de transesterificación.

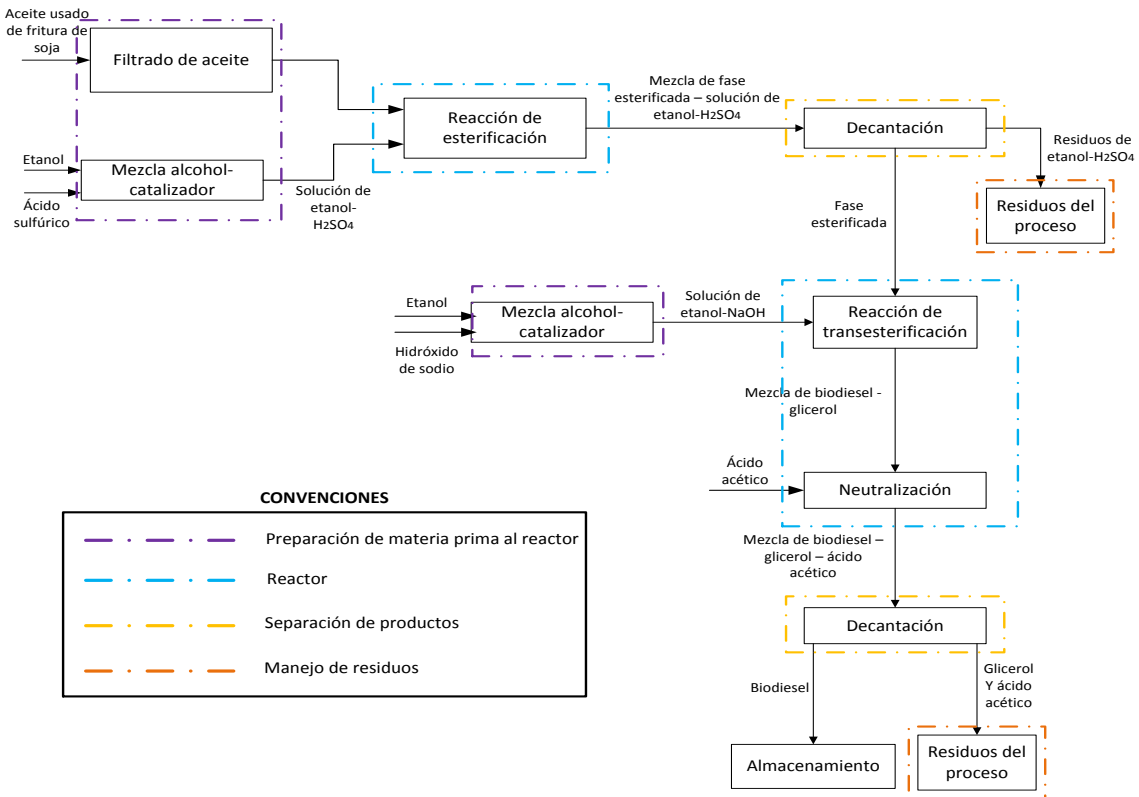


Fuente: Autor

4.5.2 Diagrama genérico de bloques

Es una representación gráfica y simplificada de la correlación de la causa y efecto entre la entrada y la salida de un sistema físico. Suministra un procedimiento ventajoso y conveniente para especificar las interacciones entre las diversas etapas o fases de un sistema. Para el caso de estudio, en este diagrama se puede observar el orden de las operaciones que deben llevarse a cabo para la producción de biodiesel. Ver figura 4-5.

Figura 4-5: Diagrama genérico de bloques (GDFB)



Fuente: Autor.

4.6 Balance de masa y energía

Para el desarrollo de este capítulo se tomarán los datos obtenidos en el capítulo 3.4.3, para las mejores condiciones obtenidas en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de fritura de soja y etanol a nivel de laboratorio, las cuales corresponden al ensayo número 12. La producción de este ensayo obtuvo un rendimiento del 88,9% de biodiesel, las mejores condiciones obtenidas en el proceso de producción son:

- Relación molar aceite: alcohol de 1:7.
- %p/p catalizador de 0,7.
- Temperatura de 60 °C.
- Agente de lavado Agua a 40 °C.

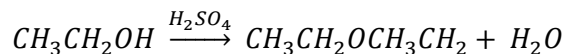
Un aspecto importante es que para la realización de los balances es preciso escalar las condiciones mencionadas anteriormente para un lote de 105 L/Lote. La producción obtenida con este escalamiento debe permitir obtener un rendimiento aproximado al producido en el laboratorio (88,9% de biodiesel). La codificación mencionada de los equipos en los balances, corresponde al diagrama de flujo del proceso (PFD), que se estableció de los resultados obtenidos en el capítulo 3, ver figura 4-11.

4.6.1 Balance de materia

Para el inicio de este proceso se tiene un tamaño de un lote 93,33 L/Lote y a partir del rendimiento (88,9%), obtenido en los ensayos del laboratorio, se calcula la masa de AUFS. En este análisis se plantean la masa que entra a la operación y la masa que sale de la operación después de producida la transformación de los reactivos. En los siguientes apartados, se montará los datos correspondientes de cada una de las etapas que intervienen en el proceso.

- Balance de masa en el mezclador (Etanol y ácido sulfúrico)

El balance se plantea a partir de la estequiometría de la reacción:



Especificaciones para la reacción: Todo el H₂SO₄ está disuelto en el etanol; el reactivo limitante es el H₂SO₄, la relación molar es 1:1, por último el etanol está en exceso. En la tabla 4-1, siguiente se plantean los datos del balance de la masa.

Tabla 4-1: Balance de masa (Etanol y H₂SO₄)

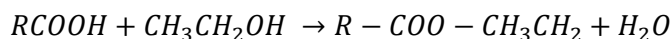
Sustancia	M (g/mol)	Cantidad (kg)	Moles
Entradas			
C ₂ H ₆ O	46,07	32,37	702,6
H ₂ SO ₄	98,08	2,97	30,3
Salidas			
C ₂ H ₆ O	46,07	30,98	672,35

C ₄ H ₁₀ O	74,12	3,8	51,27
H ₂ O	18,01	0,545	30,26

Fuente: Autor.

- Balance de masa del reactor – proceso de esterificación

El balance se plantea a partir de la estequiometría producida en la reacción, la cual es:



Especificaciones para la reacción: Todo el H₂SO₄ está disuelto en el etanol; el reactivo limitante es el AUFS, la relación molar es 1:1, el etanol esta en exceso. En la tabla 4-2 siguiente se plantean los datos del balance de la masa.

Tabla 4-2: Balance en el reactor (T-1) reacción de esterificación

Sustancia	M (g/mol)	Cantidad (kg)	Moles
Entradas			
AUFS	871,7	87,5	100,38
C ₄ H ₁₀ O	74,12	35,3	476,2
Salidas			
FE*	528,9	96,06	181,6
C ₄ H ₁₀ O	74,12	21,17	285,6
H ₂ O	18,01	5,60	310,9

*Fase esterificada (FE): FAEE's + TG + DG + MG + trazas de etanol

Fuente: Autor

- Balance de masa del separador (D-1)

En esta etapa no se produce ninguna condición de reacción, solamente se emplea para que se produzca la separación entre las dos fases obtenidas en la etapa anterior. Para la separación de las fases no se aplica ningún proceso solamente se realiza a partir de las diferencias entre las densidades de las sustancias. Las operaciones se ejecutan a temperatura ambiente y presión atmosférica, en la Tabla 4-3, se puede observar los resultados obtenidos en esta etapa.

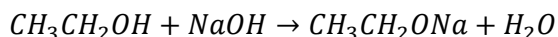
Tabla 4-3: Balance del separador.

Sustancia	M (g/mol)	Cantidad (kg)	Moles
Entradas			
FE*	528,90	96,06	181,6
C ₄ H ₁₀ O	74,12	21,17	285,6
H ₂ O	18,01	5,60	310,9
Salidas			
FE*	528,90	96,06	181,6
C ₄ H ₁₀ O	74,12	21,17	285,6
H ₂ O	18,01	5,60	310,9

Fuente: Autor.

- Balance de masa del mezclador (T-3) etanol / NaOH

La reacción estequiométrica en el proceso está dada por:



Especificaciones para la reacción: Todo el NaOH está disuelto en el etanol; el reactivo limitante es el NaOH, la relación molar es 1:1, el etanol este se encuentra en exceso en la mezcla. En la tabla 4-4, se plantean los datos del balance de la masa para el mezclador T-3.

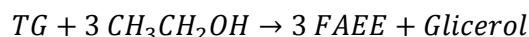
Tabla 4-4: Balance de masa mezclador (T-3) etanol / NaOH

Sustancia	M (g/mol)	Cantidad (kg)	Moles
Entradas			
C ₂ H ₆ O	46,1	35,5	770,1
NaOH	39,9	1,3	32,58
Salidas			
C ₂ H ₅ ONa	68,03	2,2	32,3
C ₂ H ₆ O	46,1	34,04	738,4
H ₂ O	18,01	0,58	32,2

Fuente: Autor

- Balance del masa del reactor (T-1) reacción de transesterificación

En esta fase del proceso se procede bajo la siguiente reacción



Esta reacción estequiométrica está establecida TG, DG, MG y los FAEE que se generaron en la esterificación, esta reacción por 1 mol de TG con 3 moles de etanol produce 3 mol de FAEE y 1 mol de G, esta mol de glicerol tiene trazas de alcohol, catalizador y jabones. En esta reacción se empleó una agitación mecánica, temperatura de 60 °C y una presión atmosférica. En la tabla 4-5, se puede observar los resultados obtenidos en el reactor T-1 en la fase del proceso de transesterificación.

Tabla 4-5: Balance de masa reactor T-1 reacción de transesterificación

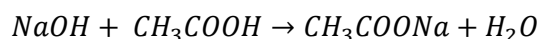
Sustancia	M (g/mol)	Cantidad (kg)	Moles
Entradas			
FE	528,9	96,06	181,62
C ₂ H ₅ ONa	68,03	36,2	532,1
H ₂ O	18,01	0,58	32,2
Salidas			
Biodiesel *	303,15	101,2	335,8
Glicerol*	92,1	35,1	381,1

* Contiene trazas de etanol + catalizador + jabones + agua

Fuente: Autor.

- Balance de masa de la neutralización reactor T-1

Para esta fase se empleó ácido acético glacial, la reacción estequiométrica que se tiene en este parte es:



En esta reacción se emplea una agitación mecánica, temperatura de 60 °C y una presión atmosférica. En la tabla 4-6, se puede observar los resultados obtenidos en el reactor T-1, en la reacción de neutralización.

Tabla 4-6: Balance de masa del reactor T-1 reacción de neutralización

Sustancia	M (g/mol)	Cantidad (kg)	Moles
Entradas			
Mezcla de biodiesel + glicerol	303,15	132,9	438,4
CH ₃ COOH	60,05	3,31	55,2
Salidas			
Mezcla de biodiesel + otros*	303,15	136,2	449,3

* Mezcla de biodiesel + glicerol + CH₃COONa + H₂O

Fuente: Autor.

- Balance de masa del separador (D-1)

En la etapa de decantación no se tiene ninguna reacción para obtener los productos generados de la mezcla que se vierte en el decantador (D-1). Las sustancias solamente se separan por la diferencia entre las densidades e insolubilidades de las dos fases. El proceso se efectúa a temperatura ambiente, presión atmosférica, en la Tabla 4-7, se puede observar los resultados obtenidos en esta etapa.

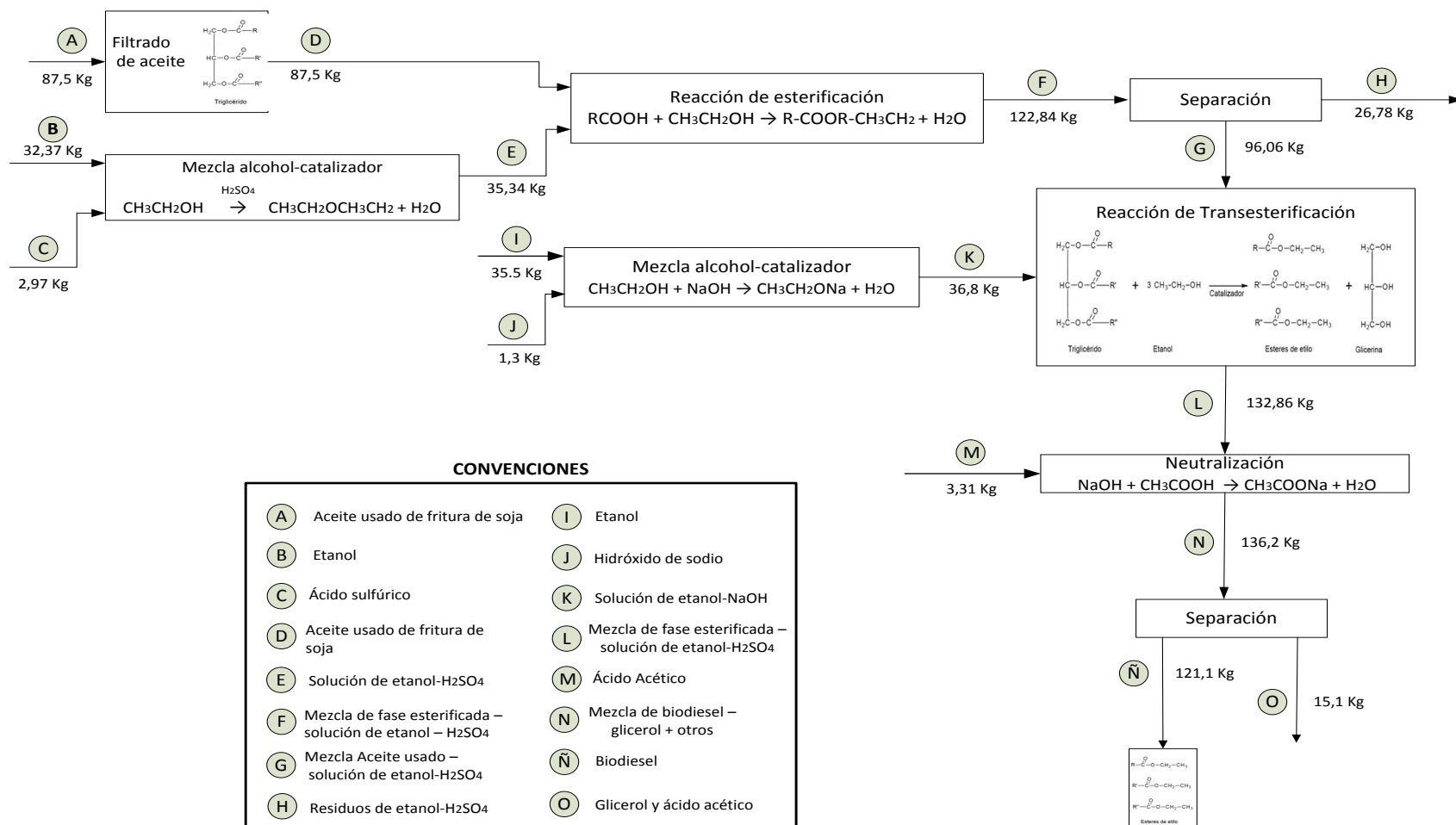
Tabla 4-7: Balance de masa de la etapa de separación D-1

Sustancia	M (g/mol)	Cantidad (kg)	Moles
Entradas			
Mezcla de biodiesel + otros	303,15	136,2	449,3
Salidas			
Biodiesel	303,15	121,1	399,47
Glicerol*	92,1	15,1	163,9

*Contiene C₂H₆O + H₂O + CH₃COONa + jabones

Basado en los resultados obtenidos en cada uno de los balances planteados en el diagrama genérico de bloques, se construye un diagrama de balances de masa con los datos obtenidos en la entrada y salida de cada una de las operaciones, además se relaciona en las etapas donde se produzca reacción, la estequiometría de los reactivos que entran en cada fase del proceso. En la figura 4-6, se observa el resumen de los balances de masa obtenidos para el proceso de producción de biodiesel a partir de AUFS y etanol, con un proceso de esterificación con catalizador ácido y un proceso de transesterificación con catalizador básico.

Figura 4-6: Diagrama de balances de masa por operación del proceso de producción de biodiesel.



Fuente: Autor.

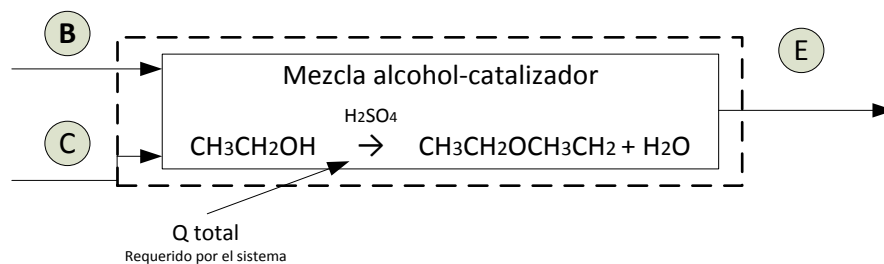
4.6.2 Balance de energía

Un aspecto de los balances de energía es que el principio que los rige es la ley de la conservación de la energía, el cual menciona que la energía no se destruye ni puede crearse - condición que excluye a la generación de energía nuclear -, esto también es conocido como la primera ley de la termodinámica. En un balance de energía es de gran importancia identificar si el sistema de análisis será abierto o cerrado, esto se establece a partir de que la masa pueda o no atravesar los límites del sistema durante el tiempo definido para el balance de energía, por lo general un proceso batch o por lotes es considerado un sistema cerrado. Es importante mencionar que el proceso de biodiesel planteado en el estudio tiene como característica ser un proceso de tipo isobárico ($\Delta P = 0$); es decir, un proceso a presión constante. Basado en los aspectos antes mencionados, en los balances de masa obtenidos anteriormente, el PFD (Figura 4-11) y el diagrama del balance de masa (Figura 4-6), se procede a plantear el análisis del balance de energía para cada etapa del proceso que requiere un incremento de energía en la producción de biodiesel a partir de AUFS y Etanol.

- Balance de energía del mezclador C_2H_6O / H_2SO_4

El mezclador se alimenta de un flujo de etanol (B) y un flujo de ácido sulfúrico (C), obteniendo o saliendo al final del sistema un éter etílico, etanol y agua (E). En la figura 4-7 se observa las condiciones de entrada y salida en el mezclador.

Figura 4-7: Diagrama para el balance de la energía del mezclador de C_2H_6O / H_2SO_4



Fuente: Autor.

Con el anterior diagrama se establece el balance de energía para este equipo (ecuación 4-1),

$$\sum \Delta H_{Reactivos} + Q_{mezclador} = \sum \Delta H_{Productos} \dots\dots\dots(4-1)$$

Después se reemplaza la ecuación anterior en base a las masas, calor específico a presión constante de cada reactantes y reactivos y por último con la diferencia de temperaturas. Reemplazando con los criterios mencionados anteriormente obtenemos la ecuación 4-2:

$$((m_{C_2H_6O} \times Cp_{C_2H_6O} \times \Delta T) + (m_{H_2SO_4} \times Cp_{H_2SO_4} \times \Delta T)) + Q = ((m_{C_4H_{10}O} \times Cp_{C_4H_{10}O} \times \Delta T) + (m_{H_2O} \times Cp_{H_2O} \times \Delta T) + m_{C_2H_6O} \times Cp_{C_2H_6O} \times \Delta T) \dots\dots\dots(4-2)$$

Despejando la ecuación 4-2, en función de la variable de calor se obtiene la ecuación 4-3 que se puede observar a continuación.

$$Q = ((m_{C_4H_{10}O} \times C_{p_{C_4H_{10}O}} \times (T_{final} - T_{Inicio})) + (m_{H_2O} \times C_{p_{H_2O}} \times (T_{final} - T_{Inicio})) + m_{C_2H_6O} \times C_{p_{C_2H_6O}} \times (40\text{ }^\circ\text{C} - 18\text{ }^\circ\text{C})) - \dots\dots\dots(4-3)$$

$$((m_{C_2H_6O} \times C_{p_{C_2H_6O}} \times (T_{final} - T_{Inicio})) + (m_{H_2SO_4} \times C_{p_{H_2SO_4}} \times (T_{final} - T_{Inicio})))$$

Remplazando la ecuación con los datos obtenidos en la tabla 4-1 del balance de masa y los datos del calor específico a presión constante de los reactivos y productos (Tabla 4-8).

Tabla 4-8: Calor específico de los reactivos y productos del proceso de biodiesel

Sustancia	Calor específico a presión constante (Cp)	
	$\frac{KJ}{Kg\ K}$	$\frac{J}{g\ ^\circ C}$
Etanol	2,46	2,44
Ácido sulfúrico	-	1,38
Éter etílico	2,261	-
Hidróxido de sodio	3,33	-
Agua	4,18	4,18
Ácido acético	2,13	-
Etóxido de sodio	1,233	-
Triglicérido	2,057	-
Biodiesel	2,23	-
Glicerol	1,25	-

Fuente: [85] [87]

Obtenida la ecuación del balance de energía para el mezclador se procede a remplazar y calcular el calor (Q_{total}) requerido para elevar la temperatura de la solución de 18 °C a 40 °C en el mezclador a partir de la ecuación 4-3.

$$Q = ((3800\text{ g} \times 2,261 \frac{J}{g\ x\ ^\circ C} \times (40\text{ }^\circ\text{C} - 18\text{ }^\circ\text{C})) + (545\text{ g} \times 4,18 \frac{J}{g\ x\ ^\circ C} \times (40\text{ }^\circ\text{C} - 18\text{ }^\circ\text{C})) + 30980\text{ g} \times 2,44 \frac{J}{g\ x\ ^\circ C} \times (40\text{ }^\circ\text{C} - 18\text{ }^\circ\text{C})) - ((32370\text{ g} \times 2,44 \frac{J}{g\ x\ ^\circ C} \times (40\text{ }^\circ\text{C} - 18\text{ }^\circ\text{C})) + (2970\text{ g} \times 1,38 \frac{J}{g\ x\ ^\circ C} \times (40\text{ }^\circ\text{C} - 18\text{ }^\circ\text{C})))$$

$$Q = 74353,4\text{ J} \approx 74,353\text{ KJ}$$

Desarrollada la ecuación y obtenidos los datos, se plantean los resultados conseguidos en el balance de energía del mezclador en la tabla 4-9.

Tabla 4-9: Balance de energía del mezclador de C₂H₆O / H₂SO₄

Calor mezclador (Q _m)	
Flujos – Temperatura entradas	
C ₂ H ₆ O	32,7 kg

Calor mezclador (Q _m)	
H ₂ SO ₄	2,970Kg
Temperatura	18 °C ó 291,15 K
Flujos – Temperatura salida	
C ₂ H ₆ O	30,980 kg
C ₄ H ₁₀ O	3,8 kg
H ₂ O	0,545 kg
Temperatura	40 °C ó 313,15 K
(Q _m)	74,353 kJ

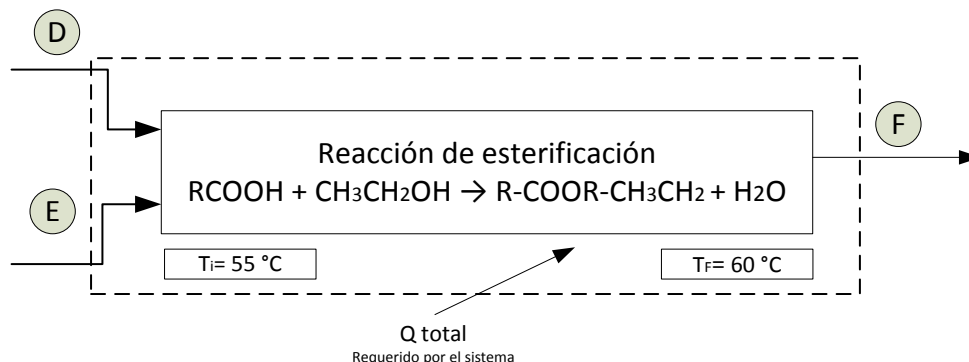
Fuente: Autor.

En conclusión se puede establecer que la energía que debe suministrar el equipo (Mezclador), debe ser de 74,3 KJ, para obtener las condiciones adecuadas al proceso de producción. Es de mencionar que todos los procesos que se desarrollen de balance de energía tienen el mismo planteamiento que el anterior tratamiento por lo cual solo los demás procedimientos no se desarrollaran solo se planteara la ecuación y la tabla de resultados.

- Balance de energía del reactor T-1 reacción de esterificación

El reactor se alimenta de un flujo de etanol, éter etílico y agua (E), obtenido en el mezclador a una temperatura de 40 °C a la salida del equipo, además es alimentado por el flujo (D) de AUFS, después de efectuadas la etapa de reacción los productos que se obtienen a la salida del reactor son una fase esterificada (TG + DG + MG + FAEE), agua y etanol (F). En la figura 4-8 se observa las condiciones mencionadas anteriormente en el reactor tipo batch.

Figura 4-8: Balance de energía del reactor T-1 reacción de esterificación



Fuente Autor.

En la figura anterior se dan algunos datos para plantear el balance de energía para el reactor (ecuación 4-4), los datos del calor específico a presión constante de los reactivos y productos se especifican en la tabla 4-10.

$$((m_{AG} \times Cp_{AG} \times \Delta T) + (m_{C_2H_6O} \times Cp_{C_2H_6O} \times \Delta T) + (m_{H_2O} \times Cp_{H_2O} \times \Delta T)) + Q = ((m_{FE} \times Cp_{FE} \times \Delta T) + (m_{C_2H_6O} \times Cp_{C_2H_6O} \times \Delta T) + \dots \dots \dots (4-4)$$

$$(m_{H_2O} \times Cp_{H_2O} \times \Delta T))$$

Establecida la ecuación se procede a desarrollarla, ya conseguido los datos, se construye la tabla 4-10 donde se muestran los resultados del balance de energía de reactor para el proceso de esterificación.

Tabla 4-10: Balance de energía del reactor T-1 reacción de esterificación

Calor reactor (Q _R)	
Flujos – Temperatura entradas	
AUFS	87,5 kg
C ₂ H ₆ O	35,3 kg
Temperatura	55 °C ó 328,15 K
Flujos – Temperatura salida	
FE	96,06 kg
C ₂ H ₆ O	21,17 kg
H ₂ O	5,60 kg
Temperatura	60 °C ó 333,15 K
(Q _R)	409,7 kJ

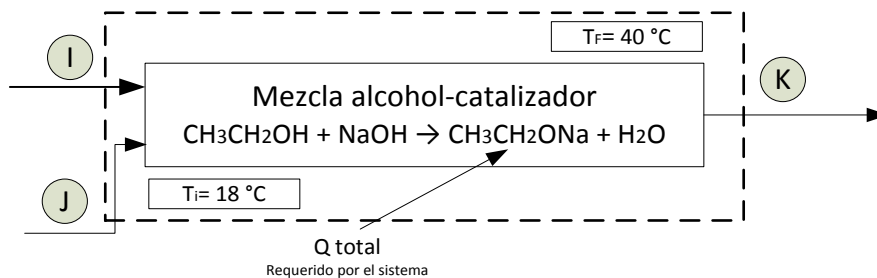
▪ Fuente: Autor.

La energía que el reactor debe suministrar al sistema de es 409,7 kJ, para lograr una reacción completa en el proceso de esterificación.

▪ Balance de energía del mezclador T-3 Etanol / NaOH

Este balance es similar al efectuado a la figura 4-7, sin embargo para este caso el mezclador se alimenta con un flujo de masa de etanol (I) y de NaOH (J), al ingresar estas sustancias se mezclan al interior de dispositivo por medio de un sistema de agitación y un aumento en la temperatura que se suministra, pasado determinado tiempo se tiene a la salida del mezclador (K) un etóxido de sodio y agua. Ver en la figura 4-9, el esquema del mezclador con sus entradas y salidas de flujo.

Figura 4-9: Balance de masa del mezclador T-3 etanol / NaOH



Fuente: Autor.

Basado en la ecuación 4-5, se establecen los datos para esta etapa del proceso.

$$((m_{C_2H_6O} \times C_{p_{C_2H_6O}} \times \Delta T) + (m_{NaOH} \times C_{p_{NaOH}} \times \Delta T)) + Q = ((m_{C_2H_5ONa} \times C_{p_{C_2H_5ONa}} \times \Delta T) + (m_{H_2O} \times C_{p_{H_2O}} \times \Delta T) + ((m_{C_2H_6O} \times C_{p_{C_2H_6O}} \times \Delta T)) \dots\dots\dots(4-5)$$

En la tabla 4-11, donde se plantean los resultados obtenidos de la ecuación 4-5, para el balance de energía del T-3.

Tabla 4-11: Balance de energía del mezclador T-3 etanol / NaOH

Calor mezclador (Q_M)	
Flujos – Temperatura entradas	
C_2H_6O	35,5 kg
NaOH	1,3 kg
Temperatura	18 °C ó 328,15 K
Flujos – Temperatura salida	
CH_3CH_2ONa	2,2 kg
C_2H_6O	34,04 kg
H_2O	0,58 kg
Temperatura	40 °C ó 313,15 K
(Q_m)	60,1 kJ

- Fuente: Autor.

Para el proceso en el reactor se necesitan 60,1 KJ, para conservar las características planteadas para la producción.

- Balance de energía del reactor T-1 reacción de transesterificación.

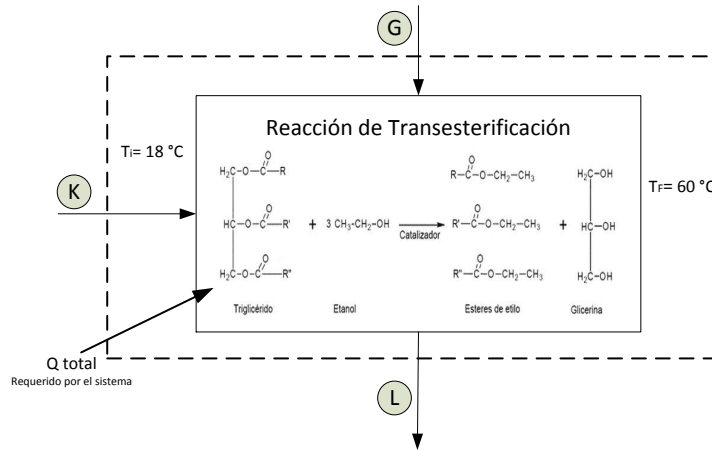
Esta es la última fase de análisis del balance de energía del proceso de producción de biodiesel, dos aspectos que se especifican para esta etapa que corresponde a la presión constante (1 Atm) y que el proceso tendrá una agitación en la mezcla de los reactivos, con el fin de aumentar el proceso de la transferencia de masa en la reacción, además el sistema inicia a una temperatura de 55 °C y sube a 60 °C permaneciendo constante en todo el período de reacción. La etapa inicia con una adición de flujo (Fase esterificada) al interior del reactor (G). Seguidamente se inicia con el precalentamiento del FE hasta conseguir la temperatura de reacción.

Posteriormente un segundo flujo (K), es adicionado al reactor, esta mezcla posee una temperatura de 40 °C, al verter este fluido sobre la FE se pierden 10 °C causado por la diferencia de las temperaturas entre los reactivos. En la figura 4-10, se puede ver el diagrama del reactor con sus respectivos flujo que ingresan, luego del tiempo de la reacción se obtiene el biodiesel y glicerol con trazas de etanol, agua.

Al realizar el planteamiento del balance de energía en el reactor se deben tener algunas consideraciones que permitirán establecer el balance de energía. Las consideraciones son las siguientes:

- Estado estacionario. Las características del sistema físico (Reactor) no varían en el tiempo.
- El sistema estará aislado, razón que permite establecer que la pérdida de calor por convención fuera de los límites de frontera del sistema es pequeña.
- La energía cinética y potencial no experimentan cambios específicos dentro del sistema.

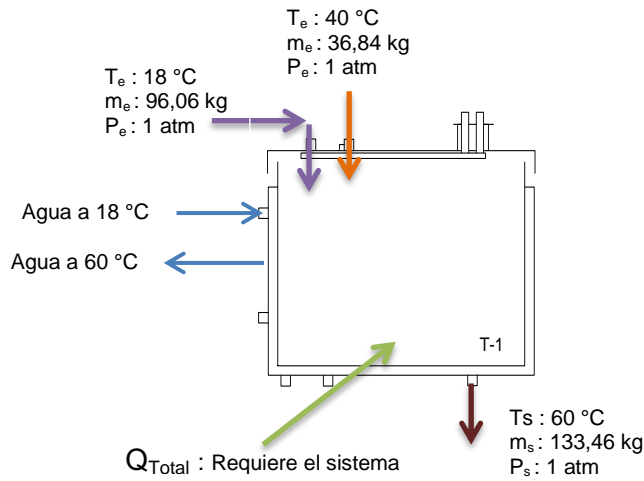
Figura 4-10: Diagrama del balance de energía del reactor T-1 reacción de transesterificación.



Fuente: Autor.

A partir de las consideraciones planteadas y de la figura 4-10 se establece un esquema del reactor con las condiciones del sistema. Ver en la figura 4-11

Figura 4-11: Esquema del reactor con condiciones del sistema de reacción para el balance de energía.



Fuente: Autor

Donde :

- T_e : Temperatura de entrada
- T_s : Temperatura de salida
- m_e : Masa de entrada.
- m_s : Masa de salida
- P_e : Presión de entrada
- P_s : Presión de salida
- Q_{Total} : Calor total demandado por el procedimiento.

Con las condiciones establecidas en la figura 4-11 se establece la ecuación 4-6 para el balance de energía para el reactor.

$$\sum \Delta H_e^{T_e - T_{ref}} + Q_{Total} = \sum \Delta H_s^{T_s - T_{ref}} \tag{4-6}$$

Posteriormente se determina cada valor de los términos de la ecuación 4-6 que sirvan para obtener el Q_{Total} a partir de la tabla 4-12 que corresponde a algunos de los datos del balance de masa para esta etapa del proceso.

Tabla 4-12: Datos para el balance de energía en el reactor.

Compuesto	Entrada			Salida		
	Moles	Masa kg	Temperatura (°C - K)	Moles	Masa kg	Temperatura (°C - K)
AUFS	181,6	96,06	19 °C ≈ 292,15 K	-	-	-
CH ₃ CH ₂ OH	565,3	36,84	40 °C ≈ 313,15 K	-	-	-
FAEE	-	-	-	399,5	121,1	60 °C ≈ 333,15 K
Glicerol	-	-	-	163,5	15,7	60 °C ≈ 333,15 K

Fuente: Autor

Obtenida la información se desarrolla el primer término de la ecuación 4-6, planteando el término se obtiene la ecuación 4-7.

$$\sum \Delta H_e^{Te - T_{ref}} = \sum_i^e m_i \times Cp_i \times \Delta T_{e, ref} + \sum_i^e m_i \times \lambda_i \quad 4-7$$

Un aspecto a resaltar es que el último término de la ecuación 4-7, es cero porque a estas temperaturas de reacción los reactivos no sufren cambios de estado.

$$\sum \Delta H_e^{Te - T_{ref}} = \left(96,06 \text{ Kg} \times 2,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (291,15 \text{ K} - 291,15 \text{ K}) \right) + \left(36,84 \text{ Kg} \times 2,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (291,15 \text{ K} - 291,15 \text{ K}) \right) + (0)$$

$$\sum \Delta H_e^{Te - T_{ref}} = 214,2 \text{ kJ} + 1903,1 \text{ kJ} = 2117,36 \text{ kJ}$$

Obtenida la información del primer término de la ecuación 4-6, se desarrollara el segundo término de la ecuación 4-6. Planteando el segundo término se establece la ecuación 4-8.

$$\sum \Delta H_s^{Ts - T_{ref}} = \sum_i^s m_i \times Cp_i \times \Delta T_{s, ref} + \sum_i^s m_i \times \lambda_i \quad 4-8$$

Como sucede en la ecuación 4-8, al igual que el último término de la ecuación 4-7, es cero debido a con la temperatura que interviene en el proceso los productos no sufren cambios de estado.

$$\sum \Delta H_s^{Ts - T_{ref}} = \left(121,2 \text{ Kg} \times 2,23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (333,15 \text{ K} - 291,14 \text{ K}) \right) + \left(15,7 \text{ Kg} \times 1,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (333,15 \text{ K} - 291,15 \text{ K}) \right) + (0)$$

$$\sum \Delta H_s^{Ts - T_{ref}} = 11351,6 \text{ kJ} + 824,2 \text{ kJ} = 12175,8 \text{ kJ}$$

Obtenidos los datos se determina el calor total del sistema a partir de la ecuación 4-6 que establece el balance de energía para el reactor obteniendo

$$Q_{Total} = \sum \Delta H_s^{Ts - T_{ref}} - \sum \Delta H_e^{Te - T_{ref}} = 12175,8 \text{ kJ} - 2117,36 \text{ kJ} = 10058,4 \text{ kJ}$$

El calor que hay que suministrar al proceso es de 10058,4 kJ, condición que es fundamental, para lograr una reacción completa en el proceso de transesterificación de los reactivos debido que una temperatura constante permite una velocidad de reacción y unas condiciones más adecuadas para la reacción de los reactivos, obteniendo mayor rendimiento de producto en el proceso de producción. Con este dato podemos establecer la masa de agua que necesitamos para producir el intercambio de calor. Planteamos la ecuación 4-9 para balance en el intercambiador de calor.

$$Q_{Total} = m_{H2O} \times C_{p_{H2O}} \times \Delta T + m_{H2O} \times \lambda_{H2O} \quad 4-9$$

El último término de la ecuación 4-7 es cero, porque a la temperatura del intercambio de calor para el proceso el agente de transferencia (Agua) no sufre cambios de estado.

$$10058,4 \text{ kJ} = m_{H2O} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \times (333,15 \text{ K} - 291,14 \text{ K}) + (0)$$

$$m_{H2O} = 58,9 \approx 59 \text{ kg}$$

En conclusión se necesita 59 kg de agua equivalente a $0,0589 \text{ m}^3 \approx 59 \text{ L}$ que se emplearan como elemento de transferencia de calor por convención en el calentamiento de los reactivos y temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ de la reacción del proceso de transesterificación y esterificación.

4.7 Proceso y selección de equipos

Las condiciones en esta etapa del proyecto están planteadas alrededor del reactor que es el equipo principal. Como se mencionó en el inicio del capítulo 4, el proceso se desarrollará utilizando un reactor tipo batch el cual debe contar con un sistema de calentamiento, agitación y un control de temperatura además de un sistema de condensación que permitirá la recirculación de los reactivos que se evaporen dentro del sistema.

Como equipos adicionales se dispondrá de un tanque de mezclado con sistema de agitación y temperatura, tanque para sistema de alimentación del AUFS que a su vez posee un acoplamiento exterior de un sistema de filtrado que permitirá eliminar las impurezas, sedimentaciones y elementos flotantes que contenga el aceite, además tendrá una zona de almacenamiento que tendrá en promedio cuatro tanques de depósito y un decantador.

Aunque en el proceso que se obtuvo en el laboratorio se planteó la condición de lavados con agua a $40 \text{ }^\circ\text{C}$, por condiciones de costos y realizar pruebas del combustibles en otro tipo de equipo que no requiera la exigencia de la calidad del biodiesel por las normas mencionadas, se estimará el diseño de la planta piloto sin contar con equipos de lavado, ya que se desea disminuir el proceso de contaminación de aguas por los residuos del

lavado y la generación de mezclas de residuos que aumenta los costos para el control, almacenamiento, envasado y etiquetado de los desechos en zonas seguras para el manejo de estos desperdicios. Adicionalmente otros equipos que también intervienen en el proceso son bombas para la alimentación de transportes de los reactivos y productos obtenidos durante la fase de producción.

Para facilitar esta parte de la selección, se planteó subdividir la planta en cuatro sistemas los cuales son:

- Sistema de materias primas

Este sistema se divide en dos partes. La primera parte está relacionada todo con el manejo, almacenamiento y filtrado del aceite usado de fritura de soja. En esta etapa la alimentación del AUFS al tanque de almacenamiento se efectuará de forma manual, posteriormente después de su vertido es necesario hacerlo pasar a través de un filtro, que tiene como función la eliminación de material particulado que puede estar en flotación o sedimentado al interior del aceite, este paso del aceite se produce con la ayuda de una bomba, luego del filtro, el AUFS es adicionado al reactor.

La segunda etapa de este sistema es la preparación de la mezcla del alcohol y catalizador para cada una de las reacciones (Esterificación y transesterificación), que se plantearon para el biodiesel. La alimentación del alcohol al tanque mezclador se genera desde el tanque de depósito del etanol, la adición del catalizador se efectúa de forma manual al tanque que ya contendrá la proporción de alcohol necesaria para la reacción, este dispositivo debe poseer un sistema de agitación y temperatura. Posteriormente de obtener la mezcla homogénea de la carga (Alcohol-catalizador) agregada al mezclador se envía al reactor por medio de una bomba. El tanque del mezclador que se utilizará es de forma cilíndrica con una capacidad de 8 gl, este está fabricado en polietileno de alta densidad, material que permite una excelente resistencia a la corrosión.

- Sistema de reacción

Para este sistema es de mencionar que se poseen dos rutas químicas. La primera es esterificación catalítica en medio ácido con etanol y la segunda ruta es la transesterificación con catalizador básico con etanol. Las dos rutas se realizan a condiciones de presión atmosférica ($50 \text{ mmHg} \approx 74,6 \text{ KPa} \approx 10,8 \text{ Psi}$), y temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$. El reactor seleccionado es de tipo batch, debido al volumen de producción, además este tipo de reactores presentan una gran flexibilidad para el proceso y no requiere de un riguroso mantenimiento. El equipo es de forma cilíndrica tiene una capacidad máxima de 150 L, en su exterior se encuentra enchaquetado y se encuentra aislado para reducir las pérdidas de calor. El material de fabricación es de acero inoxidable de la serie 304, debido a que por contenido en cromo y níquel permite una alta resistencia a la oxidación [88]. El calentamiento del reactor se efectúa por un sistema de calefacción de agua que se adaptó al reactor por el cual circula agua a una temperatura de $63 \text{ }^\circ\text{C}$ con el fin de realizar la transferencia del calor a las sustancias que reaccionaran en el interior del reactor.

- Diseño del reactor

Las consideraciones para el diseño del reactor ver Tabla 4-13.

Tabla 4-13: Condiciones de diseño para el reactor

Consideración	Valor
Volumen	105 L \approx 0,105 m ³
Factor de seguridad	70%
Volumen del reactor	150 L \approx 0,150 m ³
Relación Altura (H) / Diámetro (D)	2

Fuente: Autor.

Uno de los primeros aspectos que se deben establecer en el diseño del reactor es el volumen del cilindro (V_C) que tendrá el reactor según la capacidad de producción establecida en el ítem 4.2 y que se menciona en la tabla 4-13. Con la ecuación 4-10 se desarrolla este aspecto.

$$V_C = \frac{\pi \times D^2 \times H}{4} \quad (4-10)$$

Estableciendo que la altura posee una relación de 2 veces el diámetro. Ver ecuación 4-11

$$H = 2 \times D \quad (4-11)$$

Reemplazando en la ecuación 4-10 se obtiene la ecuación 4-12:

$$V_C = \frac{\pi \times 2 \times D^3}{4} = \frac{1}{2} \pi \times D^3 \quad (4-12)$$

A partir de la ecuación 4-12 se calcula el diámetro del reactor.

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,150 \text{ L} \times 2}{\pi}} = 0,40 \text{ m}$$

Reemplazando en la ecuación 4-11 se determina la altura:

$$H = 2 \times 0,40 \text{ m} = 0,80 \text{ m}$$

No obstante es de aclarar que por disposiciones de espacio y facilidad en el proceso de producción seleccionado para el montaje de la planta de producción se define el $D = 0,70$ m y la altura del tanque de 0,54 m.

- Espesor de pared del reactor.

Para el caso del cálculo de los espesores de las paredes del reactor tipo Batch, se empleó la ecuación 4-12 [17]. Ecuación que es planteada en las normas para construcción de recipientes a presión de Sociedad Americana de ingenieros mecánicos.

$$t = \frac{P_D \times R}{(\sigma_{adm} \times E) - (0,6 \times P_D)} \quad (4-12)$$

Donde:

P_D : Presión del diseño

R: Radio interior del recipiente

σ_{adm} : Esfuerzo último a la tensión

E : Factor de eficiencia de la soldadura.

Para el desarrollo del cálculo del espesor de la pared del reactor se toma la siguiente información (Tabla 4-14):

Tabla 4-14: Datos para el cálculo del espesor de pared del reactor.

Característica	Valor
Material de fabricación	Acero inoxidable AISI: SAE 304
Esfuerzo último a la tensión	686 MPa \approx 99000 Psi
Límite de elasticidad (σ_{adm})	304 MPa \approx 44000 Psi
Espesor de corrosión (t_c)	1 mm
Criterio de error	≥ 5
Factor de eficiencia de la soldadura (E)	0,5

Fuente: [17] [88].

A partir de los datos de la tabla 4-14 se desarrolla el cálculo del espesor de material en el cual se fabricara el reactor.

$$t = \frac{10,82 \text{ Psi} \times 15,75 \text{ in}}{(44000 \times 0,5) - (0,6 \times 10,82 \text{ Psi})} = 0,007 \text{ in} \approx 0,19 \text{ mm}$$

$$t = 0,19 + 1 \text{ mm} = 1,19 \text{ mm}$$

Basado en esto se emplea una lámina acero inoxidable AISI-SAE 304 Calibre 18 [88].

- Sistema de Separación

El sistema de separación al igual que de reacción, posee dos etapas. Una etapa de la separación de la fase esterificada y etanol, la segunda etapa es la decantación del biodiesel y el glicerol, cada una de estas etapas tiene una duración de unas 5 h en el decantador, pero un aspecto de gran importancia es que el tiempo puede llegar a ser superior en algunos casos, debido a una diferencia muy pequeña en cada uno de los productos generados en cada ruta, las condiciones de la decantación no emplea ningún equipo para la generación de la separación de los productos, la temperatura es ambiente y la presión atmosférica. El decantador cilíndrico con una capacidad de 35 L, está fabricado en acrílico transparente, debido a las condiciones de realizar observaciones del proceso y a que el tipo de material presenta buenas condiciones de estabilidad química frente a las características de los reactivos, por último el sistema cuenta con cuatro tanques cada uno de 55 gl, fabricados en polietileno de alta densidad que tienen como función el almacenamiento del biodiesel y los otros productos obtenidos por el proceso.

- Sistema de recuperación de componentes

Este sistema cuenta con dos tanques fabricados en polietileno de alta densidad y cada uno con una capacidad de 8 gl, además se les adaptó un sistema de calentamiento y condensación, para lograr la reacción de algunos reactivos.

Los equipos adicionales con que cuenta la planta son bombas y el tipo de agitación que se empleara en la producción del biocombustible.

- Bombas

Filtración del Aceite: Es una etapa de suma importancia, para esta operación se utiliza una bomba de desplazamiento positivo de engranajes, debido a que este tipo de equipo puede manipular fluidos con viscosidades bajas y altas como es el caso del AUFS, así como también poseen una condiciones de una buena eficiencia en la operación con aceites. El material que se recomienda emplear es acero especial tratado térmicamente, sin embargo lo ideal sería emplear una bomba fabricada en acero inoxidable, no obstante estas últimas son muy costosas, por lo cual se empleara la primera bomba con acero especial.

Alimentación de mezcla de catalizador – alcohol: Para esto se emplea una bomba de desplazamiento positivo, fabricada también en acero especial con tratamiento térmico, que tenga una alta resistencia al contacto con fluidos de tipo corrosivo.

Alimentación de la chaqueta del reactor: Se utiliza una bomba centrífuga, debido a que estas bombas poseen un buen desahogo al paso del fluido, además de esta característica, este tipo de equipo es de bajo costo en comparación con las anteriormente enunciadas, tienen una alta versatilidad en su instalación, la confiabilidad en el impulso de un flujo uniforme y además en el empleo de fluidos no viscosos presentan excelentes rendimientos con respecto a otros tipos de bombas.

Carga y descarga del decantador: Se empleara una bomba de desplazamiento positivo, fabricada en acero especial que resista la corrosión por agentes químicos.

- Agitadores

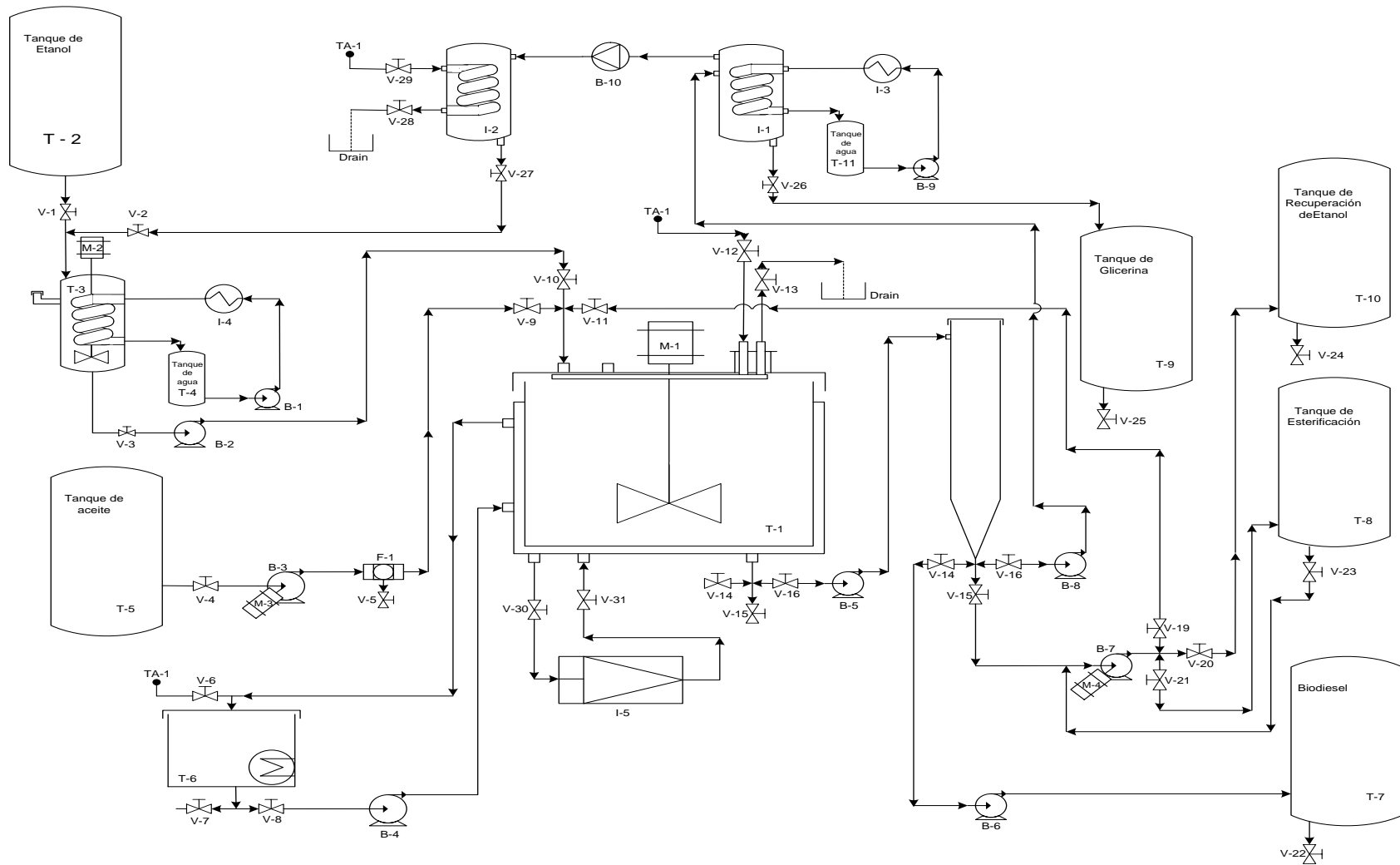
La agitación permite obtener movimientos entre líquidos y sólidos o líquidos con el fin de lograr un mezclado y una homogeneidad entre los elementos. Los agitadores son un árbol en el cual se monta uno o varios móviles, el movimiento de los agitadores es accionado por un dispositivo motriz. Los agitadores que se emplean en el reactor y en el tanque de mezclado del alcohol catalizador son de paleta. Como característica principal, se emplean en condiciones que tengan velocidades moderadas o bajas en el centro del tanque, la producción de las corrientes obtenidas en los líquidos es por lo general dirigida hacia las paredes del tanque permitiendo que el fluido ascienda o descienda y como un aspecto importante es que las paletas se pueden adaptar a las características del fondo del tanque es por estas razones que se seleccionó este tipo de agitadores en el reactor y el tanque mezclador de alcohol y catalizador.

4.7.1 Descripción del proceso de producción de biodiesel

Esta parte del proyecto se estableció en tres etapas:

La primera etapa es la organización de un diagrama de flujo del proceso (PFD), diseño del proceso que se estableció basado en los resultados del capítulo 3, ver figura 4-12, además como complemento a este diagrama se mencionan las especificaciones de cada uno de los componentes (Anexo F). A continuación se describe el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de fritura. La planta de producción de Biodiesel cuenta con un reactor multifuncional tipo Batch (T-1) con una capacidad de 150L/lote adecuado con una chaqueta exterior que se emplea como sistema de calentamiento (CA), este está compuesto por un tanque (T-6) de almacenamiento de agua y en el fondo tiene acoplado un grupo de resistencias eléctricas que se encuentran conectadas en tipo estrella con el fin de calentar el agua hasta unos 90°C, el agua contenida es enviada a la chaqueta del reactor por la bomba centrífuga (B-4) y retornada al tanque para calentamiento del fluido, este sistema tiene acoplado un sistema eléctrico de control tipo On-Off. El reactor tiene instalado un sistema de agitación de 90W compuesto por dos aspas acopladas a un eje y a un motor eléctrico de 0,5 HP, el diseño del reactor tiene en la tapa de sellado un sistema de refrigeración, que tiene como fin la condensación de los vapores generados en la etapa de reacción y así evitar pérdidas de reactivos. Para alimentar el reactor se emplean dos bombas centrífugas de 1 HP cada una (B-2, B-3). La (B-2) toma el aceite usado de cocina del tanque de almacenamiento de aceite (T-5) y lo bombea a través de un filtro -50 μ tamaño de poro-, seguidamente el aceite limpio pasa al reactor; el tanque de almacenamiento de aceite de cocina tiene acoplado unas resistencias eléctricas que precalientan el material en promedio a 30 °C, condición que favorece la alimentación de la sustancia al reactor debido a disminución de la viscosidad del fluido. El equipo cuenta con un sistema mezclador y calentador de alcohol/catalizador, del tanque (T-2) se proporciona la cantidad necesaria de alcohol al tanque (T-3) y del tanque de reciclado (I-2); la adición del catalizador se hace de forma manual al tanque. Este sistema cuenta con un medio de calefacción de 40 °C a 50 °C, el etóxido obtenido es enviado al reactor multifuncional por una bomba que está acoplada al tanque. Finalmente el producto obtenido (Fase esterificada o fase transesterificada) en el reactor (T-1) es llevado a la etapa de decantación y posteriormente al tanque de almacenamiento de producto (T-7).

Figura 4-12 Diagrama de flujo del proceso (PFD) de la planta piloto de 150 L/lote



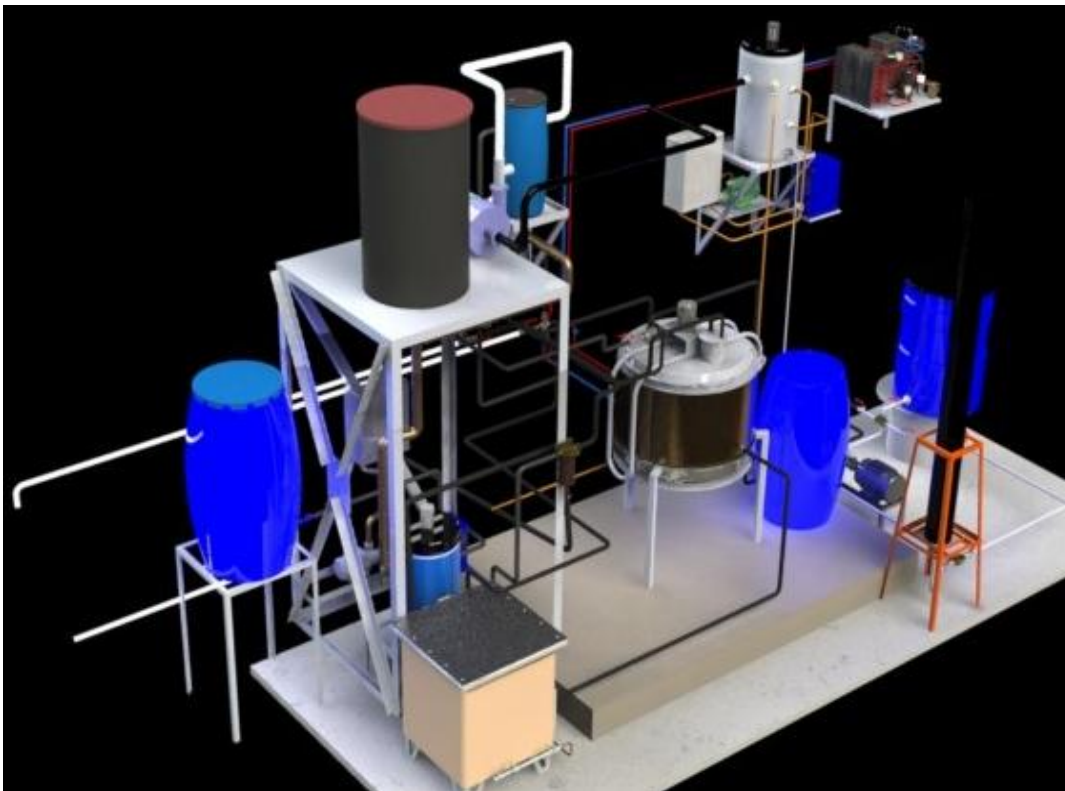
La segunda etapa fue definir las características de los equipos de la planta (Anexo F), con el fin de realizar un esquema del diseño de la planta, para dibujar la planta en el espacio asignado para el montaje. En la figura 4-13, se muestra una renderización efectuada en el software Solid Word, de la planta de biodiesel que se planea construir, al final del documento (Anexo G), se pueden observar una tabla donde se mencionan los planos que componen cada uno de los subsistema que se diseñaron en la planta, sin embargo en este anexo se imprimen los planos en explosivo, montaje y lista de materiales de cada uno los sistemas propuestos para el montaje de la planta los demás planos se encuentran en un CD anexo al documento. Es de mencionar que la planta se diseñó con siete subsistemas los cuales se pueden observar en la tabla 4-15.

Tabla 4-15: Subsistemas de la planta piloto de biodiesel

Subsistema	Nombre del subsistema de la planta
1	Sistema de calentamiento de agua (CA)
2	Sistema de reacción-Reactor tipo Batch
3	Sistema de alimentación del aceite usado (AU).
4	Sistema de recuperación de alcohol (RA)
5	Sistema de transesterificación y esterificación (S.T.E).
6	Sistema mezclador catalizador-alcohol (SC).
7	Sistema de refrigeración (SR).

Fuente: Autor.

Figura 4-13: Renderizado de la planta piloto de 150 L/Lote en 3D definida en el diseño del proceso



Fuente: Autor

La tercera etapa consistió en la construcción de la planta de biodiesel de 150 L/Lote en proceso discontinuo la cual consta de: tanque de almacenamiento de la materia prima, mezclador de alcohol/catalizador, reactor tipo batch que tiene acoplado un sistema de calefacción, decantador tanques de almacenamiento de producto terminado y subproducto. Debido al contenido de ácidos grasos libres determinado con el valor ácido es necesario realizar el proceso mediante dos etapas. Una primera de esterificación para reducir los ácidos grasos libres y la segunda de transesterificación para la producción de los etil ésteres, cadenas bases del biodiesel. En la figura 4-14 se observa la planta montada.

Figura 4-14: Montaje de planta de biodiesel de 150 L/Lote en el edificio de Química de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.



Fuente: Autor

4.8 Producción a escala semi-industrial

Se muestra el balance de masa (Tabla 4-16), que se empleará en la planta de biodiesel del laboratorio de biocombustibles para realizar la producción de biodiesel a partir de aceite de fritura y etanol con catalizador ácido en el proceso de esterificación y catalizador básico en el proceso de transesterificación. Además en el (Anexo H) se muestran los protocolos que se diseñaron para obtener la estandarización del proceso de producción del biocombustible.

Tabla 4-16: Balances de masa para la producción de biodiesel con aceite usado a nivel semi-industrial

Etapa de esterificación	Etapa de transesterificación
Relación molar Aceite:Alcohol:1:7	Relación molar Aceite:Alcohol:1:7
% en peso de Catalizador: 2,5%	% en peso de Catalizador: 2,5%
Aceite inicial: 35 L	Etanol: 17 L
Etanol: 17 L	NaOH: 0,524 kg
Ácido Sulfúrico: 0,4 L	Ácido acético 0,750 L

En la figura 4-15, se muestra una imagen del producto obtenido en la planta de producción de biodiesel.

Figura 4-15: Producto en proceso de decantación (Izq) y biodiesel obtenido en la planta (Der).



Fuente: Autor.

Como conclusión de esta etapa se pudo establecer que en cuatro pruebas que se efectuaron en la planta piloto de la producción de biodiesel a nivel semi-industrial se logró obtener una producción total de 168 L. Se obtuvo de cada una un promedio al final de la etapa de esterificación de 53,5 L/Lote con una pérdida del 1 % en el etanol recuperado, el rendimiento obtenido en el proceso es del 90% de la fase esterificada equivalente a 41,6 L/Lote, para la etapa de transesterificación, el promedio de producción por lote está en 56 L/lote con una pérdida del 3% por evaporación del etanol y transporte en las etapas del proceso, el rendimiento del biodiesel en la etapa de producción es del 89%, es decir, que se obtuvo un 52,7 L/Lote de biodiesel y producción en promedio de 1,8 L/Lote de glicerol. En la figura 4-16 se puede observar una gráfica de los rendimientos de cada uno de los procesos planteados para la elaboración del biodiesel y en la Tabla 4-17 se plantea un resumen del proceso de producción del biodiesel obtenido en la planta piloto.

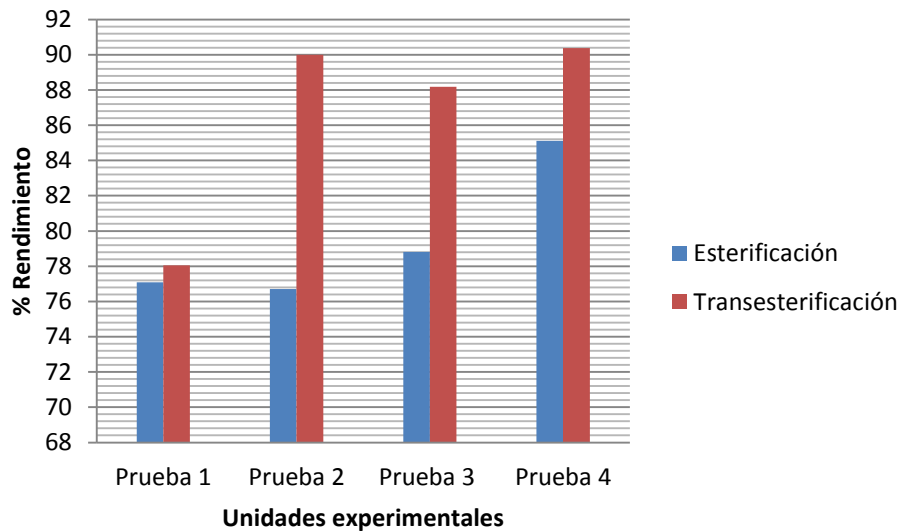
Tabla 4-17: Producción de biodiesel obtenido en planta piloto a partir del aceite usado de fritura y etanol

Producto	Prueba 1 Litros (L)	Prueba 2 (L)	Prueba 3 (L)	Prueba 4 (L)
Esterificación				
Fase esterificada	40,4	40,2	41,3	44,6
Etanol Recuperado	12,1	12,5	11,4	8,1

Producto	Prueba 1 Litros (L)	Prueba 2 (L)	Prueba 3 (L)	Prueba 4 (L)
Perdidas	0,33	0,25	0,2	0,2
Transesterificación				
Biodiesel	46,2	53,3	52,2	53,5
Glicerol	11,2	4,9	5,9	4,7
Perdidas	1,7	1,1	1,2	1,2

Fuente: Autor.

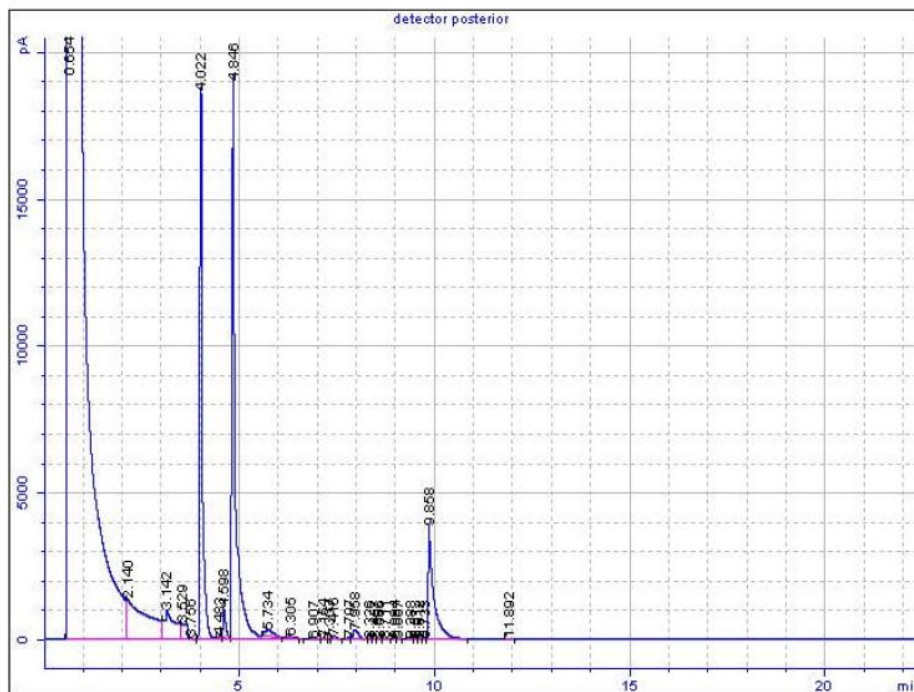
Figura 4-16: Diagrama del rendimiento de los procesos de producción de biodiesel a nivel semi-industrial.



Fuente: Autor.

Después de obtenidos los rendimientos se realizó una cromatografía de gases a una muestra de la prueba 4, la cual obtuvo el mayor rendimiento en la producción de biodiesel en la planta piloto para observar las características del biocombustible obtenido en el equipo para así poder compararlo con el producto con las mejores características obtenidas en el laboratorio y las normas en cuanto a los TG, DG y MG obtenidos dentro de la composición de biocombustible. En la figura 4-17, se puede observar el cromatograma obtenido en la prueba.

Figura 4-17: Cromatografía de gases del biodiesel obtenido de la prueba 4 en la planta piloto.



Fuente: Autor

Después se obtiene el cromatograma de la muestra se obtuvieron los resultados arrojados por el programa en la Tabla 4-18, que se muestra a continuación.

Tabla 4-18: Cromatograma de la muestra de biodiesel de la prueba 4 con las condiciones más óptimas obtenida en la planta piloto.

	Señal	Tiempo de retención (min)	Área (pA*s)	
Solvente	1	0,654	19507355,2	
Ésteres etílicos	1	2,14	48482,777	
	1	3,142	19409,6028	
	1	3,529	5433,10788	
	1	3,756	92,17372	
	1	4,022	86100,5223	
	Área total			159518,184
	1	4,483	137,86917	
	1	4,598	4509,0738	
	1	4,846	121718,772	
	1	5,734	3510,86861	
	1	6,305	507,242	
	1	6,907	65,83115	
	1	7,154	110,00425	
	Área total			130559,661

	Señal	Tiempo de retención (min)	Área (pA*s)
Monoglicéridos	1	7,303	34,78266
	1	7,416	646,2474
	1	7,797	139,86331
	1	7,958	2803,99755
	1	8,326	20,86481
	1	8,457	21,62439
	1	8,566	13,57315
	1	8,711	11,95615
	1	8,984	39,96618
	1	9,067	33,43932
	1	9,388	35,27812
	1	9,512	74,96195
	1	9,612	34,44236
	1	9,733	20,46325
		Área total	
Tricaprina	1	9,858	34368,6074
Diglicéridos	1	11,892	37,149

Fuente: Informe del programa Agilent Cerity QA/QC

Basado en estos resultados se procede a encontrar los pesos de cada una de las sustancias detectadas para así encontrar la composición del Biodiesel. A partir de la ecuación 3-16.

$$y = ax + b$$

Donde:

a y b: Constantes encontradas para cada uno de los estándares de ésteres etílicos o ésteres metílicos, monoglicéridos y triglicéridos, en la tabla 3-27 se puede observar los datos.

De esta forma podemos encontrar los pesos de cada sustancia detectada a partir de la ecuación 3-19, las unidades de estos pesos están en mg:

$$W = \frac{W_s}{a} * \left(\frac{A}{A_s} - b \right)$$

Un aspecto que se debe establecer antes es la $A_s = 34368,6074$ y $W_s = 6$ mg. Planteando la ecuación (3-19), se calcula el contenido de MG encontrados en la muestra de biodiesel a partir de aceites usados de fritura soya y etanol, los demás datos solo se mencionaran debido a que el proceso que se efectúa es el mismo para los demás pesos del contenido dentro de la muestra de biodiesel.

$$W = \frac{W_s}{a} * \left(\frac{A_{Total}}{A_s} - b \right)$$

$$W = \frac{6 \text{ mg}}{1,1374} * \left(\frac{3931,4606}{34368,6074} - (-0,0765) \right)$$

$$W = 1,006 \text{ mg}$$

Los pesos de todas las sustancias y el porcentaje en peso de la muestra de biodiesel obtenido en la planta piloto se pueden apreciar en la tabla 4-19:

Tabla 4-19: Composición del biodiesel obtenido del ensayo 4 en el proceso de producción de la planta piloto.

	W (mg)	%p/p
FAEE	20,44	93,52
Monoglicéridos	1,006	4,60
Diglicéridos	0,409	1,88
Triglicéridos	0	0
Total	21,85	100

Fuente: Autor.

La cromatografía de gases permitió verificar la presencia de los ésteres etílicos de ácidos grasos que son el principal componente del biodiesel siendo 93,52% para el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite usados de fritura de soja y etanol obtenido en la planta piloto, un aspecto importante que se puede observar en el cromatograma que no hay presencia de aceite (TG), en el producto final, significando que todos los triglicéridos se transformaron en FAEE's, monoglicéridos y diglicéridos. De acuerdo a la norma EN 14105 y ASTM D6584 el contenido máximo de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos presente en el Biodiesel debe ser 0,8%, 0,2%, 0,2% respectivamente. Los resultados de la tabla 4-16 establece que el contenido de monoglicéridos y los diglicéridos no cumple con lo exigido por los estándar, debido a que los datos de superar en más del 100% de los rangos permitidos. Para los TG establece que el contenido de ésteres debe ser superior al 96,6 %p/p, basado en esto condición, el contenido de TG no cumple con el estándar de comparación de la norma porque el contenido de TG del biodiesel obtenido en la planta piloto tiene una diferencia por debajo de 3,08% con respecto al dato del estándar. En cuanto a los MG existe una diferencia entre el contenido exigido y el obtenido de 3,8%, aspecto que se considera debido a que una proporción del catalizador está reaccionando en la formación de jabones, estableciendo que el proceso de esterificación debe contener un porcentaje de AGL, condición que debe ajustarse al enunciado en la literatura investigada. Otro aspecto que puede valorarse es que las pruebas cromatográficas se efectuaron al biodiesel sin postratamiento (Sin ningún lavado) condición que puede aumento los porcentajes de los componentes dentro del biodiesel conteniendo trazas de subproductos, pero un aspecto que se plateo con el estudio es considerar reducir el volumen de agua por el proceso de lavado, ya que es un aspecto ambiental de gran impacto para el proceso de producción del biodiesel; además uno de los objetivos principales de esta investigación era el obtener un biodiesel que se implementará en equipos industriales –calderas-. Equipos

que emplean actualmente diesel para su funcionamiento; por esto se deseó analizar el biodiesel sin un postratamiento y con los parámetros obtenidos en las pruebas identificando las diferencias existentes entre el biocombustible para motores y un biodiesel de menor calidad en algunos parámetros de la norma que brindara una alternativa a las industrias que requieren de grandes de cantidades del combustible fósil –Diesel-, para obtener la energía para sus equipos.

5. Evaluación económica.

Para evaluar económicamente el proyecto se emplea como base de cálculo la capacidad de producción de la planta piloto que se encuentra ubicada en el laboratorio de biocombustibles en el edificio de Química de la Universidad Nacional el cual se encuentra adscrito al grupo de investigación Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética. El estudio de viabilidad económico se lleva a cabo para una producción mensual de Biodiesel para caldera equivalente a 200 L/día y un tiempo de evaluación del proyecto igual a 20 años.

Para la evaluación de costos de producción y de métodos de cálculo para la estimación de la rentabilidad del proyecto se tienen en cuenta distintos parámetros definidos por Silla [10] y por Towler y Sinnott [11]. El precio del biodiesel se tomó de acuerdo a la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia[12].

El precio del aceite usado de cocina se calculó teniendo en cuenta que el transporte de una tonelada de dicho producto cuesta alrededor de \$150000, el precio del etanol se encuentra en ICIS[13]. Este se ajustó para el 2012 teniendo en cuenta el comportamiento de la inflación durante los años 2006 – 2014 reportados en indexmundi [14], lo cual dio un valor de USD\$ 2.88/gl. Los precios de los catalizadores se determinaron de acuerdo a lo reportado en ICIS [13], siguiendo la misma metodología que con el etanol. Los valores para el consumo de electricidad y agua se determinaron de acuerdo a su uso en los ensayos de laboratorio con un factor de corrección por escalamiento equivalente a 1,3.

El costo del mantenimiento se determinó de acuerdo a Silla [10] como 0,027 el capital fijo de inversión. El cálculo de la depreciación se realizó siguiendo un comportamiento lineal durante el tiempo de evaluación del proyecto con un factor de salvamento equivalente a 0,2; el seguro fue evaluado de acuerdo con Silla [10] como 0,02 veces el capital total de inversión.

Los gastos operacionales correspondientes a gastos administrativos, de investigación y desarrollo y de mercadeo se estimaron en función de los costos directos de producción con factores del 0,045; 0,0575 y 0,0135 respectivamente de acuerdo a Silla [10].

Para el análisis de la rentabilidad del proyecto se tienen en cuenta el periodo de repago estimado como el número de años que toma el proyecto para pagar la inversión inicial. Así mismo el valor presente neto calculado bajo una tasa de descuento equivalente al

15%, y la tasa interna de retorno (TIR) son evaluados. En la tabla 5-1 y 5-2 se pueden observar todas estas proyecciones del análisis económico.

Tabla 5-1: Evaluación del costo de producción de biodiesel a partir de aceites usados de fritura de soja

Rubro	Precio Unitario	Unidad	Cantidad	Unidad	Costo Total
Ingresos Netos					
Producción biodiesel	\$ 2446	\$/L	72.000	L/año	\$ 176.112.000

Rubro	Precio Unitario	Unidad	Cantidad	Unidad	Costo Total
Costos Directos					
Materias Primas					
Producción biodiesel	\$ 2446	\$/L	72.000	L/año	\$ 176.112.000
AUFS	\$ 138	\$/L	48.000	L/año	\$ 6.633.600
Etanol	\$ 1370	\$/L	36.000	L/año	\$ 49.305.600
Catalizadores	\$ 150	\$/L	1.620	L/año	\$ 243.000
Servicios					
Electricidad	\$ 342	\$/kWh	36000	kWh/año	\$ 12.304.800
Agua	\$ 2200	\$/m ³	960	m ³ /año	\$ 2.112.000
Mano de Obra					
Operario	\$ 1.200.000	\$/Operario	2		\$ 28.800.000
Supervisor	\$ 1.500.000	\$/Ingeniero	1		\$ 18.000.000
Mantenimiento	\$ 3.916.458	\$/año	1		\$ 3.916.458

Rubro	Precio Unitario	Unidad	Cantidad	Unidad	Costo Total
Costos indirectos					
Gastos Financieros					
Depreciación					\$ 5.600.000
Seguro					\$ 3.481.296
Impuestos renta					\$ 2.901.080
Gastos Operacionales					
Administrativos					\$ 5.998.403
Investigación y desarrollo					\$ 7.664.625
Mercadeo					\$ 1.799.521
Costo total de producción					\$ 14.8760.383

Rubro	Precio Unitario	Unidad	Cantidad	Unidad	Costo Total
Evaluación inversión inicial					
Rubro					Valor Total
Costo equipos					\$ 140.000.000
Terreno					\$ -
Adecuación terreno					\$ 2.100.000
Costo arranque planta					\$ 2,954,000.00
Capital fijo					\$ 145.054.000

Rubro	Precio Unitario	Unidad	Cantidad	Unidad	Costo Total
Evaluación inversión inicial					
Capital de trabajo					\$ 29.010.800
Costo total de inversión					\$ 174.064.800

Fuente: Autor.

Tabla 5-2: Evaluación económica del proyecto de producción de biodiesel a partir de aceite usado de fritura de soja.

Periodo	Flujo de Caja		
1	\$ -145.323.227	Ingresos anuales	\$ 176.112.000
2	\$ 28.741.573	Gastos anuales	\$ 147.370.427
3	\$ 28.741.573	Flujo de caja	\$ 28.741.573
4	\$ 28.741.573		
5	\$ 28.741.573	Inversión inicial	\$ 174.064.800
6	\$ 28.741.573		
7	\$ 28.741.573		
8	\$ 28.741.573	Análisis Económico	
9	\$ 28.741.573	TIR (10 años)	13,4%
10	\$ 28.741.573	TIR (15 años)	17,8%
11	\$ 28.741.573	TIR (20 años)	19,1%
12	\$ 28.741.573		
13	\$ 28.741.573	Periodo de repago	6,06
14	\$ 28.741.573		
15	\$ 28.741.573	VPN (10años)	-\$7.113.391,46
16	\$ 28.741.573	VPN (15años)	\$16.701.918,15
17	\$ 28.741.573	VPN (20años)	\$28.542.336,03
18	\$ 28.741.573		
19	\$ 28.741.573	Tasa de descuento	15%
20	\$ 28.741.573		

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El efecto que posee el etanol en la reacción de esterificación es poco importante teniendo en cuenta que el valor ácido del producto final se mantiene constante en un intervalo entre 4,3 y 4,8 mg KOH/mg aceite; así mismo adicionar una mayor cantidad de catalizador ácido promueve un mayor grado de conversión en la reacción aunque su efecto no es muy notorio y el tiempo de reacción es un factor importante para obtener un mayor grado de conversión de los ácidos grasos libres presentes en el aceite en cadenas de esteres.

En la neutralización del proceso es recomendable el empleo de ácido acético porque el uso de otro tipo de ácido como el ácido clorhídrico, tiende a constituir sales que se adhieren en las paredes de los recipientes, haciendo del proceso de lavado más dificultoso circunstancia que aumenta la cantidad de procesos de lavado generando un aumento en el consumo de agua aspecto que no beneficia el medio ambiente, además que se produciría unas soluciones que tendrían partículas o compuestos que aumentarían el costo del producto final por almacenaje y eliminación de estos subproductos obtenidos del proceso.

La pureza de las sustancias empleadas en el proceso es de vital importancia al momento de las pruebas de laboratorio como en la etapa de producción en planta piloto, porque la acidez y la presencia disminuyen la efectiva de la reacción de transesterificación reflejándose en el rendimiento y la calidad del biodiesel obtenido. Para el caso de estudio el contenido de agua de los aceites usados de fritura favorece la producción de la reacción de saponificación de los ácidos grasos libres presente, aspectos que hacen necesario emplear alcohol con un grado de pureza del 96%, ácido sulfúrico concentrado del 98%, ácido acético glacial y un hidróxido de sodio del 98% para obtener un biodiesel de calidad.

La transesterificación de aceites oleaginosos a partir de catalizadores homogéneos alcalinos es aún el proceso más empleado para la producción de biodiesel industrial. El desarrollo en la producción de etanol a partir de fuentes renovables ha permitido la implementación en la producción de FAEE's obteniendo un número de ventajas como combustible aspecto que ha orientado las investigaciones hacia la implementación y desarrollo de procesos etanólicos con materiales primas de menor calidad y un bajo costo son las razones para la mejora y desarrollo de nuevos procesos de producción.

Al comparar el valor ácido obtenido entre las pruebas efectuadas en la planta piloto; es posible identificar que existen muchos ácidos grasos libres en el producto final debido a la disociación de los triglicéridos durante las primeras etapas de la reacción, aspecto que permite establecer que el tiempo de la reacción de transesterificación apropiada es de 4 h para la etapa de transesterificación y 2 h en la etapa de esterificación ya que el rendimiento obtenido entre la prueba uno y la prueba cuatro aumento en un 11% permitiendo una alto nivel de conversión de los ácidos grasos libres en éster etílico de ácidos grasos (FAEE's).

Aunque la literatura establece que la etapa de lavado es importante, según prueba cromatográfica efectuada a una muestra del biodiesel obtenido en la planta piloto sin el proceso de lavado, estableció que el biodiesel tiene 93,52% de FAEE's, 4,60% MG y 1.88% de DG y sin trazas de otros compuestos. Datos que establecen un alto rendimiento sin una etapa de lavado permitiendo así disminuir la cantidad de agua empleada en la etapa y mismo el tiempo de cada lavado lo cual permite ser un combustible que se puede emplear en equipos industriales que requieren una menor calidad de su fuente de energía .

El proceso de producción se realiza en dos etapas porque el índice de acidez de 7,65 mg KOH/g aceite obtenido de las muestras de aceite usados de fritura para el estudio esta aproximadamente 4,5 veces por encima del valor aportado por la literatura (1,7 mg KOH/g). En la primera etapa es una esterificación con catálisis homogénea acida y segunda etapa con una transesterificación con catálisis homogénea básica, las variables del estudio son temperatura de reacción de 60 °C, tiempo de reacción de 2 y 4 h, relación molar de aceite:etanol de 1:7 –Esterificación-, y aceite:etanol de 1:7 –Transesterificación-, con estas condiciones se realizó una prueba de producción de biodiesel de 105 L/Lote en una planta de proceso discontinuo obteniendo un biodiesel que cumple con algunas de las características físicas y químicas según los parámetros de la norma ASTM D6751

El efecto de la temperatura de reacción en el proceso y especialmente en la composición del producto generado no tiene cambios notorios si se trabaja entre los rangos de temperatura de 50 y 60 °C, porque los valores de rendimiento de los FAEE para el caso de la temperatura de 50 °C se obtuvo un rendimiento del 85,47% y para la temperatura de 60°C rendimiento es de 88,47% en este último caso el contenido de monoglicéridos - 0,9%-, diglicéridos – 0,18% y triglicéridos - 0,56% - y el resultado del contenido total del glicerol es del 0,288%.

La estrategia de realizar en dos etapas el procesos de biodiesel a partir de aceites de frituras evidencia valores que según la norma ASTM D6751 se encuentran dentro de los parámetros establecidos como: La viscosidad (4,4 kg/m³), índice de acidez (0,39 mg KOH/g), monoglicéridos (0 %m/m) y diglicéridos (0 %m/m). Para el caso de la norma EU 14214 se tiene: La densidad 899 (kg/m³), viscosidad (4,4 mm²/s), índice de acidez (0,39 mg KOH/g), monoglicéridos (0 %m/m) y diglicéridos (0 %m/m), pero para el caso de las FAEE's no cumple ya que supera el rango de la norma que es del 96,6%.

El diseño del proceso que se plantea para el desarrollo del proyecto a nivel de planta piloto se estableció en dos etapas. La primera de esterificación y la segunda de transesterificación. Para la primera etapa se estableció un proceso que emplea 35 L de aceite usado de fritura de soja (AUFS) filtrado a 50 μ con catálisis homogénea utilizando 17,7 L etanol anhidro (C_2H_6O) con pureza del 99% y 0,4 L de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de 98% de pureza obteniendo, 52,47 L de fase esterificada, 15,31 L de etanol recuperado y 0,672 L de pérdida del alcohol (1%) en un tiempo de 2 h, temperatura de 60 °C y agitación de 200 RPM. La segunda etapa utiliza 52,47 L de fase esterificada con catálisis básica; usando una solución de etóxido de sodio de 17 L C_2H_6O con pureza de 99% y 0,524 gr NaOH bajo un tiempo de 4 h, temperatura de 60 °C y RPM 200; para la neutralización del proceso de esterificación se emplea 0,750 ml de ácido acético ($C_2H_4O_2$) con una agitación de 200 RPM y un tiempo de $\frac{1}{4}$ de h logrando 70,22 L de fase transesterificada, 16,15 L de glicerol recuperado y 2.10 L de pérdida del alcohol (3%) el rendimiento en esta etapa es del 90 % en la producción de biodiesel en la planta .

Se logra establecer que el biodiesel con mejor rendimiento (88,9%), obtenido en el laboratorio a partir de aceite usado de fritura de soja y etanol, se desarrolló a partir del proceso de producción que tiene la relación molar aceite:alcohol de 1:7, %p/p catalizador de 0,7, temperatura de 60 °C y agente de lavado agua a 40 °C, sin embargo según el estudio desarrollado para sus propiedades se observa que la muestra no cumple en: el parámetro de contenido de cenizas con una diferencia por el rango superior de 0,037%, el contenido de agua con una variación de 0,006% por encima del valor estándar.

La producción de biodiesel en la planta piloto de 150 L/lote utilizando aceite usado de fritura como materias prima y con alcohol etanol empleando uso de hidróxido de sodio como catalizador. Los resultados obtenidos muestran que el rendimiento de esteres etílicos según la prueba cromatografica a las muestras esta en 93,52 %p/p, y unos rendimientos en peso de biodiesel con respecto a la cantidad inicial de aceite del 90% permite que la construcción de la planta tiene un buen rango del rendimiento con respecto a los reportes de la literatura.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda un estudio comparativo del empleo de los reactivos con índices de menos nivel de pureza, en especial el etanol que permitirá establecer unas grandes diferencias con el empleo de materiales oleaginosos con calidades inferiores.

Realizar pruebas con el uso de un catalizador bifuncional para hacer la reacción de esterificación - transesterificación en una sola etapa, a partir del diseño de un catalizador que contenga monopartículas ocluidas que permitan una activación de algunas de las actividades del (esterificación o transesterificación) y la presencia de algunos defectos superficiales que podría activar el proceso restante del proceso.

Realizar algunas adecuaciones de hermeticidad en el reactor tipo batch para usar poder continuar con estudios en el caso del etanol que hace un combustible mucho más renovable por sus materias primas.

Realizar un estudio en una o dos de las localidades más grandes de Bogotá para identificar un estimado real de la cantidad total de producción de aceites usados, logrando plantear la idea de la recolección y reutilización de estos aceites en la generación de un combustible.

Realizar el montaje de un sistema de control a la planta piloto de biodiesel que permite realizar un proceso más automatizado y parametrizado.

Realizar un estudio en equipos industriales – calderas- a partir del biodiesel obtenido en este estudio y poder establecer las implicaciones de tipo mecánico, eficiencia y uso del biodiesel con unos rangos de calidad inferiores a los establecidos en los estándares.

A. Anexo. Resumen de cotización de reactivos para elaborar biodiesel

Cotización de los reactivos (Grado laboratorio)			
Reactivo	Cantidad	Empresa	
		QUIMICOS CAMPOTA	BYCSA
Etanol al 96% (C ₂ H ₆ O)	1 L	\$7500	\$8300
Metanol al 99% p/p (CH ₄ O)	1 L	\$14200	\$14500
Hidróxido de sodio al 98,4% p/p (NaOH)	1 kg	\$5720	\$1800
Hidróxido de potasio al 98% p/p (KOH)	1 kg	\$6700	\$6900
Ácido Sulfúrico al 98% p/p (H ₂ SO ₄)	1 L	\$7800	\$3000
Ácido clorhídrico al 36% p/p (HCL)	1 L	\$7800	\$2500
Ácido Acético glacial al 99% p/p (C ₂ H ₄ O ₂)	1 kg	\$4000	\$4175

Fuente: Cotizaciones realizadas en Octubre de 2013.

B. Anexo: Fichas de Seguridad

Ultima Revisión:
15/06/2010

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

HIDROXIDO DE SODIO

0
3 1
W



SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del Producto: HIDROXIDO DE SODIO

Sinónimos: Soda cáustica (~~anhídrica~~), Soda cáustica en escamas, Cáustico blanco, Lejía, Hidrato de sodio.

Fórmula: NaOH

Número Interno:

Número UN: 1823 Sólido

Clase UN: 8

Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad: Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2886355. Fax: (571) 2884367. Bogotá, D.C. - Colombia.

Teléfonos de emergencia:

SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

Usos: Neutralización de ácidos, refinación del petróleo, producción de papel, celulosa, textiles, plásticos, explosivos, removedor de pinturas, limpiador de metales, ~~electroplateado~~, limpiadores comerciales y domésticos, pelado de frutas y verduras en la industria de alimentos.

Nombre	COMPONENTES CAS	TWA	STEL	%
Hidróxido de sodio	1310-73-2	N.R. (ACGIH 2008)	Ceiling 2 mg/m ³ (ACGIH 2008)	99-100

SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

Apariencia: Sólido blanco en forma de escamas, sin olor. Peligro, Corrosivo. Higroscópico. Reacciona con agua ácidos y otros materiales. Puede ser fatal en caso de ingestión. Causa quemaduras a piel y ojos. Puede ocasionar irritación severa de tracto respiratorio y digestivo con posibles quemaduras. En casos crónicos puede producir cáncer en el esófago y dermatitis por contacto prolongado con la piel.

EFFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación: Irritante severo. Los efectos por la inhalación del polvo o neblina varían desde una irritación moderada hasta serios daños del tracto respiratorio superior, dependiendo de la severidad de la exposición. Los síntomas pueden ser estornudos, dolor de garganta o goteo de la nariz. Puede ocurrir neumonía severa.

Ingestión: Corrosivo. La ingestión puede causar quemaduras severas de la boca, garganta y estómago. Pueden ocurrir severas lesiones tisulares y muerte. Los síntomas pueden ser ~~sangrado~~, vómitos, diarrea, caída de la presión sanguínea. Los daños pueden aparecer algunos días después de la exposición.

Piel: Corrosivo. El contacto con la piel puede causar irritación o severas quemaduras y cicatrización en las exposiciones mayores.

Ojos: Produce irritación con dolor, enrojecimiento y lagrimeo constante. En casos severos quemaduras de la córnea e incluso ceguera.

Efectos crónicos: Contacto prolongado produce dermatitis, fisuras e inflamación de la piel. ~~Puede causar cáncer al esófago.~~

SECCIÓN 4: PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo. Buscar atención médica inmediatamente.

Ingestión: Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito. Buscar atención médica inmediatamente.

Piel: Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica

Ojos: Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. ~~Colocar una venda esterilizada. Buscar atención médica.~~

Nota para los médicos: Después de proporcionar los primeros auxilios, es indispensable la comunicación directa con un médico especialista en toxicología, que brinde información para el manejo médico de la persona afectada, con base en su estado, los síntomas existentes y las características de la sustancia química con la cual se tuvo contacto.

SECCIÓN 5: MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO

Punto de inflamación (°C): N.R.

Temperatura de autoignición (°C): N.R.

Límites de inflamabilidad (%V/V): N.R.

Peligros de incendio y/o explosión: No es combustible pero en contacto con agua puede generar suficiente calor para encender combustibles. El material caliente o fundido puede reaccionar violentamente con agua. El contacto con algunos metales genera hidrógeno el cual es inflamable y explosivo. Durante un incendio se forman gases tóxicos y corrosivos.

Medios de extinción: Elegir el medio adecuado de acuerdo al fuego alrededor. No usar medios de extinción halogenados ni chorro de agua a presión. Utilizar un agente adecuado al fuego circundante.

Productos de la combustión: Óxido de Sodio.

Precauciones para evitar incendio y/o explosión: Evitar el contacto con metales, combustibles y humedad. Mantener los contenedores cerrados. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de explosiones y resistentes a la corrosión.

Instrucciones para combatir el fuego: Evacuar o aislar el área de peligro. Eliminar todos los materiales combustibles de la zona. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Refrigerar los contenedores con agua en forma de rocío. Si los contenedores están cerrados, retirarlos del área de peligro.

SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. No permitir que caiga en fuentes de agua y alcantarillas. Los residuos deben recogerse con medios mecánicos no metálicos y colocados en contenedores apropiados para su posterior disposición. Los residuos derramados se pueden diluir con agua, neutralizar con ácidos diluidos como acético, clorhídrico o sulfúrico. El residuo cáustico neutralizado se absorbe con arcilla, vermiculita u otra sustancia inerte y se empaqueta en un recipiente apropiado para ser desechado.

SECCIÓN 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Manejo: Utilizar los elementos de protección personal así sea muy corta la exposición o la actividad que se va a realizar con la sustancia; mantener estrictas normas de higiene. No fumar ni beber en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar.

Almacenamiento: Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. En recipientes no metálicos, preferiblemente a nivel del piso. Señalizar adecuadamente. Rotular los recipientes adecuadamente. Proteger de la humedad.

SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL

Controles de ingeniería: Ventilación local para mantener la concentración por debajo de los límites de salud ocupacional. Debe disponerse de duchas y estaciones lavaojos.

EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL:

Protección de los ojos y rostro: Gafas de seguridad con protector lateral.

Protección de piel: Careta, guantes, overol de PVC y botas de caucho.

Protección respiratoria: Si se excede el límite de exposición, y no hay disponibilidad de controles de ingeniería, se puede usar un respirador para particulado que cubre media cara.

Protección en caso de emergencia: Equipo de respiración autocontenido (S.C.B.A.) y ropa de protección TOTAL resistente a la corrosión.

Nombre	CAS	TWA	ACGIH STEL	%
Hidróxido de sodio	1310-73-2	N.R. (ACGIH 2008)	Ceiling 2 mg/m ³ (ACGIH 2008)	99-100

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Apariencia, olor y estado físico: Sólido blanco en forma de escamas, sin olor.
Gravedad Específica (Agua=1): 2.13 / 25°C
Punto de Ebullición (°C): 1390
Punto de Fusión (°C): 318
Densidad relativa del vapor (Aire=1): N.R.
Presión de vapor (mm Hg): < a 18 a 20 °C
Viscosidad (cp): 4 a 350 °C.
pH: 14 (solución 5%)
Solubilidad: Soluble en agua, alcohol y glicerol.

SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad química: Estable bajo condiciones normales de almacenamiento y manipulación. Es sensible a la humedad (higroscópico) o exposición excesiva al aire (absorbe dióxido de carbono).
Condiciones a evitar: Calor, llamas, humedad, aire e incompatibles.
Incompatibilidad con otros materiales: El contacto con ácidos y compuestos halogenados orgánicos, especialmente **tridlorostileno**, puede causar reacciones violentas. El contacto con **nitrometano** u otros compuestos nitro similares produce sales sensibles al impacto. El contacto con metales tales como **aluminio**, magnesio, estaño o cinc puede liberar gas hidrógeno (inflamable). Reacciona **rapidamente** con varios azúcares para producir monóxido de carbono. Reacciona con materiales inflamables.
Productos de descomposición peligrosos: Cuando este material se calienta hasta la descomposición puede liberar óxido de sodio. La **descomposición**, por reacción con ciertos metales libera gas de hidrógeno inflamable y **explosivo**.
Polimerización peligrosa: No ocurrirá.

SECCIÓN 11: INFORMACION TOXICOLÓGICA

Quemaduras severas por ingestión y contacto. Puede provocar desprendimiento del epitelio conjuntival y corneal. **LDLo** oral conejo= 0.5 g/kg (en solución al 10%). Irritación de los ojos y la piel: el hidróxido de sodio ha sido extensivamente estudiado en animales porque este tiene la habilidad de causar severos daños a la piel y a los ojos. Los factores que determinan la extensión y reversibilidad de **el** daño incluye el estado físico, la concentración, la cantidad involucrada y la duración del contacto. Los efectos pueden variar de una irritación mediana a severa corrosión con destrucción del tejido, incluyendo la ceguera y la muerte. Toxicidad inhalación: Exposición de ratas a aerosoles formados a partir del hidróxido de sodio en solución (5 a 40%) resulta en irritación significativa del tracto respiratorio. Es considerado como **no carcinogénico** por ACGIH, NIOSH; NTP, OSHA e IARC. No existe información disponible relacionada con efectos de tipo **teratogénico**, **mutagénico**, o neurotóxico.

SECCIÓN 12: INFORMACION ECOLÓGICA

Peligroso para la vida acuática aún en bajas concentraciones. Mortal para peces a partir de 20 mg/L. Toxicidad peces: LC10 = 25 ppm/24H /Trucha de arroyo/Agua fresca. DBO= ninguno. No biodegradable.

SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES DE DISPOSICION

Debe tenerse presente la legislación ambiental local vigente relacionada con la disposición de residuos para su adecuada eliminación. Los residuos de este material pueden ser llevados a un relleno sanitario legalmente autorizado para residuos químicos, previa neutralización.

SECCIÓN 14: INFORMACION SOBRE TRANSPORTE

Número UN: 1823 Denominación: **HIDRÓXIDO SÓDICO SÓLIDO** Clase de riesgo: 8 Sustancia corrosiva Grupo de embalaje: II No transportar con sustancias explosivas, sustancias que en contacto con agua puedan desprender gases inflamables, sustancias comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos, sustancias incompatibles ni alimentos.

SECCIÓN 15: INFORMACION REGLAMENTARIA

1. Ley 55 de 1993 de la Presidencia de la Republica, por medio de la cual se aprueba el Convenio No 170 y la **recomendación** No 177 sobre la seguridad en la utilización de los productos químicos en el trabajo.
2. Decreto 1609 del 31 de julio de 2002. Ministerio de Transporte. Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.
3. Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

4. Resolución 1023 de 2005. Por la cual se adoptan las guías ambientales como instrumento de autogestión y autorregulación. En las cuales se incluye la siguiente guía:

Guías ambientales de almacenamiento y transporte por carreteras de sustancias químicas peligrosas y residuos peligrosos.

5. Ley 30 DE 1986. Por la cual se adopta el Estatuto Nacional de Estupefacientes y se dictan otras disposiciones. 6. Resolución 009 DE 1987. Por la cual se reglamenta en el Territorio Nacional la importación, fabricación, distribución, transporte y uso de Acetona, Cloroformo, Eter Etilico, Acido Clorhídrico y demás sustancias a que hace referencia el literal f) del Artículo 20 de la Ley 30 de 1986. 7. Resolución 009 de 2009. Por medio de la cual reglamenta las actividades y nuevas sustancias sometidas a control especial.

SECCIÓN 16: OTRAS INFORMACIONES

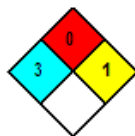
La información relacionada con este producto puede no ser válida si éste es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

Bibliografía

ChemDat. Merck KGaA. 2009 Base de datos MSDS Mallinckrodt Baker. JT Baker. Base de datos MSDS Carlo Erba. Base de datos MSDS Reagents. Base de datos MSDS Scharlab. S.L. Base de datos MSDS Fisher Scientific. Base de datos MSDS Acros Organics BVBA Transporte de mercancías peligrosas. Naciones Unidas. Versión 16. 2009. ACGIH 2008

**HOJA DE SEGURIDAD
(MSDS)
HIDROXIDO DE POTASIO (POTASA CAUSTICA)**

Rótulo NFPA



Rótulos UN



Fecha Revisión: 15/01/2001

TELEFONOS DE EMERGENCIA: Corquiven: +58 (241) 832.73.49 / 832.70.92 / 838.95.68

IDENTIFICACION

Sinónimos: Hidrato de potasio; Potasa cáustica; Lejía
Fórmula: KOH
Composición: 85 -100% de pureza.
Número Interno:
Número CAS: 1310-58-3
Número UN: 1813
Clases UN: 8 9.2
Usos: Elaboración de jabón; blanqueador; elaboración de ácido oxálico y sales potásicas; reactivo en química analítica; medicina (caústico); cerillas; grabados; en alimentos, en forma de álcali; electrólito en baterías alcalinas de almacenaje y algunas pilas de combustible; absorbente de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno; reactivo de laboratorio

EFECTOS PARA LA SALUD

Límites de exposición ocupacional:

TWA: N.R.

STEL: N.R.

TECHO (C): 2 mg/m³

IPVS: N.R.

Inhalación: El polvo o niebla, puede causar síntomas en el tracto respiratorio, posiblemente incluye tos, sofoco, dolor en la nariz, boca y garganta. Lesiones en el tabique nasal y quemaduras en las membranas mucosas. Si las cantidades inhaladas son grandes, se puede presentar edema pulmonar, a menudo con un período latente de 5 a 72 horas. Los síntomas pueden incluir tensión en el pecho, disnea, salivación espumosa, cianosis y desvanecimiento.

Ingestión: Quemaduras severas en los labios, lengua, boca, garganta, esófago y estómago, puede producir vómito con sangre y mucosa, severo dolor abdominal. La caída rápida de la presión sanguínea indica efecto gástrico y perforación del esófago. El daño del estómago y esófago puede avanzar por 2 o 3 semanas. La muerte puede ocurrir por peritonitis después de un mes de la ingestión. Cuando el paciente se recupera de los efectos inmediatos, contracción del esófago puede ocurrir semanas, meses o varios años después.

Piel: El contacto directo con solución al 4% puede causar sensación irritación severa en horas siguientes al contacto. La extensión del daño depende de la duración del contacto. Si no es removido de la piel puede causar ulceración. Se presentan dolor y quemaduras en general.

Ojos: El contacto directo con el sólido o soluciones pueden causar dolor, quemaduras posiblemente severas. El grado de daño depende de la concentración y duración del contacto, puede causar edema, destrucción y opacificación del epitelio corneal e iritis.

Efectos Crónicos: Inhalación: Dependiendo de la concentración y duración de la exposición, repetida o prolongada puede causar inflamación y cambios ulcerativos en la boca y posiblemente malestares gastrointestinales y bronquiales, daño pulmonar. Piel: Contacto repetido o prolongado puede causar dermatitis. Ojos: Contacto repetido o prolongado en bajos niveles puede causar conjuntivitis. Ingestión: N.R.

PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial (En lo posible evitar el método boca a boca). Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo. Buscar atención médica inmediatamente.

Ingestión: Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito, si éste se presenta inclinar la víctima hacia adelante. Si está inconsciente no dar a beber nada. Buscar atención médica inmediatamente

Piel: Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica inmediatamente.

Ojos: Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.

RIESGOS DE INCENDIO Y/O EXPLOSION

Punto de inflamación (°C): N.R.

Temperatura de autoignición (°C): N.R.

Limites de inflamabilidad (%V/V): N.R.

Peligros de incendio y/o explosión:

Los materiales corrosivos en contacto con metales y agua pueden generar hidrógeno el cual es inflamable. Puede resultar incendio por el calor liberado cuando entra en contacto con materiales combustibles. El material es higroscópico, absorbe agua y dióxido de carbono de la atmósfera.

Productos de la combustión:

Óxido de potasio, hidrógeno.

Precauciones para evitar incendio y/o explosión:

Evitar que los contenedores se calienten, proteger contra la humedad y ventilar el área. Evitar el contacto con materiales incompatibles. Mantener alejado de productos combustibles. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de corrosión.

Procedimientos en caso de incendio y/o explosión:

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Estar a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Retirar los contenedores expuestos al fuego si es posible.

Agentes extintores del fuego:

Polvo químico seco, dióxido de carbono, halón, agua en forma de niebla o espuma. Elegir el agente adecuado según el tipo de fuego de los alrededores.

ALMACENAMIENTO Y MANIPULACION

Almacenamiento: Lugares ventilados, frescos, secos y señalizados. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. Rotular los recipientes adecuadamente y mantenerlos bien cerrados. Inspeccione periódicamente las áreas de almacenamiento para detectar daños y fugas en los contenedores. Almacenar los contenedores por debajo del nivel de los ojos en caso de ser posible. Restringir el acceso a personas no autorizadas. Envasar en botellas, cajas, barriles, toneles y vagones cisterna.

Tipo de recipiente:

Manipulación: Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. No permita que el material alcance temperaturas superiores a los 360°C. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente. No usar agua en el área de trabajo.

PROCEDIMIENTOS EN CASO DE ESCAPE Y/O DERRAME

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida

EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL/CONTROL EXPOSICION

Uso Normal: Gafas de seguridad para químicos a prueba de polvo o salpicaduras, o protector facial de 20 cm como mínimo. Guantes, overol, delantal o protector de calzado según la operación que se esté realizando. Materiales resistentes: Buenos: Caucho de butilo, caucho natural, neopreno, PVC, nitrilo, neopreno/estireno/butadieno caucho (SBR), SBR. Regulares/malos: Vitón, poliuretano.

Control de Emergencias:

Equipo de respiración autónomo (SCBA) y ropa de protección TOTAL.

Controles de Ingeniería:

Ventilación local y general, para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional. Considerar la posibilidad de encerrar el proceso. Garantizar el control de las condiciones del proceso. Disponer de duchas y estaciones lavajos.

PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Apariencia:	Sólido en fragmentos, terrones, barras, lentejas o escamas con fractura cristalina o rombohedral, sin olor, de color blanco - amarillo claro, deliquescente.
Gravedad Específica (Agua=1):	2.044
Punto de Ebullición (°C):	1370
Punto de Fusión (°C):	360
Densidad Relativa del Vapor (Aire=1):	N.A.
Presión de Vapor (mm Hg):	1 mm Hg / 719°C
Viscosidad (cp):	N.R.
pH:	13.5 (Solución 0.1 M).
Solubilidad:	Apreciable en agua (>10%). Soluble en alcohol y glicerina, insoluble en amonio y éter

ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad: Estable bajo condiciones normales.

Incompatibilidades o materiales a evitar:

Agua: Sí **Aire:** No **Otras:** La reacción con agua puede generar suficiente calor para encender materiales combustibles. Con ácidos fuertes: puede ocurrir reacción violenta con liberación de calor y presión que podrá explotar el contenedor. Con metales: su reacción puede producir hidrógeno que es inflamable. Con materiales combustibles, materiales orgánicos, zinc, aluminio, estaño, dióxido de carbono; componentes ~~organohalogenados~~: puede reaccionar para formar espontáneamente componentes combustibles. Con anhídrido ~~maléico~~ y componentes orgánicos nitro y cloro puede reaccionar explosivamente.

INFORMACION TOXICOLOGICA

DL50 (oral, rata) = 273 mg/kg; DL50 (oral, rata macho) = 365 mg/kg; severa irritación en piel de humano = 50 mg/24 horas; DL50 (piel, conejo) = 5 mg/24 horas. No hay información disponible sobre ~~cancerogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad~~ y efectos reproductivos.

INFORMACION ECOLOGICA

~~con~~ concentraciones altas.

CONSIDERACIONES DE ELIMINACION Y/O DISPOSICION

Disponga de acuerdo con las regulaciones ambientales locales. Puede considerarse su neutralización, dilución y vertimiento al desagüe. Tenga en cuenta las leyes vigentes.

CONSIDERACIONES DE ELIMINACION Y/O DISPOSICION

Disponga de acuerdo con las regulaciones ambientales locales. Puede considerarse su neutralización, dilución y vertimiento al desagüe. Tenga en cuenta las leyes vigentes.

INFORMACION DE TRANSPORTE

Etiqueta blanco y negro con el número 8 y la leyenda "Corrosivo". No transporte con sustancias explosivas, sólidos que liberan gases inflamables en contacto con el agua, comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos, ni alimentos. Etiqueta blanca y negra con el número 9 y la leyenda: Sustancia peligrosa para el medio ambiente.


INFORMACION DE REGULACION

1. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Decreto 1344/70, modificado por la Ley 33/86. Artículo 48: Transportar carga sin las medidas de protección, higiene y seguridad. ~~Artículo 49: Transportar~~

OTRA INFORMACION

La información relacionada con este producto puede no ser válida si es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y la aplicación de esta información para su uso particular.

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

ETANOL (ANHIDRO)		ICSC: 0044
		Octubre 2000
Alcohol etílico		
CAS:	64-17-5	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ / $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$
RTECS:	KQ6300000	Masa molecular: 46.1
NU:	1170	
CE Índice Anexo I:	603-002-00-5	
CE / EINECS:	200-578-6	

TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SINTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes fuertes.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono,
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.

EXPOSICIÓN			
Inhalación	Tos. Dolor de cabeza. Fatiga. Somnolencia.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo.
Piel	Piel seca.	Guantes de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar con agua y jabón.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor. Quemazón.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Sensación de quemazón. Dolor de cabeza. Confusión. Vértigo. Pérdida del conocimiento.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. Proporcionar asistencia médica.

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Eliminar el residuo con agua abundante.	Clasificación UE Símbolo: F R: 11 S: (2-)7-16 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1170. Código NFPA: H 0; F 3; R 0;	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes.
 <p>Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2005</p>	

DATOS IMPORTANTES	
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO: Líquido incoloro, de olor característico.</p> <p>PELIGROS FÍSICOS: El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS: Reacciona lentamente con hipoclorito cálcico, óxido de plata y amoníaco originando peligro de incendio y explosión. Reacciona violentamente con oxidantes fuertes tales como ácido nítrico, nitrato de plata, nitrato de mercurio o perclorato magnésico, originando peligro de incendio y explosión.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN: TLV: 1000 ppm (como TWA), A4 (no clasificable como cancerígeno humano) (ACGIH 2004). MAK: 500 ppm; 960 mg/m³; Categoría de limitación de pico: II(2). Cancerígeno: categoría 5, Mutágeno: categoría 5, Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2004).</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN: Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante lentamente una concentración nociva en el aire.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: La sustancia irrita los ojos. La inhalación de altas concentraciones del vapor puede originar irritación de los ojos y del tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA: El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar al tracto respiratorio superior y al sistema nervioso central, dando lugar a irritación, dolor de cabeza, fatiga y falta de concentración. Ver Notas.</p>
PROPIEDADES FÍSICAS	
<p>Punto de ebullición: 79°C Punto de fusión: -117°C Densidad relativa (agua = 1): 0,8 Solubilidad en agua: miscible Presión de vapor, kPa a 20°C: 5,8 Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1,6</p>	<p>Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,03 Punto de inflamación: 13°C c.c. Temperatura de autoignición: 363°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 3.3-19 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.32</p>
DATOS AMBIENTALES	

NOTAS	
El consumo de etanol durante el embarazo puede afectar al feto. La ingesta crónica de etanol puede causar cirrosis hepática. El punto de inflamación de la disolución acuosa al 50% es 24°C. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en abril de 2005: ver Límites de exposición.	
INFORMACIÓN ADICIONAL	
Límites de exposición profesional (INSHT 2013): VLA-EC: 1000 ppm; 1910 mg/m ³ Notas: Esta sustancia tiene prohibida total o parcialmente su comercialización y uso como fitosanitario y/o biocida.	
Nota legal	Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.
© IPCS, CE 2005	

C. Anexo: Formulas del desarrollo del diseño de experimento.

Suma de cuadrados para un factor.

$$SSA = \frac{(\text{contrate } A)^2}{2^k n}$$

$$SSB = \frac{(\text{contrate } B)^2}{2^k n}$$

$$SSC = \frac{(\text{contrate } C)^2}{2^k n}$$

$$SSD = \frac{(\text{contrate } D)^2}{2^k n}$$

Suma de cuadrados para dos factores.

$$SSAB = \frac{(\text{contrate } AB)^2}{2^k n}$$

$$SSAC = \frac{(\text{contrate } AC)^2}{2^k n}$$

$$SSAD = \frac{(\text{contrate } AD)^2}{2^k n}$$

$$SSBC = \frac{(\text{contrate } BC)^2}{2^k n}$$

$$SSBD = \frac{(\text{contrate } BD)^2}{2^k n}$$

$$SSCD = \frac{(\text{contrate } CD)^2}{2^k n}$$

Suma de cuadrados para tres factores.

$$SSABC = \frac{(\text{contrate } ABC)^2}{2^k n}$$

$$SSACD = \frac{(\text{contrate } ABD)^2}{2^k n}$$

$$SSAD = \frac{(\text{contrate } ACD)^2}{2^k n}$$

$$SSBCD = \frac{(\text{contrate } BCD)^2}{2^k n}$$

Suma de cuadrados para cuatro factores.

$$SSABCD = \frac{(\text{contrate } ABCD)^2}{2^k n}$$

D. Anexo: Tabla de análisis de varianza (ANOVA) para un diseño factorial 2^4

Fuente de Variación	Efecto	Suma de cuadros	Grados de libertad	Cuadrado medio	F-Calculado
Efecto Principal					
A	$\frac{\text{Contrate A}}{16}$	SSA	A-1	s_1^2	$F_{11} = \frac{S_1^2}{s^2}$
B	$\frac{\text{Contrate B}}{16}$	SSB	B-1	s_2^2	$F_{12} = \frac{S_2^2}{s^2}$
C	$\frac{\text{Contrate C}}{16}$	SSC	C-1	s_3^2	$F_{13} = \frac{S_3^2}{s^2}$
D	$\frac{\text{Contrate D}}{16}$	SSD	D-1	s_4^2	$F_{14} = \frac{S_4^2}{s^2}$
Interacción de dos factores					
AB	$\frac{\text{Contrate AB}}{16}$	SSAB	(A-1) (B-1)	s_5^2	$F_{15} = \frac{S_5^2}{s^2}$
AC	$\frac{\text{Contrate AC}}{16}$	SSAC	(A-1) (C-1)	s_6^2	$F_{16} = \frac{S_6^2}{s^2}$
AD	$\frac{\text{Contrate AD}}{16}$	SSAD	(A-1) (D-1)	s_7^2	$F_{17} = \frac{S_7^2}{s^2}$
BC	$\frac{\text{Contrate BC}}{16}$	SSBC	(B-1) (C-1)	s_8^2	$F_{18} = \frac{S_8^2}{s^2}$
BD	$\frac{\text{Contrate BD}}{16}$	SSBD	(B-1) (D-1)	s_9^2	$F_{19} = \frac{S_9^2}{s^2}$
CD	$\frac{\text{Contrate CD}}{16}$	SSCD	(C-1) (D-1)	s_{10}^2	$F_{10} = \frac{S_{10}^2}{s^2}$
Interacción de tres factores					
ABC	$\frac{\text{Contrate ABC}}{16}$	SSABC	(A-1) (B-1) (C-1)	s_{11}^2	$F_{11} = \frac{S_{11}^2}{s^2}$
ABD	$\frac{\text{Contrate ABD}}{16}$	SSABD	(A-1) (B-1) (D-1)	s_{12}^2	$F_{12} = \frac{S_{12}^2}{s^2}$
ACD	$\frac{\text{Contrate ACD}}{16}$	SSACD	(A-1) (C-1) (D-1)	s_{13}^2	$F_{13} = \frac{S_{13}^2}{s^2}$
BCD	$\frac{\text{Contrate BCD}}{16}$	SSBCD	(B-1) (C-1) (D-1)	s_{14}^2	$F_{14} = \frac{S_{14}^2}{s^2}$
Interacción de cuatro factores					
ABCD	$\frac{\text{Contrate ABCD}}{16}$	SSABCD	(A-1) (B-1) (C-1) (D-1)	s_{15}^2	$F_{15} = \frac{S_{15}^2}{s^2}$
ERROR		SSE	ABC(N-1)		
TOTAL		SST	ABCN-1		

E. Anexo: Planteamiento de hipótesis

Cuando es un solo factor α , β , γ , δ , representan el efecto de los niveles:

- A. $H_0 ; \alpha_1 = \alpha_2 = 0$
- B. $H_0 ; \beta_1 = \beta_2 = 0$
- C. $H_0 ; \gamma_1 = \gamma_2 = 0$
- D. $H_0 ; \delta_1 = \delta_2 = 0$

Cuando son dos factores α , β , γ , δ , representan el efecto de la interacción entre los niveles:

- AB. $H_0 ; (\alpha\beta)_{11} = (\alpha\beta)_{12} = (\alpha\beta)_{21} = (\alpha\beta)_{22} = 0$
- AC. $H_0 ; (\alpha\gamma)_{11} = (\alpha\gamma)_{12} = (\alpha\gamma)_{21} = (\alpha\gamma)_{22} = 0$
- AD. $H_0 ; (\alpha\delta)_{11} = (\alpha\delta)_{12} = (\alpha\delta)_{21} = (\alpha\delta)_{22} = 0$
- BC. $H_0 ; (\beta\gamma)_{11} = (\beta\gamma)_{12} = (\beta\gamma)_{21} = (\beta\gamma)_{22} = 0$
- BD. $H_0 ; (\beta\delta)_{11} = (\beta\delta)_{12} = (\beta\delta)_{21} = (\beta\delta)_{22} = 0$
- CD. $H_0 ; (\gamma\delta)_{11} = (\gamma\delta)_{12} = (\gamma\delta)_{21} = (\gamma\delta)_{22} = 0$

Cuando son tres factores α , β , γ , δ , representan el efecto de la interacción entre los niveles:

- ABC. $H_0 ; (\alpha\beta\gamma)_{111} = (\alpha\beta\gamma)_{211} = (\alpha\beta\gamma)_{121} = (\alpha\beta\gamma)_{112} = (\alpha\beta\gamma)_{221} = (\alpha\beta\gamma)_{212} = (\alpha\beta\gamma)_{122} = (\alpha\beta\gamma)_{222} = 0$
- ABD. $H_0 ; (\alpha\beta\delta)_{111} = (\alpha\beta\delta)_{211} = (\alpha\beta\delta)_{121} = (\alpha\beta\delta)_{112} = (\alpha\beta\delta)_{221} = (\alpha\beta\delta)_{212} = (\alpha\beta\delta)_{122} = (\alpha\beta\delta)_{222} = 0$
- ACD. $H_0 ; (\alpha\gamma\delta)_{111} = (\alpha\gamma\delta)_{211} = (\alpha\gamma\delta)_{121} = (\alpha\gamma\delta)_{112} = (\alpha\gamma\delta)_{221} = (\alpha\gamma\delta)_{212} = (\alpha\gamma\delta)_{122} = (\alpha\gamma\delta)_{222} = 0$
- BCD. $H_0 ; (\beta\gamma\delta)_{111} = (\beta\gamma\delta)_{211} = (\beta\gamma\delta)_{121} = (\beta\gamma\delta)_{112} = (\beta\gamma\delta)_{221} = (\beta\gamma\delta)_{212} = (\beta\gamma\delta)_{122} = (\beta\gamma\delta)_{222} = 0$

Cuando son cuatros factores α , β , γ , δ , representan el efecto de la interacción entre los niveles:

ABCD

$$H_0 ; (\alpha\beta\gamma\delta)_{1111} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{1112} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{1122} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{1222} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{2211} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{2221} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{2121} \\ = (\alpha\beta\gamma\delta)_{1212} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{2112} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{2111} = (\alpha\beta\gamma\delta)_{2222} = 0$$

F. Anexo: Listado de materiales de la planta de biodiesel de 150L/Lote.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERIA MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICA GRUPO DE INVESTIGACION EN MDL&GE Y APRENA PROYECTO: DISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITES DE FRITURA ANEXO: TABLA DE CONVENCIONES DE TEXTO**				
ITEM	DESCRIPCIÓN	CAPACIDAD	MATERIAL	OBSERVACIONES
T-1	Reactor multifuncional tipo Batch	150 L	Acero Inoxidable	Tanque principal MU
T-2	Tanque almacenamiento de etanol	55 gl	Plástico	Tanque elevado
T-3	Tanque de mezcla de catalizador	15 gl	Plástico	Agitado y calentado
T-4	Tanque de agua	5 L	Plástico	Depósito de agua
T-5	Tanque almacenamiento de aceite	55 gl	Plástico	Homogenización de aceite

T-6	Tanque calentamiento de agua - reactor	30 gl	Fundición Gris-Recubrimiento interior	Almacenamiento y calentamiento de agua, resistencias eléctricas para calentamiento
T-7	Tanque de almacenamiento de producto (Biodiesel)	55 gl	Plástico	Tapada y válvula inferior
T-8	Tanque de almacenamiento de producto (Fase de esterificación)	55 gl	Plástico	Tapada y válvula inferior
T-9	Tanque de almacenamiento de producto (Glicerina)	55 gl	Plástico	Tapada y válvula inferior
T-10	Tanque de almacenamiento de producto (Recuperación de Etanol)	45 gl	Plástico	Caneca Azul
D-1	Decantador	35L	Plástico	Transparente
I-1	Evaporador de metanol	5 gl	Plástico	Serpentín interno
I-2	Condensador de metanol	2,5 gl	Plástico	Serpentín interno
I-3	Calentador para I-1	4 L/min	Cobre- Plástico	Calentador eléctrico de agua
I-4	Calentador para T-3	4 L/min	Cobre- Plástico	Calentador eléctrico de agua
B-1	Bomba de centrifuga periférica	40 L/min	Acero - fundición	Circulación de agua calentamiento de mezcla
B-2	Bomba de engranajes	35 L/min	Acero Inoxidable	En el LIQ - Transporte mezcla catalizador - etanol
B-3	Bomba de centrifuga periférica	40 L/min	Acero - fundición	Transparente de aceite usado
B-4	Bomba de centrifuga periférica	40 L/min	Acero - fundición	Transporte de agua caliente 70°C - reactor
B-5	Bomba de centrifuga periférica	40 L/min	Acero - fundición	Transporte de productos - decantador
B-6	Bomba de centrifuga periférica	40 L/min	Acero - fundición	Transporte de productos - Biodiesel
B-7	Bomba de engranajes	35 L/min	Acero Inoxidable	En el LIQ - Transporte productos

B-8	Bomba de engranajes	35 L/min	Acero Inoxidable	En el LIQ - Transporte productos Glicerina a I-1
B-9	Bomba de centrifuga periférica	40 L/min	Acero - fundición	Circulación de agua calentamiento de mezcla
B-10	Bomba de vacío	0,4 bar - 40 m ³ /h	Acero Inoxidable	Extracción de etanol evaporado en I-1
F-1	Filtro de aceite	2L -	Acero - fundición	Filtro de 5 micras
M-1	Motor agitador T-1	1 HP		Ubicado en la tapa del reactor
M-2	Motor agitador T-3	1/2 HP		Sistema de agitación etanol-catalizador
M-3	Motor para B-2	2 HP		Impulso de mezcla etanol-catalizador
M-4	Motor para B-7	1 HP		Impulso de productos
P-1	Paleta agitación T-1		Acero Inoxidable	Agitación de productos reactor
P-2	Paleta agitación T-3		Acero Inoxidable	Agitación de catalizador - etanol
V-1	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-2	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-3	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-4	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-5	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-6	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-7	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-8	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-17	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-18	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-19	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-20	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-21	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta

V-22	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-9	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-10	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-11	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-12	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-13	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-14	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-15	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-16	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-23	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-24	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-25	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-26	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-27	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-28	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-29	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-30	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-31	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
V-32	Válvula	3/8	Acero carbono	Bola de media vuelta
**: Documento anexo a plano de distribución de la planta, tubería-accesorios, reactor y tanques				

G. Anexo: Planos de la planta de biodiesel

Este anexo se compone de la lista de los planos de cada uno de los subsistemas que componen la planta piloto de biodiesel de 150L/Lote, seguidamente se encuentran impresos solamente la lista de material, el plano en explosivo y el plano de montaje de cada una de las secciones que componen el diseño de la planta. En la tabla siguiente se puede observar los nombres de cada uno de los planos que hacen parte de cada subsistema.

Subsistema	Nombre del subsistema de la planta	Planos del subsistema
1	Sistema de calentamiento de agua (CA)	<ol style="list-style-type: none">1. Lista de materiales2. Plano de Empaque3. Plano de Base de tanque4. Plano de Recubrimiento de resistencia5. Plano de Tanque6. Plano de Tapa del tanque7. Plano de Explosivo del sistema de calentamiento de agua8. Plano de Ensambla del sistema de calentamiento de agua
2	Sistema de reacción-Reactor tipo Batch (RB)	<ol style="list-style-type: none">1. Lista de materiales2. Plano de ensamble del reactor tipo batch3. Plano explosivo del reactor tipo batch4. Plano de la Marmita (reactor batch)5. Plano del Soporte de reactor6. Plano del Deflector7. Plano del Tubo de montaje del condensador8. Plano de la Tapa del montaje del condensador



Subsistema	Nombre del subsistema de la planta	Planos del subsistema
		9. Plano del Soporte de la tapa del reactor 10. Plano del Agitador 11. Plano del Soporte del motor 12. Plano de la Tapa del reactor 13. Plano del Pasador tapa manija 14. Plano del Pasador 15. Plano de la Caja 16. Plano de la Caja eléctrica 17. Plano del Soporte de tapa
3	Sistema de alimentación del aceite usado (AU).	1. Lista de materiales 2. Plano Tanque de almacenamiento de aceite 3. Plano Soporte de bomba de aceite 4. Plano Soporte tanque de aceite 5. Plano de ensamble del sistema de alimentación de aceite de fritura de soja 6. Plano explosivo del sistema de alimentación de alimentación del aceite de fritura de soja
4	Sistema de recuperación de alcohol (RA)	1. Lista de materiales 2. Plano explosivo del sistema de recuperación de alcohol 3. Plano de montaje del sistema de recuperación de alcohol 4. Plano de contenedor de glicerina 5. Plano tapa contenedor de glicerina 6. Plano Condensador evaporador 7. Plano evaporador 8. Plano soporte condensador – evaporador etanol 9. Plano soporte evaporador etanol 10. Plano tapa contenedor condensador evaporador etanol 11. Plano tapa evaporador etanol 12. Plano soporte tanque de condensador etanol base 13. Plano soporte evaporador etanol
5	Sistema de transesterificación y	1. Plano del decantador

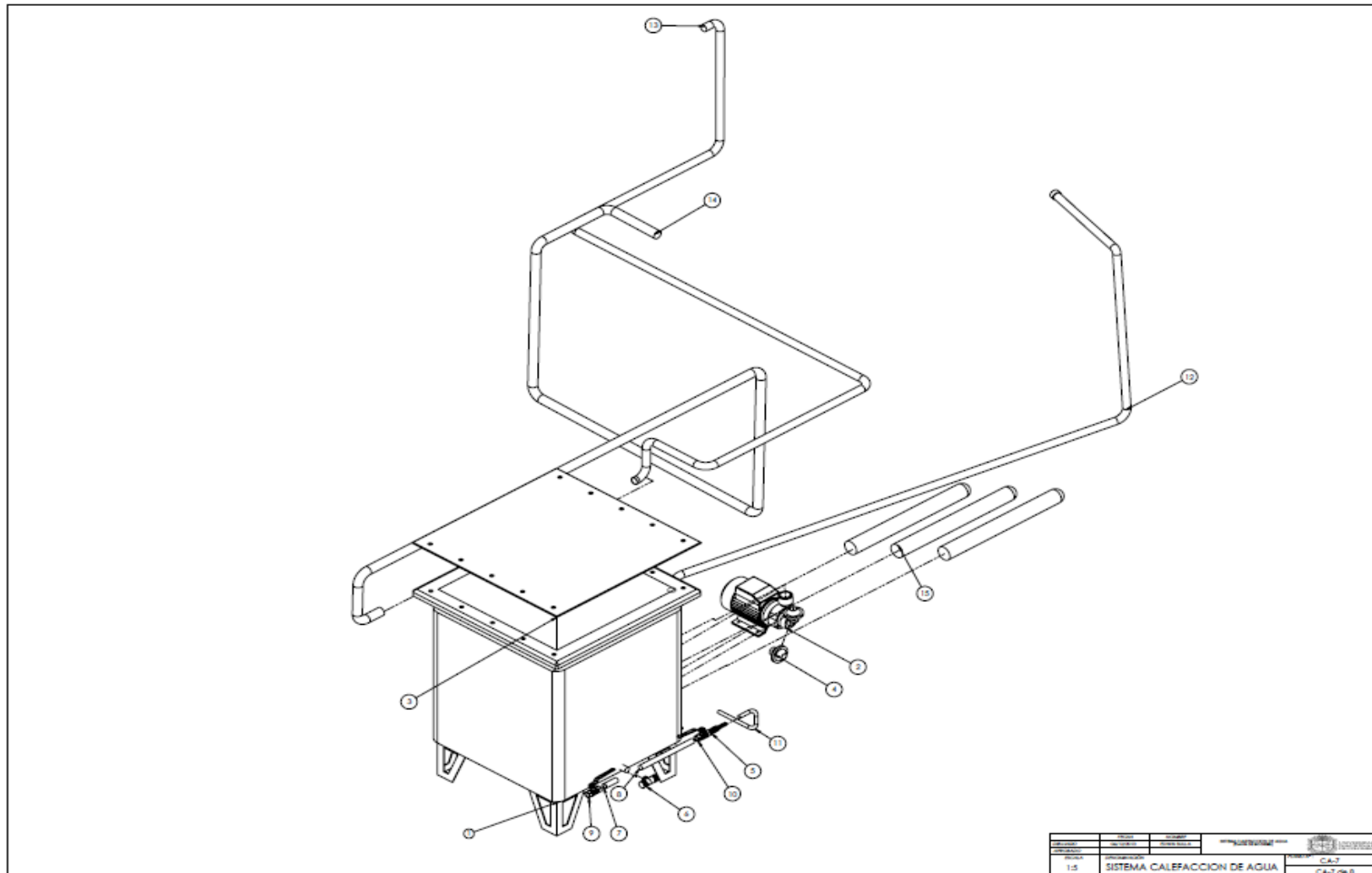
Subsistema	Nombre del subsistema de la planta	Planos del subsistema
	esterificación (S.T.E).	2. Plano base de decantador 3. Plano base de bomba 4. Plano montaje del sistema de transesterificación y esterificación 5. Plano explosivo del sistema de transesterificación y esterificación 6. Plano base de caneca 7. Plano del depósito de biodiesel
6	Sistema mezclador catalizador-alcohol (SC).	1. Lista de materiales 2. Plano ensamble del sistema mezclador del catalizador-alcohol 3. Plano explosivo del sistema mezclador del catalizador-alcohol 4. Plano soporte sistema catalizador 5. Plano soporte mezcla catalizador 6. Plano soporte bomba calentador 7. Plano tanque mezcla catalizador 8. Plano tanque almacenamiento 9. Plano tanque de agua
7	Sistema de refrigeración (SR).	1. Lista de materiales 2. Plano ensamble del sistema de refrigeración 3. Plano explosivo del sistema de refrigeración 4. Plano de soporte del sistema de refrigeración 5. Plano de soporte del sistema en 3D

Sin embargo como se mencionó antes algunos de los planos se imprimen, pero los otros planos que se mencionan en esta tabla se encuentran en un CD anexo al documento para su consulta.

Sistema de calentamiento de agua (CA).


N°	Elemento	Material	Cantidad
1	Tanque de 133750 m ³	Lamina C. 20	1
2	Bomba 1 HP, 750WVT, Q=4,8m ³ /h	Acero 1320	1
3	Tapa tanque	Lamina C. 20	1
4	Reducción de 3/4 a 1/2	Acero 1080	2
5	Vanamatic-4000 Series	Acero 4340	3
6	Tes (divisor de fluidos en 3 direcciones)	Acero 4620	2
7	Tubo Tes-Valvula	Acero 4620	2
8	Tubo Tes-Valvula (Largo)	Acero 4620	1
9	Tubo tanque	Acero 4340	1
10	Valvula de bola de 1/2"	aleacion de cobre	3
11	Tuberia	Acero 4340	1
12	Manguera Ø 3/8 * 1,93m	Goma	1
13	Manguera Ø 3/8 * 3,3m	Goma	1
14	Manguera Ø 3/8 * 4,2m	Goma	1
15	Empaque	Nitrilo	1
16	Recubrimiento Resistencia	Lamina C. 20	1

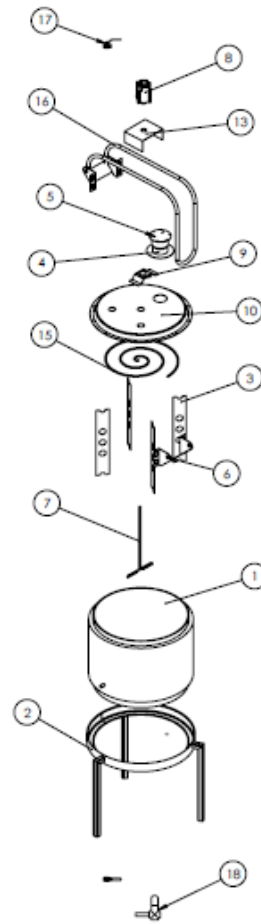
FECHA	NOMBRE	 SISTEMA CALIFICACION DE AGUA (PLATA DE BONO DEBAG)	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DIBUJADO APROBADO	06/12/2013 EDWIN BULLA		
ESCALA	DENOMINACIÓN		PLANO N°
	LISTA DE MATERIALES		CA-1
			CA-1 de 8




Sistema de reacción reactor Batch (RB).

# DE PIEZA	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	MARMITA	A CERO INOXIDABLE	1
2	SOPORTE CANECO	ACERO ESTRUCTURAL	1
3	INTERIOR CANECO	ACCERO INOXIDABLE	4
4	JARRÓN	ACERO INOXIDABLE	1
5	TAPA JARRON	ACERO INOXIDABLE	1
6	SEGURO	ACERO INOXIDABLE	2
7	AGITADOR	ACERO INOXIDABLE	1
8	MOTOR ELECTRICO	CAP 1HP	1
9	SOPORTE MOTOR	ACERO INOXIDABLE	1
10	TAPA REACTOR	ACERO INOXIDABLE	1
11	TAPA MANOJ	ACEROINOXIDABLE	1
12	PASADOR	ACEROINOXIDABLE	1
13	CAJA	ACERO INOXIDABLE	1
14	CAJA ELECTRICA	ACERO INOXIDABLE	1
15	ESPIRAL	ACERO INOXIDABLE	1
16	SOPORTE TAPA	ACERO INOXIDABLE	1
17	VALVULA BOLA 3/8"	ALEACIÓN DE COBRE	4
18	CRUZ DE CONEXIÓN	ACERO INOXIDABLE	1

	FECHA	NOMBRE	REACTOR BATCH planta biodiesel	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DIBUJADO	19/11/2013	EDWIN BULLA		
APROBADO				
ESCALA 1:1	Denominación: LISTA DE MATERIALES			Plano N° RB-1 PLANO RB-1 DE 17



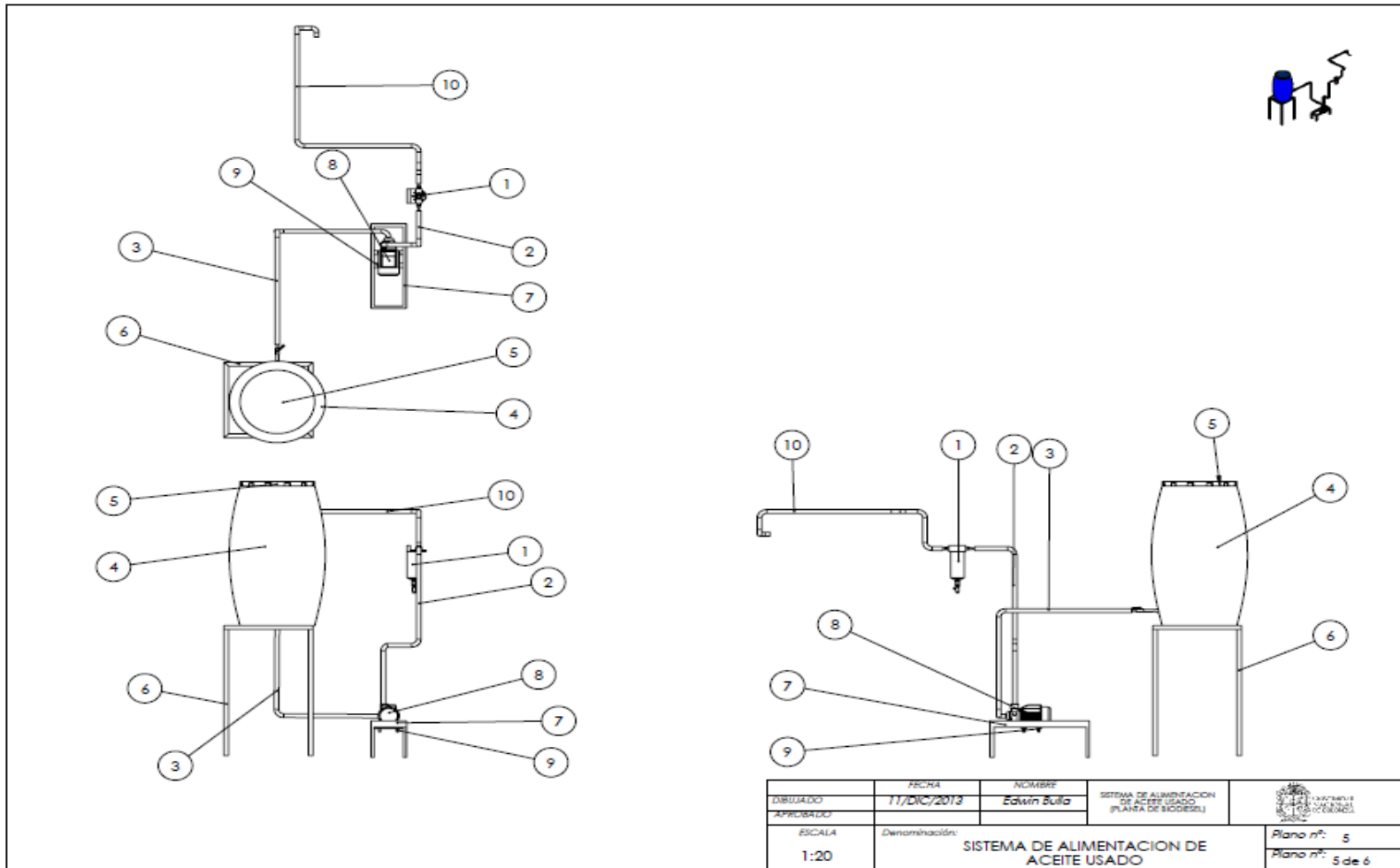
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	marmita	acero inoxidable	1
2	soporte caneco	acero estructural	1
3	interior caneco	acero inoxidable	4
4	aron	acero inoxidable	1
5	tapa (aron)	acero inoxidable	1
6	seguro	acero inoxidable	1
7	agitador	acero inoxidable	1
8	motor	acero inoxidable	1
9	soporte motor	acero inoxidable	1
10	tapa reactor	acero inoxidable	1
11	tapa manoj	acero inoxidable	1
12	parador	acero inoxidable	1
13	caja	acero inoxidable	1
14	caja electrica	acero inoxidable	1
15	espiral	acero inoxidable	1
16	soporte tapa	acero inoxidable	1
17	valvula bola 3/8"	aleación de cobre	4
18	cruz de conexión	acero inoxidable	1

DISEÑO	2011/02/10	NOMBRE	REACTOR BATCH	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
APROBADO		SOPORTE	PLANTA MECANICA	
ESCALA	DENOMINACIÓN: REACTOR TIPO BATCH (RB)			PLANO: RB-0
				PLANO RB-016-17

Sistema de alimentación del aceite usado de fritura de soja (AUFS)

LISTA DE MATERIALES				
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	REFERENCIA	MATERIAL	CANTIDAD
10	Manguera	Manguera de alta presión y temperatura de 3/8" x 1500mm	Caucho Nitrilo	1
9	Tornillo	Tornillo cabeza hexagonal con tuerca y arandela 1/4"-UNC	Acero	4
8	Bomba	Bomba centrífuga 1HP, 750 Wts, Q4.8m ³ /h	Acero 1320	1
7	Soporte Bomba de Aceite	Ángulos en L	Acero Estructural	1
6	Soporte Tanque Aceite	Ángulos en L	Acero Estructural	1
5	Tapa tanque	Tapa garrafa industrial	Polipropileno, diámetro 420mm	1
4	Tanque almacenamiento de aceite	Garrafa industrial grande boca ancha	Polipropileno, capacidad 210Lts (55 Galones)	1
3	Manguera	Manguera de alta presión y temperatura de 3/8" x 1850mm	Caucho Nitrilo	1
2	Manguera	Manguera de alta presión y temperatura de 3/8" x 1500mm	Caucho Nitrilo	1
1	Filtro	Filtro de cartucho para la separación de diésel/agua	Capacidad de filtración: 5 µm. Presión de trabajo: máx. 5 bar	1

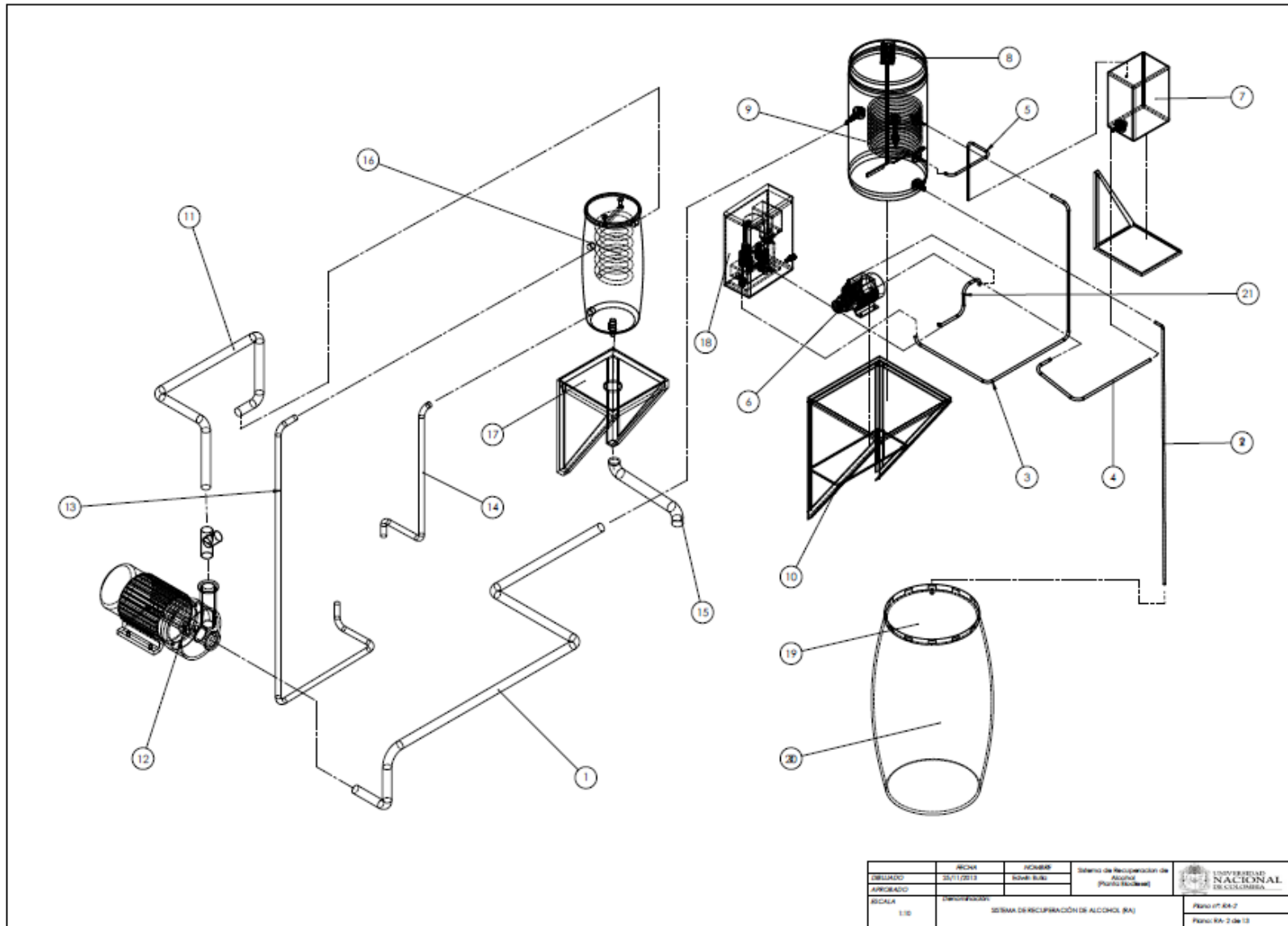
	FECHA	NOMBRE	SISTEMA DE ALIMENTACION DE ACEITE USADO (PLANTA DE BIODIESEL)	
DISEÑADO	11/DIC/2013	Edwin Bulla		
APROBADO				
ESCALA	Denominación:			Plano n.º 1
	LISTA DE MATERIALES			Plano n.º 1 de 6



Sistema de recuperación de alcohol (RA).

21	Manguera alta presión y temperatura (Ø 23/64" X 0.5 m)	Cobre	1	
20	Contenedor de glicerina	Plastico regular	1	
19	Tapa contenedor de glicerina	Plastico regular	1	
18	Calentador	Referencia: JSD 11 Deluxe /Idegas - 5.5 L/m	1	Se compra
17	Soporte condensador	Acero inoxidable	1	
16	Condensador de metanol	Plastico regular	1	
15	Manguera alta presión y temperatura (Ø 2" X 0.5 m)	Cobre	1	
14	Manguera alta presión y temperatura (Ø 1" X 1m)	Poliétileno	1	
13	Manguera alta presión y temperatura (Ø 1" X 3 m)	Poliétileno	1	
12	Filtro extractor	Referencia: EXI 50 20" al fundido / RPM: 1730 Peso:24Kg	1	Se compra
11	Manguera alta presión y temperatura (Ø 1 1/2" X 2 m)	Poliétileno	1	
10	Soporte evaporador de etanol	Acero inoxidable	1	
9	Evaporador de etanol	Plastico regular	1	
8	Tapa evaporador de etanol	Plastico regular	1	
7	Deposito de agua	Plastico	1	
6	Bomba	Referencia: Pompe Travaini TRHA 150 / Rango de Presión: 25 a 150 TORR - Capacidad: 3.500 m3/hr	1	Se compra
5	Manguera alta presión y temperatura (Ø 23/64" X 1 m)	Cobre	1	
4	Manguera alta presión y temperatura (Ø 7/16" X 1 m)	Cobre	1	
3	Manguera alta presión y temperatura (Ø 23/64" X 1.5 m)	Cobre	1	
2	Manguera alta presión y temperatura (Ø 7/16" X 2 m)	Poliétileno	1	
1	Manguera alta presión y temperatura (Ø 1 1/2" X 3 m)	Poliétileno	1	
Número	Nombre	Material	Cantidad	Observaciones


DEPARTAMENTO	INICIA	TERMINA	Sistema de Recuperación de Alcohol (Punto de Venta)	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLIMA
FECHA	FECHA	FECHA		
SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ALCOHOL			Plan 07 - 04-2	Plan 043 de 13

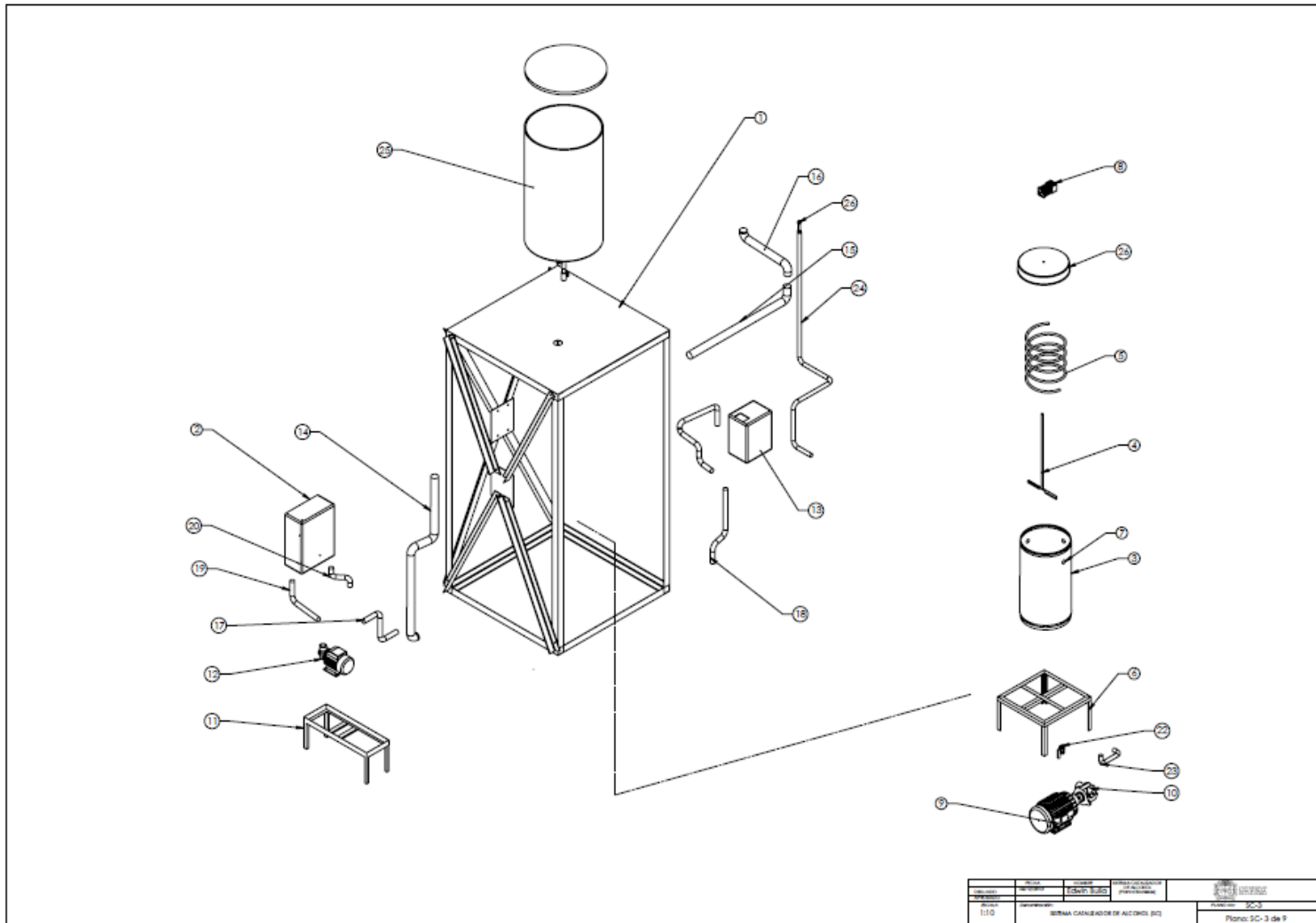


Sistema de transesterificación y esterificación (STE)

Sistema mezclador catalizador-alcohol (SC).


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	Descripción	Cantidad
1	SopORTE sistema catalizador de alcohol	Acero Estructural	1
2	Calentador 40 litros	4L/min cobre-plastico	1
3	Tanque de mezcla catalizador 15 Gl T-3	plastico	1
4	Agitador	Acero Inoxidable	1
5	Serpentin	Acero Inoxidable	1
6	SopORTE mezcla catalizador	Acero Estructural	1
7	Reductor 3/4" a 3/8"	Plastico	4
8	Motor Electrico de 1/2 HP 1200 RPM	Fundicion	1
9	Motor Electrico 1 HP 750 Wts	Fundicion	1
10	Bomba Desplazamiento Positivo de 40 L/Min	Fundicion	1
11	SopORTE bomba calentador	Acero Estructural	1
12	Bomba de 40 L/Min	Acero inoxidable	1
13	Tanque de agua Cap. 26 Gl	Plastico	1
14	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X49"	Nitrilo	1
15	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X33"	Nitrilo	1
16	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X14"	Nitrilo	1
17	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X15"	Nitrilo	1
18	Manguera de alta presion y temperatura Ø3/8"X22"	Nitrilo	1
19	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X15"	Nitrilo	1
20	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X3"	Nitrilo	1
21	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X24"	Nitrilo	1
22	Valvula de Bola de 3/8"	Fundicion de Cobre	2
23	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X5"	Nitrilo	1
24	Manguera de alta presion y temperatura Ø 3/8"X72"	Nitrilo	1
25	Tanque almacenamiento metanol Cap. 55Gl	Plastico	f
26	Tapa tanque mezcla	Plastico	1

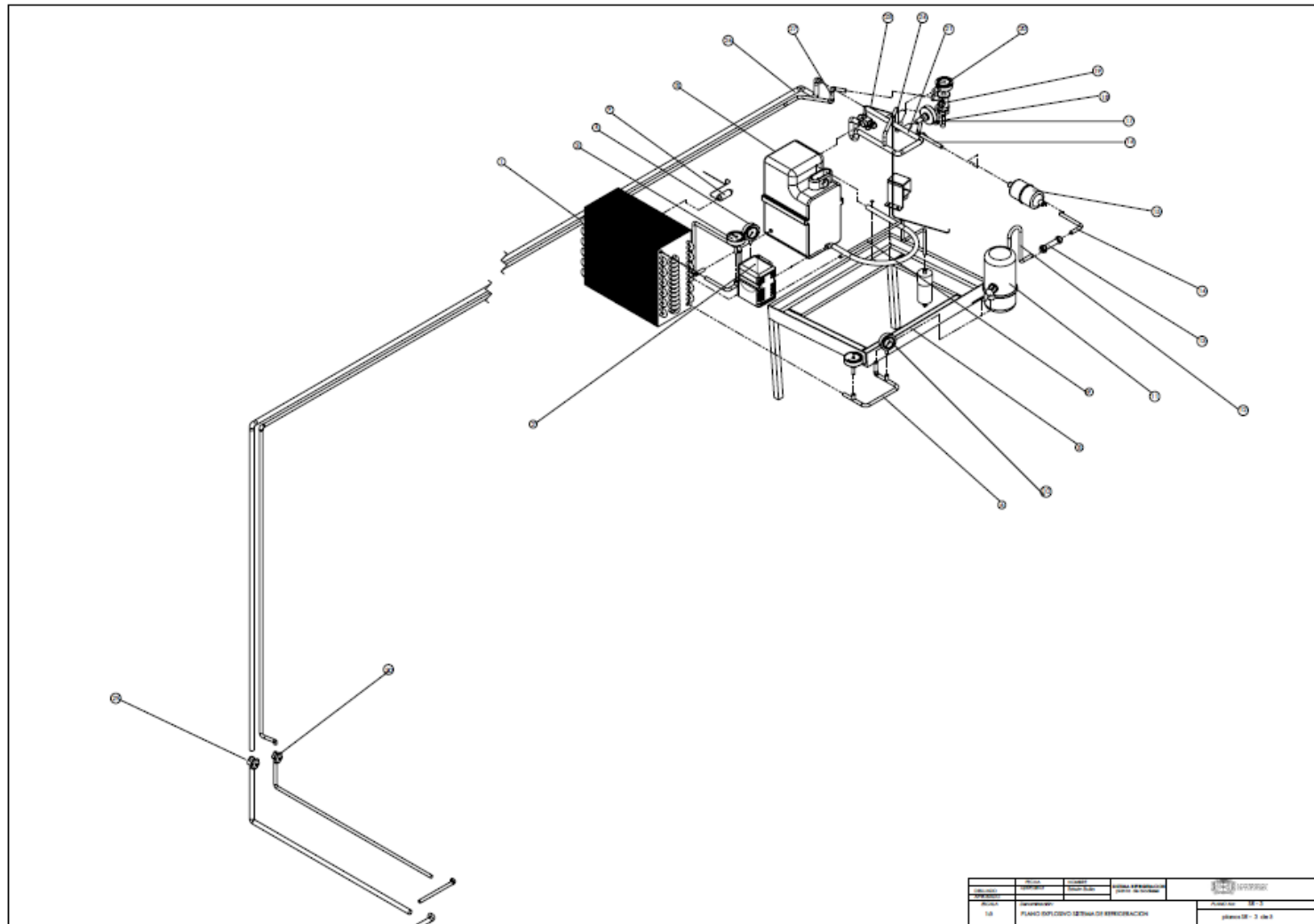
FECHA	06/12/2013	NOMBRE	Edwin Bulla	SISTEMA CATALIZADOR DE ALCOHOL (Planta Biodiesel)	 UNIVERSIDAD NACIONAL
APROBADO					PLANO No: SC-1
ESCALA	1:1	Denominación: LISTA DE MATERIALES SISTEMA CATALIZADOR DE ALCOHOL			Plano: SC-1 de 9



Sistema de refrigeración (SR)

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	Intercambiador	Acero al cromo	1
2	Manguera alta presión y temperatura 1	alambre de acero	1
3	Manómetro	Manómetro de acero inoxidable tipo vertical diámetro visor 60 mm rosca neumática 1/4"	2
4	Termómetro 1	Bronce latón	2
5	Manguera alta presión y temperatura 2	alambre de acero	1
6	Manguera alta presión y temperatura 3	alambre de acero	1
7	Fijador		1
8	Manguera negra alta presión y temperatura	alambre de acero	1
9	cable negro		1
10	Cilindro 4	acero cromo	1
11	Cilindro	acero cromo	1
12	Manguera alta presión y temperatura 6	alambre de acero	1
13	Válvula		1
14	Manguera 3		1
15	Cilindro 2	acero cromo	1
16	Manguera		1
17	Termómetro 2	Bronce latón	1
18	Manguera 11		1
19	Válvula de Conexión		1
20	Manómetro 2	Manómetro de acero inoxidable tipo vertical diámetro visor 60 mm rosca neumática 1/4"	1
21	Manguera Azul 2		1
22	Caja de resortes		1
23	Alambre		1
24	Manguera Azul 3		1
25	Válvula azul		1
26	Manguera de conexión	Acero inoxidable	1
27	Manguera de conexión azul	Acero inoxidable	1
28	Manguera larga		1
29	válvula 1	Acero	1
30	válvula 2	Acero	1
31	Manguera de conexión	Acero inoxidable	1
32	Manguera de conexión azul		1
33	Manguera final roja		1
34	Manguera final azul		1

FECHA	INGENIERO	SISTEMA REFRIGERACION	
ELABORADO	Edwin Bulco	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS	
APROBADO		UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS	
ESCALA	DENOMINACIÓN:		PLANO N.º: SE - 1
	LISTA DE MATERIALES SISTEMA DE REFRIGERACION		planos SE - 1 de 5



H. Anexo: Protocolos para la producción en la planta piloto.

Antes de comenzar a trabajar recuerde emplear elementos de protección personal con la mascararas para trabajo con H_2SO_4 , guante, bata y gafas.							
PROTOCOLO SOLUCIÓN DE ETANOL (C_2H_6O) - ACIDO SULFÚRICO CONCENTRADO (H_2SO_4)							
ITEM	ACTIVIDAD	HORA INICIAL	HORA FINAL	ELEMENTOS	PARAMETRO REAL MEDIDO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
a	Medir 9,7 L de etanol C_2H_6O			Galón plástico de 20 L	$V_1 C_2H_6O$ [L]:		
b	Agregar el etanol a TME-AS ₁			Balón de vidrio aforado		Agregar a un recipiente de vidrio de mínimo el triple del volumen inicial, Aproximadamente. 3000 mL	
c	Medir 1 L de etanol y verter en el balón de vidrio de 2000 L				$V_2 C_2H_6O$ [L]:		
PROTOCOLO SOLUCION DE ETANOL (C_2H_6O) - ACIDO SULFURICO CONCENTRADO (H_2SO_4)							

ITEM	ACTIVIDAD	HORA INICIAL	HORA FINAL	ELEMENTOS	PARAMETRO REAL MEDIDO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
d	Medir 50 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4)			Probeta de 100 mL	$V_1 H_2SO_4$ [L]:		
e	De $V_1 H_2SO_4$ tomar 10 mL				$V_2 H_2SO_4$ [L]:		
f	Mezclar $V_2 H_2SO_4$ con $V_2 C_2H_6O$					Agitar manualmente hasta obtener una temperatura y color homogéneo en la mezcla.	
g	Repetir el Item d hasta completar la mezcla de los 50 mL H_2SO_4 y 1 L C_2H_6O					Agregar lentamente la mezcla al TME-AS ₁	
h	Repetir el Item b,c,d y e hasta completar una mezcla de 8 L de C_2H_6O y 0,4 L de H_2SO_4				$V C_2H_6O - H_2SO_4$ [L]:	Agregar cada una de las mezclas lentamente al TME-AS ₁ . Al final se debe obtener 17,7 L de C_2H_6O con 0,4 L H_2SO_4	
i	Calentar 19 L agua en RC ₁ a 40 °C			Recipiente de aluminio, resistencia eléctricas.	Tagua [°C] Vagua [L]:		
PROTOCOLO SOLUCION DE ETANOL (C_2H_6O) - ACIDO SULFURICO CONCENTRADO (H_2SO_4)							
ITEM	ACTIVIDAD	HORA INICIAL	HORA FINAL	ELEMENTOS	PARAMETRO REAL MEDIDO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES

j	Sumergir TME-AS1 en RC1					Calentamiento de la mezcla $VC_2H_6O-H_2SO_4$ al baño de maria	
						Cubrir la boca de TME-AS1 con velobind	
					$T_{\text{agua}} [^{\circ}C]$ $T_{\text{mezcla}} [^{\circ}C]:$	Controlar que la temperatura de la mezcla TME-AS1 sea igual a la Tagua de RC1	
k	<u>Agregar la mezcla al reactor</u>						

SERVICIO DEL EQUIPO							
FECHA:						OBSERVACIONES:	
RESPONSABLES:							
HORA DE INICIO:							
PRUEBA A REALIZAR:							
PROTOCOLO PLANTA DE BODIESEL DE 150L/LOTE							
ITEM	ACTIVIDAD	HORA INICIAL	HORA FINAL	ELEMENTOS	PARAMETRO REAL MEDIDO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
1	Encender el sistema de calentamiento de agua para el reactor (65 °C). Interruptor resistencias. RS ₁			Controlador de temperatura.	T [°C]:	Siempre debe estar el nivel del agua por encima de las resistencias	
2	Cargar aceite en el reactor desde el tanque de almacenamiento (35 L) Encender bomba L (bomba succión aceite tanque - filtro - Reactor)				V _{aceite} [L]:	Recordar que las mangueras se encuentran a alta temperatura	
3	Encender motor del agitador (Z) y ajustar a 200 RPM				RPM:		
4	Encender bomba (S) de recirculación del agua entre el sistema de calentamiento y la chaqueta del reactor hasta que la temperatura del aceite en el reactor sea igual a 60 °C						

ITEM	ACTIVIDAD	HORA INICIAL	HORA FINAL	ELEMENTOS	PARAMETRO REAL MEDIDO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
5	<u>Mezcla de etanol y ácido sulfúrico: seguir protocolo A</u>						
6	Con 60 °C en el aceite que está en el reactor agregar la mezcla $V_{C_2H_6O-H_2SO_4}$				T_{aceite} [°C] $V_{C_2H_6O-H_2SO_4}$ [L]	Agregar la mezcla lentamente	
7	Esperar dos horas mientras se agita el aceite con la mezcla $C_2H_6O-H_2SO_4$ dentro del reactor a 60 °C				T_{aceite} [°C]:		
8	Apagar agitador Z y bomba S				V_{mezcla} [L]:		
9	Dejar enfriar hasta el siguiente día						
10	Encender bomba A					Descargar el reactor al decantador	
11	Alimentar al decantador 28 L de la mezcla de esterificación						
12	Apagar bomba A						
13	Esperar una hora hasta que se lleve a cabo la decantación de la mezcla						
14	Encender la bomba M3-X				$V_{fase\ pesada}$ [L]:	Extracción de la fase pesada del decantador al tanque TK6	

						Verificar que la válvula TK6 esté cerrada	
15	Extracción fase liviana a tanque de recuperación de fase liviana						
16	Repetir numerales 10 – 15 hasta terminar el proceso de decantación.					Descargar completamente el reactor	
17	Tiempo mínimo de la etapa: 18 h (8 h operación y 10 h enfriamiento)						
ETAPA DE TRANSESTERIFICACIÓN:							
ITEM	ACTIVIDAD	HORA INICIAL	HORA FINAL	ELEMENTOS	PARAMETRO REAL MEDIDO	RECOMENDACIONES	OBSERVACIONES
18	Encender el sistema de calentamiento de agua para el reactor.				T ₁ [°C] T ₂ [°C]		
19	Extracción mezcla obtenida del producto de la esterificación por medio manual						
20	Agregar la mezcla al reactor.						
21	Repetir puntos 2 y 3 hasta terminar con el producto obtenido de la esterificación						
22	Después de 20 min desde 1, encender bomba S (bomba salida recirculación agua						

	calentamiento a chaqueta del reactor)						
23	Encender motor del agitador (Z) y ajustar a 200 RPM						
24	Esperar 2 h hasta que la temperatura del aceite en el reactor sea igual a 60 °C						
25	Mezclar en un cuñete 15 L de Etanol y 0,5 kg de NaOH.						
26	Al llegar a 63 °C en el reactor agregar la mezcla alcohol – hidróxido de Sodio						
27	Esperar 4 h mientras el proceso se lleva a cabo						
28	Agregar 0,780 L de ácido acético glacial para detener la reacción						
29	Agitar durante 15 min.						
30	Apagar agitador (Z), bomba (S)						
31	Dejar enfriar en el reactor hasta temperatura ambiente						
32	Tiempo mínimo de la etapa: 19 h (7 h operación – 12 h enfriamiento)						

Bibliografía

- [1] C. He, Y. Ge, J. Tan, K. You, X. Han, and J. Wang, "Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions of diesel engine fueled with biodiesel and diesel," *Fuel*, vol. 89, no. 8, pp. 2040–2046, Aug. 2010.
- [2] L. Reijnders, "Handbook of Climate Change Mitigation," 2012.
- [3] K. W. Energy, "Key World Energy," 2012.
- [4] M. Leahy, J. L. Barden, B. T. Murphy, N. Slater-thompson, and D. Peterson, "International Energy Outlook 2013."
- [5] A. Islam, Y. H. Taufiq-Yap, C.-M. Chu, E.-S. Chan, and P. Ravindra, "Studies on design of heterogeneous catalysts for biodiesel production," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 91, no. 1–2, pp. 131–144, Jan. 2013.
- [6] T. Issariyakul, M. G. Kulkarni, A. K. Dalai, and N. N. Bakhshi, "Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system," *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, no. 5, pp. 429–436, May 2007.
- [7] R. G. A. M. Esmeral., "Modulo de energía-Mesa Técnica de Trabajo Interinstitucional," Bogotá Colombia, 2009.
- [8] J.-H. Tsai, S.-J. Chen, K.-L. Huang, Y.-C. Lin, W.-J. Lee, C.-C. Lin, and W.-Y. Lin, "PM, carbon, and PAH emissions from a diesel generator fuelled with soy-biodiesel blends.," *J. Hazard. Mater.*, vol. 179, no. 1–3, pp. 237–43, Jul. 2010.
- [9] S. A. Basha, K. R. Gopal, and S. Jebaraj, "A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1628–1634, Aug. 2009.
- [10] M. Zabeti, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, "Activity of solid catalysts for biodiesel production: A review," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 6, pp. 770–777, Jun. 2009.
- [11] Y. M. Sani, W. M. A. W. Daud, and a. R. Abdul Aziz, "Activity of solid acid catalysts for biodiesel production: A critical review," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 470, pp. 140–161, Jan. 2014.

- [12] Y. Zhang, "Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment," *Bioresour. Technol.*, vol. 89, no. 1, pp. 1–16, Aug. 2003.
- [13] M. E. Borges and L. Díaz, "Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2839–2849, Jun. 2012.
- [14] a. a. Apostolakou, I. K. Kookos, C. Marazioti, and K. C. Angelopoulos, "Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 7–8, pp. 1023–1031, Jul. 2009.
- [15] I. M. Atadashi, M. K. Aroua, a. R. Abdul Aziz, and N. M. N. Sulaiman, "The effects of water on biodiesel production and refining technologies: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3456–3470, Jun. 2012.
- [16] L. C. Paula Castro, Javier Coello, *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Lima, Perú, 2007, p. 173.
- [17] J. T. Titus, "DISEÑO CONCEPTUAL DE PLANTA PILOTO PARA PRODUCCION DE BIODIESEL A PARTIR DE GRASAS ANIMALES ' Alumno : Hugo Cristián Villaseñor Neira," 2010.
- [18] W. Gu, Z. Wu, R. Bo, W. Liu, G. Zhou, W. Chen, and Z. Wu, "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 26–37, Jan. 2014.
- [19] J. L. Seale and A. a. Solano, "The changing demand for energy in rich and poor countries over 25years," *Energy Econ.*, vol. 34, no. 6, pp. 1834–1844, Nov. 2012.
- [20] A. Consult, "Establecimiento de una Agencia Inter- nacional de Energías Renovables (IRENA)," *Minist. Fed. del medio Ambient. Berlín*, p. 23, 2008.
- [21] C. T. Tugcu, I. Ozturk, and A. Aslan, "Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: Evidence from G7 countries," *Energy Econ.*, vol. 34, no. 6, pp. 1942–1950, Nov. 2012.
- [22] O. Victoria and G. González, "PLAN DE ACCION INDICATIVO 2010 – 2015 PROGRAMA DEL USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGIA (PROURE)," *Minist. minas y energía Repub. Colomb.*, 2011.
- [23] J. M. Garc, "biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol," *Fund. para el Crecim. Madrid CEIM*, no. M–30985–2006, p. 125, 2006.
- [24] D. Tecno, "Balance Nacional de Energía 2011," *Dir. Gen. Planeación Energética México*, p. 159, 2012.

- [25] J. Andrade and F. Rojas, "Unidad de Planeación Minero Energética," *Minist. minas y energía Repub. Colomb.*, no. 2322–9519, p. 99, 2012.
- [26] J. M. Marchetti, "A summary of the available technologies for biodiesel production based on a comparison of different feedstock's properties," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 90, no. 3, pp. 157–163, May 2012.
- [27] R. Janssen and D. D. Rutz, "Sustainability of biofuels in Latin America: Risks and opportunities," *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 5717–5725, Oct. 2011.
- [28] D. McGinn, D. Green, R. Hinrichs-rahles, S. Sawyer, M. Sander, R. Taylor, I. Giner-reichl, S. Teske, H. Lehmann, and D. Hales, *Renewables 2013 GLOBAL STATUS REPORT 2013*. 2013.
- [29] D. Y. C. Leung, X. Wu, and M. K. H. Leung, "A review on biodiesel production using catalyzed transesterification," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1083–1095, Apr. 2010.
- [30] F. Manzano-Agugliaro, a. Alcayde, F. G. Montoya, a. Zapata-Sierra, and C. Gil, "Scientific production of renewable energies worldwide: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 134–143, Feb. 2013.
- [31] S. A. Cosenit, "Estrategia de uso racional de energía en el sector industrial en Colombia," *Minist. minas y energía Repub. Colomb.*, p. 130, 2009.
- [32] M. Energ, "Proyección de Demanda de Combustibles Líquidos y GNV en Colombia," 2012.
- [33] William H. Kemp, *Biodiesel: Basics and Beyond*. Ontario Canada, 2006, p. 588.
- [34] I. para la diversificación y ahorro de la Energía, "Plan de energías renovables (PER) 2011 - 2020," Madrid España, 2011.
- [35] C. G. Fabio Sierra, *Tecnologías para el aprovechamiento de los biocombustibles*. Bogotá Colombia, 2008, p. 326.
- [36] M. P. R. Q. Angela Maria Arbeláez Marin, "Diseño conceptual de un proceso para la obtención de biodiesel a partir de algunos aceites vegetales colombianos," Universidad EAFIT, 2007.
- [37] F. Augusto and A. Vargas, *TESIS DOCTORAL Dirigida por el Dr. Joan Salvadó Rovira Departament d'En ginyeria Química Tarragona*. 2010.
- [38] J. M. Marchetti, V. U. Miguel, and a. F. Errazu, "Possible methods for biodiesel production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 6, pp. 1300–1311, Aug. 2007.

- [39] M. K. Lam, K. T. Lee, and A. R. Mohamed, "Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: a review.," *Biotechnol. Adv.*, vol. 28, no. 4, pp. 500–18, 2010.
- [40] Fedepalma, "Programa de Biodiésel en Colombia y su potencial para la generación de energía eléctrica," Bogotá Colombia, 2009.
- [41] A. S. R. Brásio, A. Romanenko, L. O. Santos, and N. C. P. Fernandes, "Modeling the effect of mixing in biodiesel production.," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 11, pp. 6508–14, Jun. 2011.
- [42] C. C. C. M. Silva, N. F. P. Ribeiro, M. M. V. M. Souza, and D. a. G. Aranda, "Biodiesel production from soybean oil and methanol using hydrotalcites as catalyst," *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, no. 2, pp. 205–210, Feb. 2010.
- [43] a. E. Atabani, a. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and S. Mekhilef, "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2070–2093, May 2012.
- [44] J. M. Dias, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. F. Almeida, "Production of biodiesel from acid waste lard.," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 24, pp. 6355–61, Dec. 2009.
- [45] Paulo César Narvaez. Juan G Cadavid., "Potencial oleoquímico del aceite de palma y de palmiste," *Invovacion y ciencia*, vol. 15, no. 1, Bogotá Colombia, pp. 36 – 47, 2008.
- [46] A. N. Phan and T. M. Phan, "Biodiesel production from waste cooking oils," *Fuel*, vol. 87, no. 17–18, pp. 3490–3496, Dec. 2008.
- [47] G. Anastopoulos, A. Deligiannis, S. Kalligeros, D. Karonis, F. Zannikos, and E. Lois, "Synthesis of Biodiesel from Tobacco and Waste Frying Oil Using Heterogeneous KHCO₃ / Al₂O₃ Catalyst," vol. 7, no. 3, pp. 1–14, 2013.
- [48] Z. Yaakob, M. Mohammad, M. Alherbawi, Z. Alam, and K. Sopian, "Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 184–193, Feb. 2013.
- [49] G. Mendow, N. S. Veizaga, B. S. Sánchez, and C. a Querini, "Biodiesel production by two-stage transesterification with ethanol.," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 22, pp. 10407–13, Nov. 2011.
- [50] Robles-Medina, P. a González-Moreno, L. Esteban-Cerdán, and E. Molina-Grima, "Biocatalysis: towards ever greener biodiesel production.," *Biotechnol. Adv.*, vol. 27, no. 4, pp. 398–408, 2009.
- [51] L. A. S. do Nascimento, R. S. Angélica, C. E. F. da Costa, J. R. Zamian, and G. N. da Rocha Filho, "Conversion of waste produced by the deodorization of palm oil as

- feedstock for the production of biodiesel using a catalyst prepared from waste material.," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 17, pp. 8314–7, Sep. 2011.
- [52] M. G. Jang, D. K. Kim, S. C. Park, J. S. Lee, and S. W. Kim, "Biodiesel production from crude canola oil by two-step enzymatic processes," *Renew. Energy*, pp. 1–6, Sep. 2011.
- [53] A. Talebian-Kiakalaieh, N. A. S. Amin, and H. Mazaheri, "A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil," *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 683–710, Apr. 2013.
- [54] R. J. Larosa, "Proceso para producción de biodiesel (metilester o ester metilico de acidos grasos)," 2007.
- [55] S. A. Basha, K. R. Gopal, and S. Jebaraj, "A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1628–1634, Aug. 2009.
- [56] B. M. Ordoñez, L. C. Chaves, and W. Rodríguez-pérez, "Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina," vol. XV, no. 1, pp. 61–70, 2013.
- [57] A. Hayyan, M. Z. Alam, M. E. S. Mirghani, N. a Kabbashi, N. I. N. M. Hakimi, Y. M. Siran, and S. Tahiruddin, "Sludge palm oil as a renewable raw material for biodiesel production by two-step processes.," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 20, pp. 7804–7811, Jun. 2010.
- [58] S. Liu, T. McDonald, and Y. Wang, "Producing biodiesel from high free fatty acids waste cooking oil assisted by radio frequency heating," *Fuel*, vol. 89, no. 10, pp. 2735–2740, Oct. 2010.
- [59] F. Ganduglia, *Manual de Biocombustible*. San José Costa Rica, 2009, p. 207.
- [60] R. Alenezi, R. C. D. Santos, S. Raymahasay, and G. a. Leeke, "Improved biodiesel manufacture at low temperature and short reaction time," *Renew. Energy*, vol. 53, pp. 242–248, May 2013.
- [61] G. Santori, G. Di Nicola, M. Moglie, and F. Polonara, "A review analyzing the industrial biodiesel production practice starting from vegetable oil refining," *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 109–132, Apr. 2012.
- [62] M. Berrios, M. a. Martín, a. F. Chica, and a. Martín, "Purification of biodiesel from used cooking oils," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 3625–3631, Nov. 2011.
- [63] Jérôme Hervé Lamoureux, "Diseño conceptual de una planta de biodiesel," Universidad de Chile, 2007.

- [64] H. Mootabadi, B. Salamatinia, S. Bhatia, and A. Z. Abdullah, "Ultrasonic-assisted biodiesel production process from palm oil using alkaline earth metal oxides as the heterogeneous catalysts," *Fuel*, vol. 89, no. 8, pp. 1818–1825, Aug. 2010.
- [65] H. Falahati and a. Y. Tremblay, "The effect of flux and residence time in the production of biodiesel from various feedstocks using a membrane reactor," *Fuel*, vol. 91, no. 1, pp. 126–133, Jan. 2012.
- [66] E. E. Kalu, K. S. Chen, and T. Gedris, "Continuous-flow biodiesel production using slit-channel reactors.," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 6, pp. 4456–61, Mar. 2011.
- [67] P. Guo, F. Huang, Q. Huang, and C. Zheng, "Retraction notice to biodiesel production using magnetically stabilized fluidized bed reactor," *Renew. Energy*, vol. 55, p. 561, Jul. 2013.
- [68] K. G. Georgogianni, a. K. Katsoulidis, P. J. Pomonis, G. Manos, and M. G. Kontominas, "Transesterification of rapeseed oil for the production of biodiesel using homogeneous and heterogeneous catalysis," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 7–8, pp. 1016–1022, Jul. 2009.
- [69] S. Lee, D. Posarac, and N. Ellis, "An experimental investigation of biodiesel synthesis from waste canola oil using supercritical methanol," *Fuel*, vol. 91, no. 1, pp. 229–237, Aug. 2011.
- [70] H.-Y. Shin, S.-H. Lee, J.-H. Ryu, and S.-Y. Bae, "Biodiesel production from waste lard using supercritical methanol," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 61, pp. 134–138, Sep. 2011.
- [71] E. A. Torres, G. S. Cerqueira, T. M Ferrer, C. M. Quintella, M. Raboni, V. Torretta, and G. Urbini, "Recovery of different waste vegetable oils for biodiesel production: a pilot experience in Bahia State, Brazil.," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 12, pp. 2670–4, Dec. 2013.
- [72] A. Bouaid, Y. Diaz, M. Martinez, and J. Aracil, "Pilot plant studies of biodiesel production using Brassica carinata as raw material," *Catal. Today*, vol. 106, no. 1–4, pp. 193–196, Oct. 2005.
- [73] A. Hayyan, F. S. Mjalli, M. A. Hashim, M. Hayyan, I. M. Alnashef, S. M. Al-Zahrani, and M. a Al-Saadi, "Ethanesulfonic acid-based esterification of industrial acidic crude palm oil for biodiesel production.," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 20, pp. 9564–9570, Jul. 2011.
- [74] H. C. Ong, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and R. S. Norhasyima, "Comparison of palm oil, *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* for biodiesel: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3501–3515, Oct. 2011.

- [75] F. R. Ricardo Antonio Torres, Edwin Giron, "Minianuario estadístico 2013," Bogotá Colombia, 2013.
- [76] F. M. Diana Hernandez, "Desarrollo de la ingeniería conceptual para la producción de biodiesel a partir de aceites domesticos dessechados en la localidad tercera de Bogotá," Universidad de América, 2010.
- [77] M. K. Lam and K. T. Lee, "Mixed methanol-ethanol technology to produce greener biodiesel from waste cooking oil: A breakthrough for SO₄2-/SnO₂-SiO₂ catalyst," *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 8, pp. 1639-1645, Aug. 2011.
- [78] M. Lapuerta, J. M. Herreros, L. L. Lyons, R. García-Contreras, and Y. Briceño, "Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions," *Fuel*, vol. 87, no. 15-16, pp. 3161-3169, Nov. 2008.
- [79] J. M. Encinar, J. F. González, and a. Rodríguez-Reinares, "Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization," *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, no. 5, pp. 513-522, May 2007.
- [80] L. T. Thanh, K. Okitsu, Y. Sadanaga, N. Takenaka, Y. Maeda, and H. Bandow, "A two-step continuous ultrasound assisted production of biodiesel fuel from waste cooking oils: a practical and economical approach to produce high quality biodiesel fuel," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 14, pp. 5394-401, Jul. 2010.
- [81] M. Raita, V. Champreda, and N. Laosiripojana, "Biocatalytic ethanolysis of palm oil for biodiesel production using microcrystalline lipase in tert-butanol system," *Process Biochem.*, vol. 45, no. 6, pp. 829-834, Jun. 2010.
- [82] C. C. Enweremadu and M. M. Mbarawa, "Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2205-2224, Dec. 2009.
- [83] Y. C. Sharma, B. Singh, and S. N. Upadhyay, "Advancements in development and characterization of biodiesel: A review," *Fuel*, vol. 87, no. 12, pp. 2355-2373, Sep. 2008.
- [84] S. L. M. Y. K. Y. RONALD E. WALPOLE, RAYMOND H. MYERS, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* Novena edición, Mexico. 2012, p. 816.
- [85] D. H. D. Martinez, "Desarrollo de la ingeniería conceptual para la producción de biodiesel a partir de aceite domestico desechado en la localidad tercera de bogotá," Universidad de América, 2010.
- [86] J. A. T. Paulo César Narvaez, "Determinación por cromatografía de gases de alquil ésteres (metílico y etílico) de ácidos grasos , en presencia de mono- , di- y

triglicéridos Gas chromatography determination of fatty acid alkyl esters (methyl and ethyl) in the presence of mono- , di,” no. 57, pp. 58–62, 2005.

- [87] E. S. Domalski, “Selected values of heat of combustion and heat of formation of organic compounds.” p. 54, 1972.
- [88] P. Milimetro, “LÁMINAS ALFAJOR O ANTIDESLIZANTE,” 2012.