



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR BATCH PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL COMO COMBUSTIBLE DE ORIGEN ORGÁNICO PRODUCIDO A PARTIR DE ACEITES VEGETALES VARIANDO LA RELACIÓN MOLAR ACEITE/ALCOHOL

ANDRES ARGUMEDO NEGRETE
Estudiante de Ingeniería Química

Jacipt Alexander Ramón Valencia
Doctor en química
Director del Trabajo del Grado



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS QUIMICA, AMBIENTAL Y CIVIL

PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA

PAMPLONA MARZO 2019



ANDRES ARGUMEDO NEGRETE

Trabajo de Grado
Para optar al título de Ingeniero Químico

Jacipt Alexander Ramón Valencia
Director



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS QUIMICA, AMBIENTAL Y CIVIL

PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA

PAMPLONA MARZO 2019



*Formando líderes para la construcción de un
nuevo país en paz*



LISTA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Lista de Tablas | 6 |
| Lista de Figuras | 7 |
| Lista de Ilustraciones | 8 |
| RESUMEN | 9 |
| 1 INTRODUCCIÓN | 10 |
| 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN | 11 |
| 3 ESTADO DEL ARTE | 12 |
| 3.1 Biodiesel en Colombia | 13 |
| 3.2 Biodiesel en la Región..... | 14 |
| 3.2.1 La Planta de Tibú | 15 |
| Capítulo I..... | 16 |
| 4 MARCO TEORICO | 17 |
| 4.1 Propiedades del Biodiesel | 17 |
| 4.1.1 Esquema Básico Para La Producción De Biodiesel..... | 21 |
| 4.2 Transesterificación. | 21 |
| 4.2.1 Métodos catalíticos de producción de biodiesel..... | 22 |
| 4.2.2 Transesterificación con catalizador ácido | 22 |
| 4.2.3 Transesterificación con catalizador alcalino | 23 |
| 4.2.4 Calidad y rendimiento del biodiesel producido | 23 |
| 4.3 Simulación..... | 25 |
| 4.3.1 Procedimiento de simulación | 27 |
| 4.4 Reactores | 28 |
| 4.4.1 Reactor Discontinuo Ideal..... | 28 |
| 4.4.2 Reactor Continúo Agitado Ideal..... | 30 |
| 4.5 Marco legal..... | 31 |
| 4.6 Marco Referencial | 31 |
| 5 OBJETIVOS | 33 |
| 5.1 Objetivo General | 33 |
| 5.2 Objetivos Específicos..... | 33 |



| | |
|---|----|
| Capitulo II..... | 34 |
| 6 METODOLOGIA..... | 35 |
| 6.1 Revisión Bibliográfica..... | 35 |
| 6.2 Diseño del Reactor a Escala Laboratorio..... | 36 |
| 6.3 Producción de Biodiesel..... | 36 |
| 6.3.1 Diseño de experimentos..... | 37 |
| 6.4 Cinética de reacción..... | 39 |
| 6.5 Simulación en ASPEN Plus..... | 41 |
| Capitulo III..... | 42 |
| 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 43 |
| 7.1 Revisión Bibliográfica..... | 43 |
| 7.2 Diseño Del Reactor..... | 43 |
| 7.2.1 Parámetros de entrada..... | 43 |
| 7.2.2 Primera etapa de diseño..... | 44 |
| 7.2.3 Determinación de flujos máxicos y volumen del reactor..... | 44 |
| 7.2.4 Flujos volumétricos para aceite y alcohol..... | 44 |
| 7.2.5 Cantidad de catalizador..... | 45 |
| 7.2.6 Volumen del reactor..... | 46 |
| 7.2.7 Dimensionamiento y selección del material..... | 47 |
| 7.3 Materiales y costos..... | 55 |
| 7.4 Sistema de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales..... | 56 |
| 7.4.1 Cálculo de las cantidades de los reactivos..... | 57 |
| 8 PARTE EXPERIMENTAL..... | 59 |
| 8.1 Montaje experimental de la producción de biodiesel en el laboratorio..... | 60 |
| 8.1.1 Filtración..... | 61 |
| 8.1.2 Preparación del metóxido..... | 61 |
| 8.1.3 Reacción de transesterificación..... | 62 |
| 8.1.4 Separación..... | 63 |
| 8.1.5 Lavado de biodiesel..... | 63 |
| 8.1.6 Secado..... | 64 |
| 8.2 Calidad y rendimiento del biodiesel producido..... | 65 |
| 8.2.1 Apariencia..... | 65 |
| 8.2.2 Densidad del biodiesel..... | 66 |

Lista de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Comparación de las propiedades del biodiesel y diésel [7] | 18 |
| Tabla 2 Estándares de calidad del biodiesel según normas técnicas internacionales y nacionales [7] | 20 |
| Tabla 3 Estándar europeo (EN14214) - estándar americano (ASTM D 6751). | 24 |
| Tabla 4 Factor y rango de diseño para aceite vegetal | 37 |
| Tabla 5 Matriz de combinación de tratamientos con aceite vegetal | 37 |
| Tabla 6 Matriz de combinación de tratamientos para la producción de biodiesel en el laboratorio con aceite vegetal | 38 |
| Tabla 7 Composición de ácidos grasos de aceite vegetal [6]. | 38 |
| Tabla 8 Lista de instrumentos del reactor batch | 54 |
| Tabla 9 Válvulas | 54 |
| Tabla 10 Dimensionamiento del reactor batch (Fuente: propia) | 54 |
| Tabla 11 Costos asociados a la construcción del reactor | 55 |
| Tabla 12 Datos para densidad de aceite vegetal | 56 |
| Tabla 13 Cantidad de Reactivos para el proceso de producción de biodiesel a nivel laboratorio | 59 |
| Tabla 14 Densidades de los ésteres metílicos obtenidos. | 66 |
| Tabla 15 % de ceniza de los ésteres etílicos obtenidos (Fuente: Propia) | 67 |
| Tabla 16 temperatura del punto de nube obtenido en el laboratorio | 69 |
| Tabla 17 Porcentaje de rendimiento | 70 |
| Tabla 18 Parámetros cinéticos | 71 |
| Tabla 19 Tabla datos de alimentación | 74 |
| Tabla 20 Tabla de datos de reacción | 75 |
| Tabla 21 Tabla de datos del decantador | 76 |
| Tabla 22 Estaciones de Servicio del municipio de Pamplona [36] | 90 |
| Tabla 23 resultados a la pregunta 1 | 95 |
| Tabla 24 resultados a la pregunta 2 | 96 |
| Tabla 25 resultados a la pregunta 3 | 97 |
| Tabla 26 resultados a la pregunta 4 | 98 |
| Tabla 27 resultados a la pregunta 5 | 99 |
| Tabla 28 resultados a la pregunta 6 | 100 |
| Tabla 29 resultados a la pregunta 7 | 101 |
| Tabla 30 resultados a la pregunta 8 | 102 |
| Tabla 31 resultados a la pregunta 9 | 103 |
| Tabla 32 resultados a la pregunta 10 | 104 |



Lista de Ilustraciones

| | |
|--|-----------|
| <i>Ilustración 1 Ubicación del reactor para la producción de biodiesel dentro de las instalaciones de la Universidad de Pamplona.</i> | <i>32</i> |
| <i>Ilustración 2 plano del reactor en 3D (fuente: autor).....</i> | <i>51</i> |
| <i>Ilustración 3 Montaje final del reactor</i> | <i>52</i> |
| <i>Ilustración 4 Reactor construido (fuente: autor).</i> | <i>62</i> |
| <i>Ilustración 5 Separación de las fases (fuente: autor).....</i> | <i>63</i> |
| <i>Ilustración 6 Lavados 1, 2, 3 del biodiesel (fuente: autor).</i> | <i>64</i> |
| <i>Ilustración 7 Secado del biodiesel (fuente: autor).</i> | <i>65</i> |

RESUMEN

En el presente documento se plantea el diseño y la construcción de un reactor batch a escala laboratorio para la producción de biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales y grasas, utilizando catalizadores básicos. Este reactor cuenta con un control de temperatura tipo *on - off* que nos permite mantener esta variable dentro del rango apropiado para la producción de biodiesel. El montaje de dicho reactor se realizó en el laboratorio de operaciones unitarias, el cual se utilizará para fines académicos e investigativos de los estudiantes de ingeniería química de la Universidad de Pamplona.

Para realizar el diseño del reactor batch a escala laboratorio fueron considerados trabajos previos, los cuales sirvieron como referente para este propósito. A partir de esta información fue posible establecer un diseño preliminar del reactor batch y el comportamiento físico-químico del sustrato y reactivos utilizados para llevar a cabo el proceso de transesterificación del aceite. Para la construcción del reactor a escala laboratorio se establecieron los balances de materia de todo el proceso y los cálculos necesarios para el dimensionamiento de este. Seguidamente se correlacionaron las variables de proceso con el fin de establecer medidas correctivas para mejorar el rendimiento del reactor utilizando el simulador de procesos Aspen Plus. Por último, se propone un sistema de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales y grasas utilizando catalizadores básicos a través de la implementación del reactor a escala laboratorio.

Palabras claves: reactor batch, biodiesel, catalizadores básicos, biocombustibles

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años el uso de combustibles fósiles está aumentando de manera muy rápida en todo el mundo y uno de los grandes retos en esta época es la reducción de gases de efecto invernadero a la atmosfera. Con los avances de la biotecnología, la transesterificación de aceites vegetales es uno de los métodos más viables hoy en día para la producción de biocombustibles a partir de fuentes renovables [1].

Estos biocombustibles se caracterizan por los beneficios ambientales que su producción genera y demás características que posee [2]. Estas ventajas ambientales han hecho que sea modificada la legislación en muchos países para que pueda sustituir el diésel tradicional, aumentando su uso de manera significativa principalmente en vehículos.

Por la necesidad de desarrollar sistemas de obtención de biocombustibles, en este trabajo se implementó el diseño y la construcción de un reactor batch a escala laboratorio para la producción de biodiesel. Contribuyendo de este modo al desarrollo de este tipo de tecnologías en el país y más específicamente en el departamento de Norte de Santander.

Una de las tareas del ingeniero químico, cuando está frente a una serie de operaciones que transforman ciertos insumos o materias primas mediante procesos físicos y químicos, consiste en el diseño de los equipos necesarios para los procesos. En los casos en que se dan transformaciones químicas de la materia, el corazón del proceso es el reactor químico [3]. Para diseñar un reactor se debe solucionar una serie de interrogantes tales como: ¿qué tipo de equipo se necesita para lograr la obtención de la reacción requerida? ¿Qué condiciones de operación se requieren? La respuesta a estas cuestiones constituye el diseño del reactor. El análisis de costos para determinar el diseño más rentable introduce nuevos factores tales como los materiales de construcción, la prevención de la corrosión, los requerimientos de operación y mantenimiento, entre otros [4], [5]. Para optimizar los costos deberá tenerse en cuenta además la instrumentación y mecanismos de control [6].

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El problema del cambio climático, en especial el resultado del calentamiento global provocado por la acumulación de los gases de efecto invernadero, es un tema que en los últimos años ha tomado una gran relevancia, pues las variaciones se han acelerado crecientemente de manera anómala, a tal grado que pone en riesgo a la humanidad.

Se señala como el principal responsable del calentamiento global al dióxido de carbono. Pues la quema excesiva de los combustibles fósiles en las plantas generadoras de electricidad y por el transporte automotor ha incrementado el lanzamiento de emisiones de CO₂ a la atmósfera, así también el rápido avance industrial de los centros urbanos [7].

Las principales emisiones de CO₂ que se vierten a la atmósfera provienen del sector transporte, el cual consume la mayor parte de los combustibles fósiles. Un kWh de trabajo mecánico de un motor diésel produce alrededor de 1.020 g de CO₂, mientras que un litro de gasolina o del mismo diésel vierte a la atmósfera entre 2.750 y 2.400 g de CO₂ respectivamente [8].

Estos cambios en la composición de la atmósfera (aumento en la concentración de CO₂ y otros gases de efecto invernadero) están incrementando el efecto invernadero [8], por un aumento en la retención de la radiación terrestre los cuales promueven el calentamiento de la atmósfera y de la misma superficie; este fenómeno se conoce como calentamiento global, una de las principales expresiones del mencionado cambio climático. Por ello se ha generado una creciente preocupación para el hombre el intentar disminuir la continua degradación del medio ambiente.

Como futuros ingenieros químicos es de vital importancia mantener una idea ambientalista en la que podamos impartir los conocimientos adquiridos durante el ciclo profesional, asumiendo una posición ambiental para contribuir con la disminución de la degradación del medio ambiente.

Fundamentado en lo discutido hasta el momento se planteó el diseño y construcción de un reactor batch a escala laboratorio para la producción de biodiesel; proporcionando así una pequeña contribución al medio ambiente y dando inicio a un sinnúmero de trabajos investigativos valiéndose de las diversas aplicaciones que se le puede dar a nivel industrial a este tipo de reactor.

3 ESTADO DEL ARTE

El biodiesel se ha convertido en un combustible diésel muy estudiado últimamente debido a la preocupación de la sociedad actual por disminuir la contaminación provocada en gran parte por las emisiones que generan otros combustibles, además, el biodiesel es hecho de fuentes renovables como aceites vegetales y grasas animales [2], [9], [10].

Cien años atrás, Rudolf Diesel ensayó aceites vegetales como combustible para sus máquinas. Con la baja en el precio del petróleo, las fracciones de crudo apropiadas eran refinadas y utilizadas como combustible y los combustibles diésel y las máquinas diésel evolucionaron juntas. En los años 30's y 40's los aceites vegetales fueron usados como combustibles diésel, pero solamente en situaciones de emergencia [9].

El biodiesel ha alcanzado gran interés como fuente alternativa de energía, ya que presenta muchas características atractivas: no tóxico, biodegradable, no inflamable, técnicamente viable y competitivo económicamente. En Medellín, Colombia se modeló y simuló un biorreactor de membrana empleando un catalizador enzimático lipasa de *Cándida Antártica* para la obtención de biodiesel a partir de aceite de palma y etanol. Como resultado se obtuvo que el reactor de membrana con enzimas inmovilizadas es la mejor opción para la producción de biodiesel. No solo porque se obtienen altas conversiones, sino también porque se minimiza el tiempo de residencia, además de presentar la separación simultánea de los reactivos remanentes de los productos [11].

3.1 Biodiesel en Colombia

En 2001, se expidió la ley 693, que está articulada a la ley 939 de 2004, con lo que se abrió el camino a la producción de biocombustibles. En la ley 939 de 2004 se estimula la producción y comercialización de biodiesel de origen vegetal o animal en motores diésel, en las calidades que establezcan el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [12].

El fruto del trabajo de las especificaciones del biodiesel se ratificó en 2006 en la NTC 5444 Biodiesel para uso en motores diésel. Aquí se cubren las especificaciones de los alquíl-esteres de ácidos grasos para uso como combustible o como componente de mezclas con combustibles diesel, cuyas características están definidas en la NTC 1438 Petróleo y sus derivados (Combustibles para motores diésel).

Colombia es el primer productor americano y quinto productor mundial de aceite de palma, por lo cual es el principal cultivo destinado a producción de biocombustibles.

En Colombia en el año 2006 las materias primas vegetales destinadas a la producción de biodiesel fueron 56.000 toneladas y en 2007 fueron 75.000 toneladas, en ambos años no se reportó consumo de una fuente diferente.

Las importaciones de biodiesel actualmente son de 4.000 barriles diarios y estas son compensadas por las exportaciones de 12.000 barriles diarios de gasolina. Por lo tanto, el biodiesel puede representar un factor económico de importancia para el país, ya que 30% de la producción actualmente se emplea como sustituto de los tradicionales derivados del petróleo [12].

En Colombia, en la Universidad de la Sabana, se presentaron resultados recientemente sobre obtención de biodiesel a partir del aceite de palma. Durante el proceso de beneficio del aceite en biodiesel, resulta también la glicerina, que contiene unas partículas llamadas carotenos, con las cuales se podrían obtener, luego de otro procedimiento industrial, colorantes naturales para la industria alimenticia. Adicional a lo logrado en la Universidad de la Sabana, en Colombia se han hecho otros estudios sobre la producción de este combustible de origen

vegetal, tales son los casos de la Universidad del Norte, la Universidad Industrial de Santander (UIS) y la Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia (Corpodib). Según informó Fedepalma, en Europa ya se produce biodiesel, pero teniendo como materia prima los aceites de otros cultivos de oleaginosas, como colza, girasol, cardo y soya. Alemania produce 415000 toneladas anuales y 286000 Francia, países donde es utilizado en el sector del transporte. La industria de biodiesel más desarrollada, está en Malasia, país que cuenta con tres millones de hectáreas sembradas en palma. Allí, desde 1995 funciona una planta de producción de biodiesel, combustible que en esa nación hace mover los motores de buses y camiones y los estáticos de muchas fábricas. Se espera que el biodiesel sea una realidad en Colombia en corto tiempo [13].

En el caso de Argentina, se están desarrollando algunos puntos del sector agropecuario, de donde se extrae la materia prima del biodiesel: la soja. Para que fuera factible el negocio de los combustibles alternativos, fue necesario que existiesen cultivos de soja en abundancia en el país. Además de este incremento en las cosechas de soja, otra característica del sector agropecuario argentino es que tiene una industria aceitera altamente competitiva a nivel internacional. En Argentina existen prácticas sostenibles y no sostenibles en la agricultura. Pero lo cierto es que los desafíos existen, y debe tenerse en cuenta que lo que está en juego es el recurso natural estratégico: el suelo [11].

3.2 Biodiesel en la Región

La producción constante de caña de azúcar y palma de aceite ofrece a Norte de Santander la posibilidad de convertirse en un actor importante en el creciente mercado de los biocombustibles, que busca disminuir la dependencia del petróleo, proteger el medio ambiente y generar empleo rural.

El presidente de la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia (FedeBiocombustibles), Jorge Bendeck Olivella, asegura que el distrito de riego del río Zulia

y la zona del Catatumbo, especialmente el municipio de Tibú, representan una gran oportunidad para el desarrollo de la agroindustria del departamento.

3.2.1 La Planta de Tibú

En el municipio de Tibú se está desarrollando el proyecto Palma de Catatumbo, que tiene como eje central la construcción de una planta extractora de aceite.

La planta, según la gerente regional del grupo empresarial Oleoflores (mayor inversor del proyecto), Marcela Quintero, se empezó a construir en enero del 2013 y se espera hacer las primeras pruebas en noviembre del mismo año.

La obra, según la empresaria, tiene un costo aproximado de \$35.000 millones y tendrá una capacidad de producción de 46 toneladas de aceite por hora.

Actualmente, y de acuerdo a las cifras entregadas por Quintero, la planta tiene a disposición 17.000 hectáreas de caña de azúcar, propiedad de los pequeños y grandes productores asociados a este proyecto [14].

4 MARCO TEORICO

El biodiesel es un combustible compuesto por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables, como aceites vegetales, empleado en motores de ignición de compresión, tanto como en calderas de calefacción. Dicho en términos más simples: el biodiesel es un combustible de origen orgánico producido a partir de aceites vegetales o grasas animales; asimismo, puede ser utilizado como sustituto o aditivo del diésel convencional [15]. El término *bio* hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diésel tradicional derivado del petróleo; por su parte, *diesel* alude a su uso en motores de este tipo [16].

Una de las principales ventajas de la utilización del biodiesel es la reducción de las emisiones de CO₂, gracias al balance neutro de carbono en la combustión de biodiesel [16]. Así como en la reducción de dioxinas y derivados como furanos, orgánicos persistentes volátiles, los cuales son originados por la combustión del diésel derivado del petróleo [11].

La producción de biodiesel se ajusta dentro de los lineamientos de reducción de gases de tipo efecto invernadero, establecidos en el Protocolo de Kyoto y aplica como Mecanismos de Desarrollo Limpio [17]. El biodiesel es un combustible alternativo para el diésel del petróleo, es producido principalmente por una reacción llamada transesterificación; llevada a cabo entre un aceite y un alcohol en presencia de un catalizador, para obtener los mono-alquil ésteres y glicerol, que luego se separan y se purifican [7].

4.1 Propiedades del Biodiesel

Las características del biodiesel son las siguientes:

- Combustible limpio.
- Es biodegradable.
- No tóxico
- Alto índice de lubricidad.
- Libre de azufre y aromáticos.

El biodiesel es un combustible oxigenado, por eso tiene una combustión completa en comparación al diésel derivado del petróleo y produce menos gases contaminantes. Tiene un punto de inflamación relativamente alto (150 °C) que le hace menos volátil que el diésel del petróleo y es más seguro de transportar (ver **Tabla 1**).

Tabla 1 Comparación de las propiedades del biodiesel y diésel [7]

| Propiedades | Biodiesel | Diésel |
|-----------------------------------|------------|-----------|
| Metil éster | 95.5 >98% | - |
| Carbono (% peso) | 77 | 86.5 |
| Azufre (% peso) | 0.0024 | 0.05 máx. |
| Agua (ppm) | 0.05% máx. | 161 |
| Oxígeno (% peso) | 11 | 0 |
| Hidrógeno (% peso) | 12 | 13 |
| Numero de cetano | 48-55 | 48-55 |
| PCI (kJ/kg) | 37700 | 41860 |
| Viscosidad cinemática (40°C) | 1.9-6.0 | 1.3-4.1 |
| Punto de inflamación (°C) | 100-170 | 60-80 |
| Punto de ebullición (°C) | 182-338 | 188-343 |
| Gravedad específica (Kg/L) (60°C) | 0.88 | 0.85 |
| Relación aire/combustible | 13.8 | 15 |

Las propiedades del biodiesel varían según la materia prima a partir de la cual se le obtuvo (aceites vegetales nuevos o usados de distinto origen o grasas animales). Es por ello, que las normas indican un rango admisible en el valor de las propiedades [18]. El costo del biodiesel varía dependiendo de la reserva, el área geográfica, la variabilidad en la producción de cosecha de estación a estación, el precio del petróleo crudo y otros factores. El alto precio del biodiesel es en gran parte debido al alto precio de la materia prima y también de la calidad que se requiera de éste [18].

El biodiesel tiene un peso específico de 0.88 comparado con 0.85 del combustible diésel. Por esta razón es ligeramente más pesado que el combustible diésel, por ello rociar la mezcla de biodiesel en la parte de arriba del combustible diésel es la forma ordinaria en que se realiza el procedimiento de mezclado [7]

El biodiesel no contiene nitrógeno o aromáticos y normalmente posee menos de 15 ppm de azufre. Contiene 11% en peso de oxígeno, que justifica por qué es ligeramente menor su calor de combustión en comparación con el diésel petróleo y es característicamente bajo en monóxido de carbono, partículas, hollín y emisiones de hidrocarburos, como se ilustra en la siguiente **Tabla 2**.

Tabla 2 Estándares de calidad del biodiesel según normas técnicas internacionales y nacionales [7]:

| PROPIEDAD | Principales Normas | | | Unidades |
|--|----------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| | PNTP 321.125:2007 | ASTM D 6751-7 | EN 14214:2002 | |
| Contenido de calcio y magnesio, combinado | 5 máx. | 5 máx. | | Ppm ($\mu\text{g/g}$) |
| Punto de inflamación | 93 mín. | 130.0 mín. | 120.0 mín. | $^{\circ}\text{C}$ |
| Control de alcohol | | | | |
| Agua y sedimento | 0.050 máx. | 0.050 máx. | | % volumen |
| Viscosidad cinemática a 40°C | 1.9 – 6.0 | 1.9 – 6.0 | 5.0 máx. | mm^2/s |
| Ceniza sulfatada | 0.020 máx. | 0.020 máx. | 0.020 máx. | % masa |
| Azufre | 0.0015 máx. | 0.05 máx. | 0.001 máx. | % masa |
| Corrosión a la lámina de cobre | No. 1 | No. 3 máx. | No. 1 | |
| Número de cetano | 47 mín. | 47 mín. | 51 mín. | |
| Punto de nube | Reportar | Reportar | | $^{\circ}\text{C}$ |
| Residuo de carbón | 0.050 máx. | 0.050 máx. | 0.30 máx. | % masa |
| Número de acidez | 0.50 máx. | 0.50 máx. | 0.50 máx. | MgKOH |
| Glicerina libre | 0.020 máx. | 0.020 máx. | 0.020 máx. | % masa |
| Glicerina total | 0.240 máx. | 0.240 máx. | 0.250 máx. | % masa |
| Contenido de fósforo | 0.001 máx. | 0.001 máx. | 0.0001 máx. | % masa |
| Temperatura de destilación, 90% recuperado | 360 máx. | 360 máx. | | $^{\circ}\text{C}$ |
| Contenido de sodio y potasio, combinado | 5 máx. | 5 máx. | 6 máx. | Ppm ($\mu\text{g/g}$) |
| Estabilidad de la oxidación | 3 mín. | 3 mín. | | horas |
| Contenido de éster | | | 96.5 mín. | %(m/m) |

monoglicéridos a glicerol produciendo una molécula de metil éster de cada glicérido por paso [13], [16].

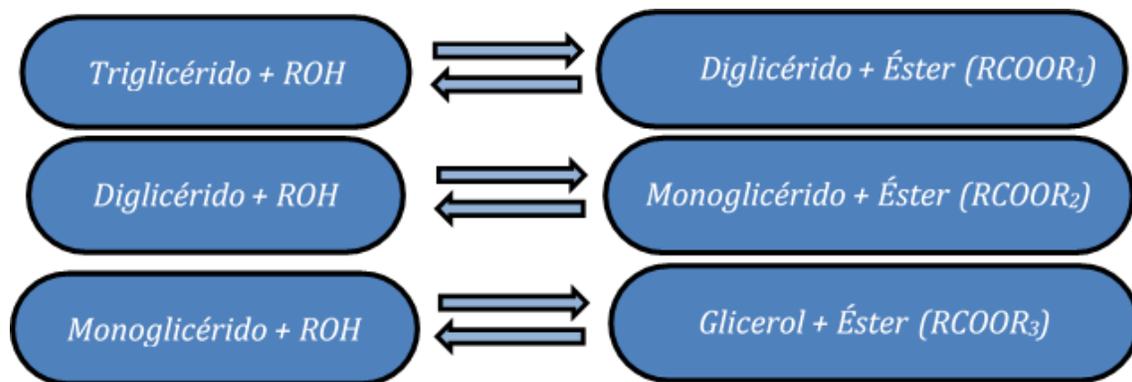


Figura 2 Reacciones reversibles consecutivas [16]

Especialmente el metanol es el alcohol de mayor uso, por ser el de menor costo en comparación con otros alcoholes empleados para este proceso, como el etanol e isopropanol.

4.2.1 Métodos catalíticos de producción de biodiesel

La reacción de transesterificación puede ser catalizada por bases, ácidos o enzimas. Los triglicéridos son compuestos químicos que constan de una molécula de glicerol y tres ácidos grasos. ésteres de cadenas largas, ácidos carboxílicos combinados con glicerol. Los ácidos grasos $\{R-C(=O)-O-H\}$ pueden ser convertidos en metil ésteres $\{R-C(=O)-O-CH_3\}$ por la acción de un agente de transesterificación.

Las bases pueden catalizar la reacción quitando un protón del alcohol, haciéndolo más reactivo, mientras que los ácidos pueden catalizar la reacción, por donación de un protón para el grupo carbonilo, haciéndolo más reactivo [19].

4.2.2 Transesterificación con catalizador ácido

El proceso de transesterificación es catalizado por ácidos Brønsted, preferentemente por ácido sulfónico o sulfúrico. Estos catalizadores dan una muy alta producción de ésteres alquílicos, pero las reacciones son lentas en comparación con catalizadores alcalinos. La

transesterificación catalizada por un ácido es más conveniente para ácidos o grasas que tienen altas cantidades de ácidos grasos libres y humedad. Aksoy reportó que es necesario llevar a cabo la transesterificación bajo una condición ácida cuando el componente del aceite fuese de un material de menor grado como el aceite de oliva. [19].

4.2.3 Transesterificación con catalizador alcalino

En el método de transesterificación con metanol vía alcalina, el catalizador (KOH o NaOH) es disuelto en el medio reaccionante. El aceite es transferido al reactor de biodiesel y después la mezcla catalizador/alcohol. La mezcla se agitada a 60 °C de temperatura y una presión atmosférica. Una reacción de transesterificación exitosa produce dos fases líquidas: éster y glicerina cruda [19].

La glicerina cruda se recolecta en un contenedor después de algunas horas de reposo que permitan la separación de las fases. La separación de la fase puede ser observada en 10 minutos y completarse en 2 horas. Cuando ya se evidencia por completo la separación se adiciona agua para lavar el éster. Proceso que se repite hasta que ya no se observan trazas del alcohol, el aceite y el glicerol.

La reacción es reversible, por lo cual se utiliza exceso de alcohol para desplazar el equilibrio hacia la producción de ésteres. La reacción estequiometría requiere 1 mol de un triglicérido

y 3 moles de alcohol; sin embargo, se usa alcohol en exceso para aumentar la producción de ésteres alquílicos y permitirles separar el glicerol de la fase formada.

4.2.4 Calidad y rendimiento del biodiesel producido

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 [20]. En la **Tabla 3** se evidencian los rangos de las propiedades de biodiesel para cada uno de los estándares anteriormente mencionados.

Tabla 3 Estándar europeo (EN14214) - estándar americano (ASTM D 6751).

| PROPIEDAD | UNIDAD | ESTANDARES DEL BIODIESEL | |
|--|--------------------|--------------------------|----------------|
| | | EN14214 | ASTM D6751 |
| 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 | 1 ^a | 3 ^a |
| Valor de yodo | - | 120,0> | - |
| Éster metil de ácido linolénico | %(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> |

4.3 Simulación

La simulación de procesos industriales es el estudio de un proceso o sus partes mediante manipulación de su representación matemática o de su modelo físico [20]. La simulación parte del análisis de procesos industriales. Las utilidades concretas que proporciona la simulación de procesos son:

- Mejora la competitividad detectando ineficiencias motivadas por la descoordinación entre secciones de una misma planta.
- Estima y realiza análisis de regresión de propiedades físicas.
- Predice el comportamiento de un proceso utilizando principios de la ingeniería.
- Realiza cálculos de balances de materia y energía y equilibrio químico y entre fases.
- Analiza el comportamiento de un sistema y realiza estudios de optimización y sensibilidad.
- Permite cambiar las condiciones de operación y analizar los comportamientos.
- Estima costos.
- Permite generar como salida gráficas o bien tablas de resultados.

El análisis de procesos industriales se refiere a la aplicación de métodos científicos al reconocimiento y definición de problemas, así como al desarrollo de procedimientos para su solución. En una forma más concreta, esto quiere decir:

- Especificación matemática del problema para la situación física dada.
- Análisis detallado para obtener modelos matemáticos.
- Síntesis y presentación de resultados para asegurar la total comprensión del problema.

El proceso representa una serie real de operaciones o tratamiento de materiales, tal como es contrastado por el modelo, que representa una descripción matemática del proceso real [1].

El análisis de procesos industriales comprende un examen global del mismo, de otras alternativas de diseño, así como de sus aspectos económicos. Se hace resaltar el aspecto económico porque al efectuar una selección de distintos esquemas posibles, los costos constituyen un elemento tan importante que nunca se pueden ignorar. Si se ha de realizar una amplia selección, es preciso conocer los costos de cada proyecto para poder realizar la respectiva comparación. De esta forma, se pueden estimar los beneficios de cada una de las alternativas con fines comparativos. La estimación de costos para distintos sistemas resulta vital, no solamente porque el ensayo de un nuevo sistema resulta muy costoso sino porque generalmente son numerosos los sistemas competitivos. Sin embargo, a pesar de la importancia de los factores económicos, tienen relevancia los aspectos fisicoquímicos, ingenieriles y matemáticos [1].

Desde un punto de vista más general, el análisis y simulación de procesos industriales presentan las ventajas que se señalan a continuación.

- **Experimentación económica.** Es posible estudiar procesos existentes de una forma más rápida, económica y completa que en la planta real. La simulación puede aumentar o reducir el tiempo real de una forma análoga a como una cámara cinematográfica acelera o retarda las imágenes; de esta forma se puede observar más fácilmente la operación del sistema [21].
- **Repetición de experimentos.** La simulación permite estudiar el efecto de la modificación de las variables y parámetros con resultados reproducibles. En el modelo matemático se puede introducir o retirar a voluntad un error, lo cual no es posible en la planta real [21].
- **Control de cálculo.** La simulación constituye una importante ayuda material para el estudio de los sistemas de control con lazos abiertos y cerrados
- **Estudio de la estabilidad del sistema.** Se puede examinar la estabilidad de sistemas y subsistemas frente a diferentes perturbaciones.

Por estas razones, se puede concluir que el análisis de procesos constituye un elemento muy importante para tomar una decisión más científica y responsable a nivel industrial.

4.3.1 Procedimiento de simulación

El proceso de simulación de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales se realizó en el software Aspen Plus V.8.8. En este software se presentan dos etapas fundamentales en el diseño: Ingresos de propiedades al simulador y diseño del proceso. En la primera etapa se ingresan todos los componentes que van a ser empleados en el proceso, seguidamente es seleccionado el paquete termodinámico que se acople al proceso a diseñar. Una vez definidos los componentes y el modelo termodinámico se procede a la sección de diseño de procesos (simulación). Seguidamente se procede a definir el diagrama de flujo del proceso, el cual involucra cada uno de los equipos requeridos en el proceso, así como sus respectivas corrientes. Posteriormente en el entorno de simulación se definen y especifican cada una de las corrientes de entrada al proceso. Una vez especificadas las corrientes se procede a ingresar cada uno de los equipos requeridos, a los cuales se les conecta las respectivas corrientes de entrada, intermedias y de salida. Cada equipo debe ser especificado según sus condiciones de operación requeridas para el proceso. En caso de presentarse reacción en alguno de los equipos se procede a definir e ingresar cada una de estas con sus correspondientes parámetros cinéticos. En la **Figura 3** se presenta el procedimiento anteriormente descrito.



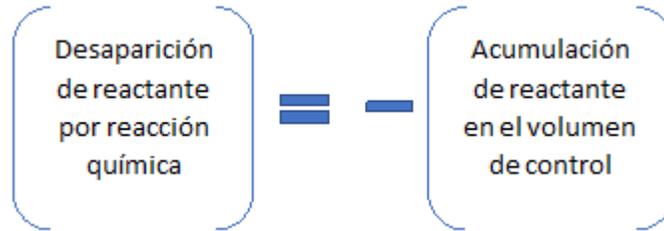
Figura 3 Procedimiento para la simulación en Aspen Plus

4.4 Reactores

Los equipos en los que se efectúan reacciones homogéneas pueden ser de tres tipos generales: discontinuos (batch), continuos de flujo estacionario, y semicontinuos de flujo no estacionario. Los reactores discontinuos son sencillos de operar e industrialmente se utilizan cuando se han de tratar pequeñas cantidades de sustancias. Los reactores continuos son ideales para fines industriales cuando han de tratarse grandes cantidades de sustancia y permiten obtener un buen control de la calidad del producto. Los reactores semicontinuos son sistemas más flexibles, pero de más difícil análisis y operación que los anteriores; en ellos la velocidad de la reacción puede controlarse con una buena estrategia de agregado de los reactantes [6].

4.4.1 Reactor Discontinuo Ideal

En un reactor discontinuo ideal no hay entrada ni salida de reactante. Se supone además que el reactor está perfectamente agitado, esto es, que la composición es la misma en todos los puntos del reactor para un instante de tiempo dado. Como la entrada y la salida son nulas el balance de materia queda [6].



Dado que el reactor está perfectamente agitado, esto es, todos los puntos tienen la misma composición, el volumen de control para realizar el balance es todo el reactor. Evaluando los términos:

$$r_A V = - \frac{dN_A}{dt} \quad \text{Ec. 1}$$

Y teniendo en cuenta que $N_A = N_{A_0}(1 - X_A)$ resulta.

$$r_A V = N_{A_0} \frac{dX_A}{dt} \quad \text{Ec. 2}$$

Integrando se obtiene la ecuación de diseño para el reactor discontinuo:

$$t = N_{A_0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A V} \quad \text{Ec. 3}$$

Si el volumen de reacción permanece constante puede expresarse en función de la concentración de reactivo $C_A = N_A/V$

$$t = C_{A_0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} = - \int_{C_{A_0}}^{C_A} \frac{dC_A}{r_A} \quad \text{Ec. 4}$$

4.4.2 Reactor Continúo Agitado Ideal

El reactor continuo agitado ideal (RCAI) o reactor de mezcla completa supone un flujo de alimentación y salida uniforme y una agitación perfecta, esto es, en todos los puntos del reactor la composición y propiedades físicas del fluido son iguales. Por esta misma razón la corriente de salida tiene la misma composición y propiedades que el fluido que se encuentra en el interior del reactor. La operación del RCAI se realiza en condiciones de estado estacionario, esto es, no hay acumulación dentro del reactor. En esas condiciones desaparece el término de dependencia con la variable tiempo. Lógicamente, en el arranque del reactor o cuando suceden perturbaciones que modifican las condiciones de trabajo, es necesario tener en cuenta ese término y entonces se habla de estado transitorio [6].

Como todos los puntos del reactor tienen igual composición y propiedades el volumen de control para realizar el balance de masa es todo el reactor; en estado estacionario queda entonces.

Entrada = Salida + Desaparición por reacción

$$F_{A_0} = F_A + r_A V = F_{A_0}(1 - X_A) + r_A V \quad \text{Ec. 5}$$

$$F_{A_0} X_A = r_A V \quad \text{Ec. 6}$$

Si se trata de un fluido que no sufre expansión ni compresión $F_A = v C_A$ y puede sustituirse en la expresión anterior. Suele definirse además el parámetro $t = V/v_0$, a veces denominado tiempo espacial (y también tiempo de residencia hidráulico), donde V es el volumen de reacción y v_0 el flujo volumétrico a la entrada, y que en los sistemas que estamos considerando coincide con el tiempo de residencia hidráulico. Por lo tanto, la ecuación de diseño del RCAI puede escribirse como

$$\tau = \frac{V}{v_0} = \frac{V C_{A_0}}{F_{A_0}} = \frac{C_{A_0} - C_A}{r_A} = \frac{C_{A_0} X_A}{r_A} \quad \text{Ec. 7}$$

4.5 Marco legal

- Ley 939 de 2004 se estimula la producción y comercialización de biodiesel de origen vegetal
- La NTC 1438 característica Petróleo y sus derivados (Combustibles para motores diésel).
- la NTC 5708 intervalo de densidad del biodiesel

4.6 Marco Referencial

El montaje del reactor se efectuó en la Universidad de Pamplona, en el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ingenierías y arquitectura, programa de ingeniería química (ver **Ilustración 1**).



Ilustración 1 Ubicación del reactor para la producción de biodiesel dentro de las instalaciones de la Universidad de Pamplona.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

- Diseñar un reactor batch a escala laboratorio para la obtención de biodiesel como combustible de origen orgánico producido a partir de aceites vegetales variando la relación molar aceite/alcohol utilizando KOH como catalizador básico.

5.2 Objetivos Específicos.

- Realizar una revisión del estado del arte a los procesos y sistemas de producción del biodiesel a partir de aceite vegetales con diferentes catalizadores que sirvan como línea base en el proceso.
- Diseñar un reactor batch a escala laboratorio para la producción de biodiesel utilizando aceites vegetales por medio de la variación de la relación molar aceite/alcohol empleando un catalizador homogéneo en medio básico
- Evaluar el rendimiento del reactor batch para producir biodiesel a partir de la simulación en ASPEN PLUS V. 8.8 con el fin de obtener las variables óptimas del proceso
- Proponer un sistema de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales a través de la implementación de un reactor batch a escala laboratorio, utilizando una variación de la relación molar aceite/alcohol.



Capitulo II

Metodología



6 METODOLOGIA.

En este capítulo se especifica el sistema propuesto que va a ser empleado para darle cumplimiento a los objetivos planteados para la elaboración de este trabajo de grado. Además, se establecen los elementos necesarios para el diseño y construcción del reactor batch a escala laboratorio para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales y grasas, complementado con la evaluación del rendimiento de la planta mediante la simulación en Aspen Plus y finalmente se propone un sistema de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales y grasas.

6.1 Revisión Bibliográfica.

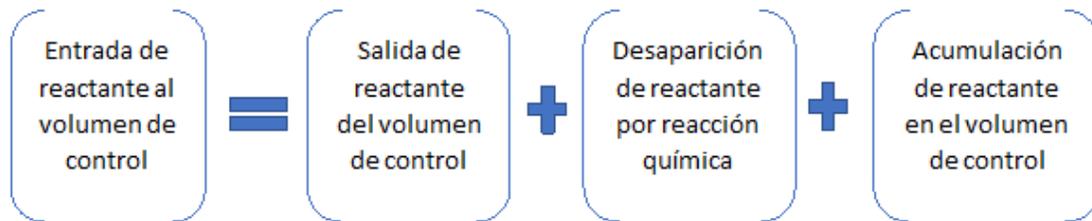
En esta fase del proyecto se contempló la revisión del material bibliográfico, con el cual se profundizo el estado del arte y se determinaron rangos comparativos en lo referente a los resultados de la obtención de biodiesel y los diferentes catalizadores utilizados en este proceso, además se siguieron los lineamientos para la construcción de la planta a escala laboratorio.

Para esto se filtraron artículos relacionados con los temas anteriores que hicieron parte de la temática del proyecto, en bases de datos y plataformas como:

- Scielo
- Dialnet
- Scopus
- Spingerlink
- Scient Direct.

6.2 Diseño del Reactor a Escala Laboratorio.

El punto de partida para el diseño de un reactor es un balance de materia referido a determinado reactante (o producto), que se realiza sobre determinado volumen de control



En las operaciones no isotérmicas debe agregarse también el balance de energía, que está relacionado con el anterior por el término de reacción química, ya que el calor generado o absorbido es proporcional a la extensión de la reacción. No obstante, para el presente trabajo estos aspectos no serán tomados en consideración, asumiéndose que se trabaja en condiciones isotérmicas

6.3 Producción de Biodiesel

Para la obtención de biodiesel se establecieron las condiciones de operación con sus respectivos rangos de trabajo, que se encuentran soportadas por datos reportados en la literatura consultada (ver **Tabla 4**).

En cada ensayo se emplearon 1000 mL de aceite vegetal. La cantidad fue la misma para todas las pruebas. Este volumen está determinado por la capacidad de trabajo del reactor, diseñado a escala laboratorio. El reactor tiene una capacidad de operación de 2000 mL, considerando un rango de operación entre 60 y 80% de la capacidad total del reactor [22].

6.3.1 Diseño de experimentos

Tabla 4 Factor y rango de diseño para aceite vegetal

| Aceite vegetal usado | | |
|--|----------|----------|
| Nombre del Factor | Método 1 | Método 2 |
| Relación molar aceite/alcohol. (metanol) mol/mol | 1:5 | 1:7 |
| Temperatura (°C) | 50 °C | 60 °C |
| Catalizador homogéneo (KOH) | 0,5% | 0,5% |
| Porcentaje con respecto al aceite | | |

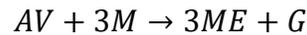
Se planteó una matriz de combinación de tratamientos. En esta se estableció la numeración del ensayo, combinación de los tratamientos y los factores de diseño (Relación molar aceite/alcohol (X), Temperatura (Y), agente de lavado (Z) (ver **Tabla 5** y **Tabla 6**).

Tabla 5 Matriz de combinación de tratamientos con aceite vegetal

| Ensayo | Combinación de tratamientos | Factores | | |
|--------|-----------------------------|----------|----|-----|
| | | X | Y | Z |
| 1 | A | M1 | M1 | CTE |
| 2 | B | M1 | M2 | CTE |
| 3 | C | M2 | M1 | CTE |
| 4 | D | M2 | M2 | CTE |

6.4 Cinética de reacción

La reacción de producción de biodiesel se puede representar por:



Donde AV, M, ME y G representan aceite vegetal, metanol, metil ésteres y glicerol, respectivamente.

La ley de velocidad para este proceso y considerando operación batch se representa por:

$$-r_A = \frac{1}{C_{A_T}} * \frac{dN_A}{dt} = \frac{N_{A_0}}{C_{A_T}} * \frac{dX_A}{dt} \quad \text{Ec. 8}$$

Al ser empleada una relación de 1:6 de TG con respecto al alcohol, es posible considerar que la concentración de esteres metílicos va a ser menor a la concentración de metanol, por lo cual se puede asumir como un proceso irreversible. La ley de velocidad para este caso se representa por:

$$-r_A = kC_A^\alpha C_B^\beta = kC_{AV}^\alpha C_M^\beta \quad \text{Ec. 9}$$

$$kC_{AV}^\alpha C_M^\beta = \frac{N_{AV_0}}{C_{AV_T}} * \frac{dX_{AV}}{dt} \quad \text{Ec. 10}$$

α y β son los órdenes de reacción con respecto a la concentración de aceite vegetal y metanol, respectivamente. Estos ordenes son determinados a partir de las concentraciones iniciales de reactivos:

$$\left(\frac{N_{AV_0}}{C_{AV_T}} * \frac{dX_{AV}}{dt} \right)_0 = kC_{AV}^\alpha C_M^\beta \quad \text{Ec. 11}$$

Aplicando logaritmo natural:

$$\ln\left(\frac{N_{AV_o}}{C_{AV_T}} * \frac{dX_{AV}}{dt}\right)_o = \ln(k) + \alpha \ln(C_{AV_o}) + \beta \ln(C_{M_o}) \quad \text{Ec. 12}$$

Renombrando por simplicidad:

$$\begin{aligned} a_o &= \ln(k) \\ a_1 &= \alpha \\ a_2 &= \beta \\ x_1 &= \ln(C_{AV_o}) \\ x_2 &= \ln(M_o) \\ Y &= \ln\left(\frac{N_{AV_o}}{C_{AV_T}} * \frac{dX_{AV}}{dt}\right)_o = -r_{AV_o} \end{aligned}$$

Reescribiendo:

$$Y = a_o + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad \text{Ec. 13}$$

Aplicando mínimos cuadrados

$$Y_i = a_o + a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} \quad \text{Ec. 14}$$

Desarrollando el método de mínimos cuadrados

$$\sum_{i=1}^n Y_i = N a_o + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{1i} Y_i = a_o \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} \quad \text{Ec. 16}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{2i} Y_i = a_o \sum_{i=1}^n x_{2i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 \quad \text{Ec. 17}$$



6.5 Simulación en ASPEN Plus

UNIFAC es uno de los paquetes de fluidos incorporados en el simulador de procesos ASPEN PLUS, que puede calcular la actividad de cada una de las soluciones y ayudarnos a obtener información sobre el equilibrio líquido.

Por el anterior argumento se decidió escoger para la simulación de obtención de biodiesel, como paquete adecuado UNIFAC.

Para esta simulación se siguieron las normas ASTM D975· estas requieren purificación del biodiesel por encima de 96,5% en peso; es por esto que se utilizó el simulador de procesos buscando obtener un producto con una calidad que permita colocarlo dentro del intervalo de especificaciones establecidas.



Capitulo III

Análisis de Resultados

DQS is member of:



Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se mostrarán y se analizarán los resultados del diseño y construcción de la planta a escala laboratorio para la obtención de biodiesel como combustible de origen orgánico producido a partir de aceites vegetales variando la relación molar aceite/alcohol

7.1 Revisión Bibliográfica

Terminada la etapa de revisión bibliográfica y el análisis detallado del estudio propuesto en esta tesis, se eligieron los mejores métodos de diseño para el reactor batch, que permitan maximizar la producción y calidad del biodiesel. Siendo la obtención de biodiesel un estudio ampliamente investigado, se logró seleccionar datos importantes que permitieron alcanzar un trabajo eficiente.

7.2 Diseño Del Reactor

El diseño del reactor se realizó en dos etapas. En la primera etapa se determinaron la conversión en el reactor su volumen; en la segunda se determinaron las dimensiones y materiales de construcción.

7.2.1 Parámetros de entrada.

Teniendo en cuenta estudios realizados se decide implementar los siguientes parámetros de entrada:

- Relación molar de alcohol / aceite. 6:1 [23].
- Cantidad de catalizador. 5.5 g/ L aceite [24].
- Tiempo de reacción. 75 min [24].

- Peso molecular del aceite 844,74 g/mol [24].
- Peso molecular alcohol metílico 32 g/mol [24]
- Densidad del aceite 860 kg/m³ [24]
- Densidad del alcohol metílico puro 791,7 kg/m³ [24]

7.2.2 Primera etapa de diseño.

7.2.3 Determinación de flujos másicos y volumen del reactor.

Teniendo en cuenta los parámetros de entrada de proceso, se llevó a cabo la determinación de los flujos volumétricos que nos permitieron calcular el volumen total del reactor.

7.2.4 Flujos volumétricos para aceite y alcohol.

Se tomó una base de cálculo de 1,3 kg de aceite, equivalentes a 1,539 moles.

$$1300 \text{ g aceite} \left(\frac{1 \text{ mol aceite}}{844,7 \text{ g aceite}} \right) = 1,539 \text{ moles aceite}$$

Al tener una relación molar de alcohol / aceite de 6:1, se necesitaron 9,234 moles de alcohol.

$$1,539 \text{ moles aceite} * (6) = 9,234 \text{ moles alcohol}$$
$$9,234 \text{ moles} \left(\frac{32 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \right) = 295,488 \text{ g} \cong 0,2955 \text{ kg alcohol}$$

La cantidad másica de alcohol necesario equivale a 0,2955 kg

Conociendo las densidades del aceite y del alcohol metílico puro, siendo estas 860 kg/m³ y 791,7 kg/m³ respectivamente, se determinaron los volúmenes de aceite y alcohol necesarios para la reacción de esterificación

Volumen alcohol:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ec. 18}$$

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{0,2955 \text{ kg}}{791,7 \text{ kg/m}^3} \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) = 3,7324 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) = 0,373 \text{ L}$$

Volumen aceite

$$v = \frac{m}{\rho} = \frac{1,3 \text{ kg aceite}}{860 \text{ kg/m}^3} \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) = 1,511 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) = 1,511 \text{ L}$$

Los volúmenes de aceite y alcohol requeridos son 1,511 L y 0,373 L respectivamente.

7.2.5 Cantidad de catalizador.

Son necesarios 5,5g de catalizador por cada litro de aceite. Para una alimentación de 1,511 L de aceite, se utilizaron 8,3105*10⁻³ kg de catalizador.

$$\begin{aligned} 1,511 \text{ L aceite} * \frac{5,5 \text{ g catalizador}}{1 \text{ L aceite alimentado}} &= 8,3105 \text{ g catalizador} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \\ &= 8,3105 * 10^{-3} \text{ kg} \end{aligned}$$

7.2.6 Volumen del reactor.

Asumiendo una carga inicial de 1,5 L de aceite, tomando las relaciones anteriores se determinó que el alcohol necesario es 0,370L. Estos volúmenes equivalen a 1,29 kg de aceite, 0,293 kg de alcohol y $8,25 \cdot 10^{-3}$ kg de catalizador. Esta sumatoria nos da una masa de 1,59125 kg al reactor.

Es decir:

$$81,068 \% \text{ de aceite} + 18,4131 \% \text{ de alcohol} + 0,5185\% \text{ catalizador} = 100\%$$

Se ponderaron las densidades y se despreció la cantidad de catalizador.

$$(860 \cdot 0,81068) + (791,7 \cdot 0,184131) = 842,96 \text{ kg/m}^3$$

Lo que nos arrojó el valor ponderado de la masa reaccionante.

Para determinar el volumen del reactor, se aplicó la conocida formula que dice que, en un flujo estable, el volumen es igual al flujo volumétrico multiplicado por el tiempo [24].

$$V = T * Q \quad \text{Ec. 19}$$

Donde V es el volumen, T es el tiempo y Q es el flujo volumétrico.

Ahora

$$Q = \frac{m}{\rho} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde m es el flujo másico y ρ la densidad ponderada.

Reemplazando los valores se obtuvo el volumen de la masa reaccionante que en este caso es de 2,36 L. El volumen total del reactor será asumido de 2,7 L considerando un sobrediseño del 14.4% [25]–[29].

7.2.7 Dimensionamiento y selección del material.

Obteniendo el volumen final del reactor, se determinaron las dimensiones y el material de construcción para que este pueda ser ubicado en el laboratorio de ingeniería química de la Universidad de Pamplona.

El material que se escogió fue el acero inoxidable AISI 304 por sus grandes características anticorrosivas.

Con el volumen total de 2,7L se pasó a determinar el diámetro interno del reactor tomando una lámina de 0,575m de longitud aproximadamente.

$$L = \pi * D \quad \text{Ec. 11}$$

Obtenemos $D = 0,121\text{m}$

Con este diámetro interior se determinó la altura utilizando la siguiente formula

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H \quad \text{Ec. 12}$$

Y se obtuvo una altura de aproximadamente 0,235m



Terminada la etapa de diseño se obtuvieron los planos como se ilustra en **la Figura 4** y **Figura 5**. En la **Ilustración 2** se presenta el diagrama 3D para el reactor batch. En la **Ilustración 3** se puede apreciar el montaje final del reactor ya ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de Pamplona. El diagrama P&ID es presentado en la **Figura 6**.

DQS is member of:



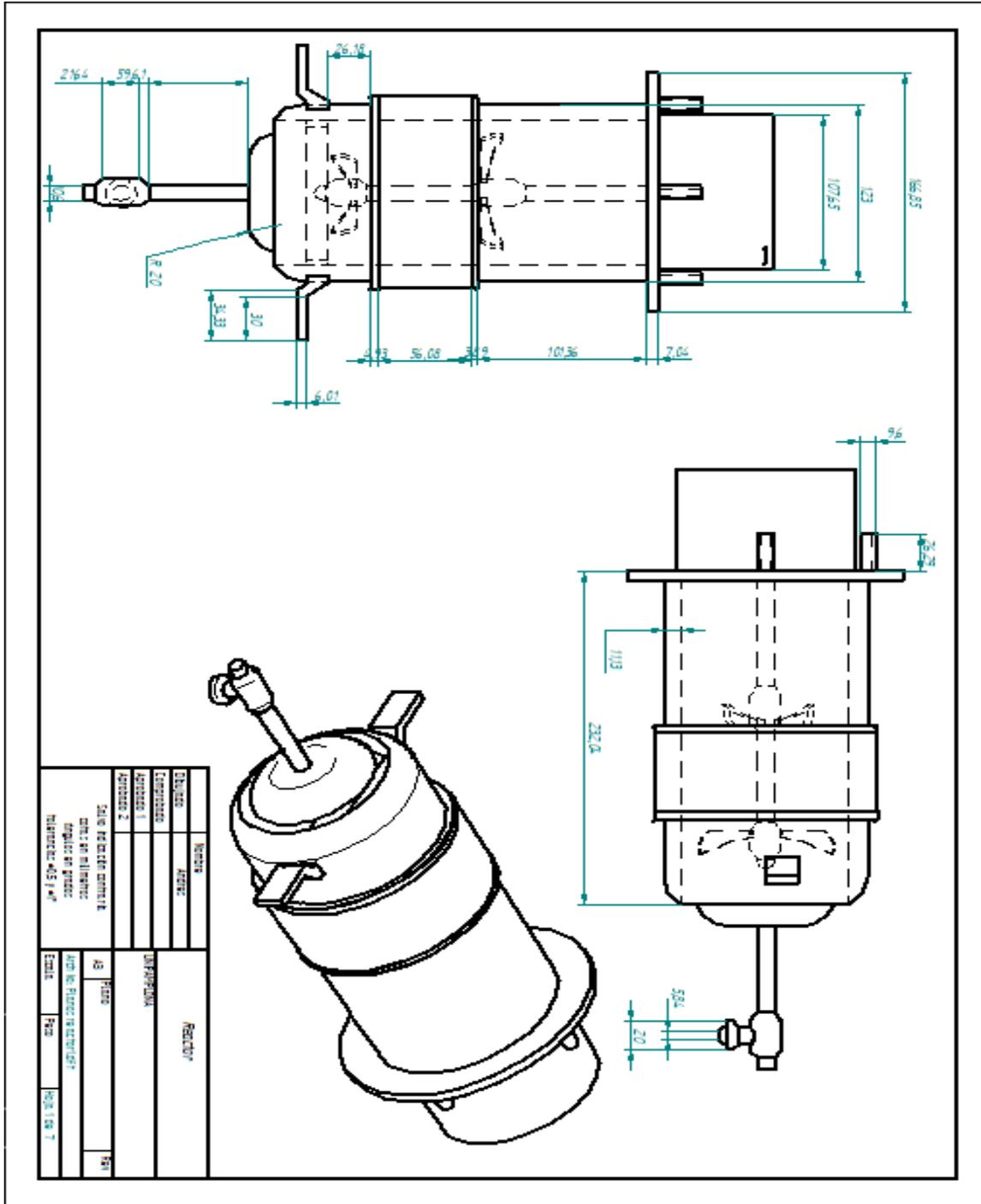


Figura 4 planos del reactor (fuente: autor).

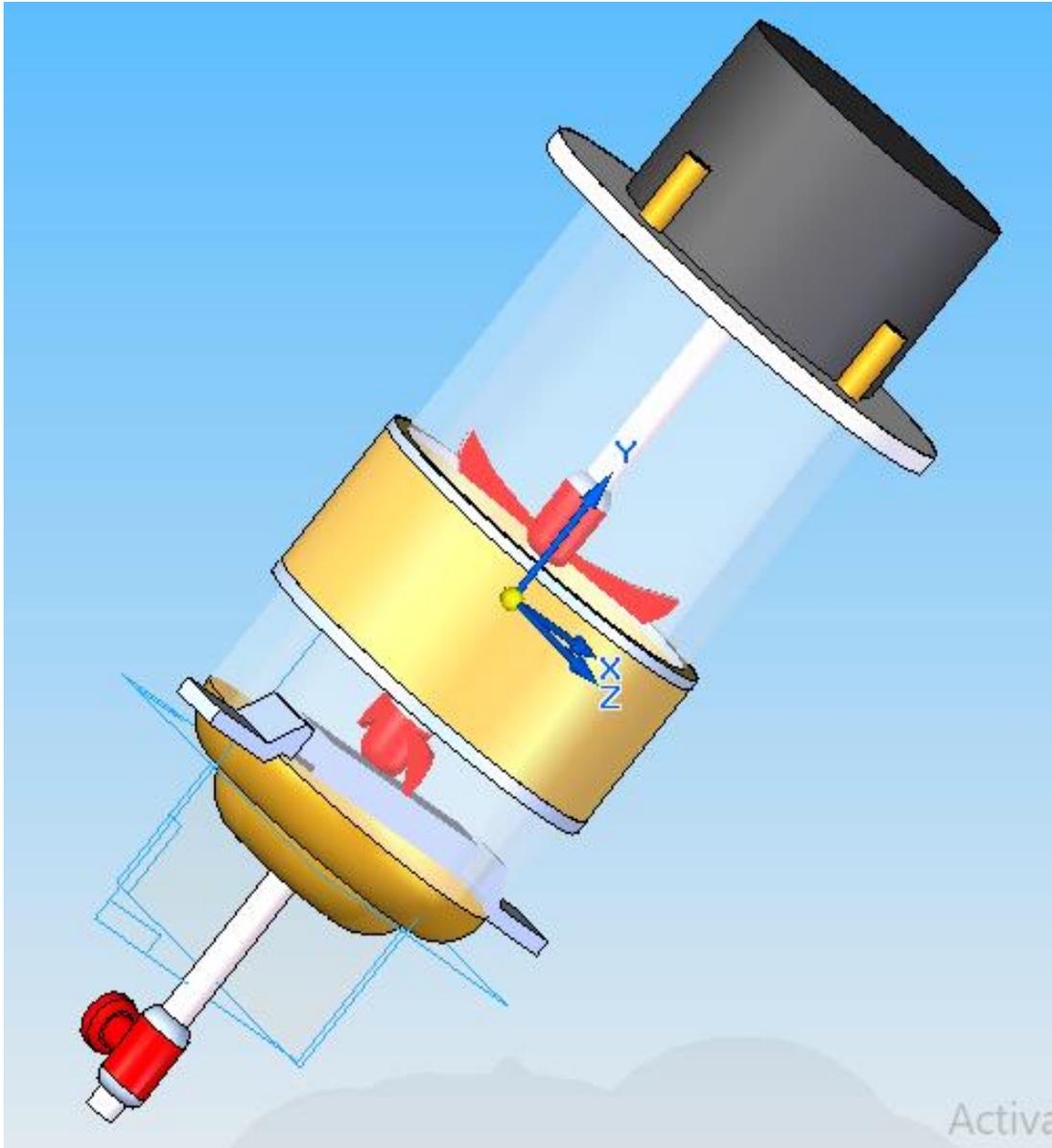


Ilustración 2 plano del reactor en 3D (fuente: autor)



Ilustración 3 Montaje final del reactor

P&ID

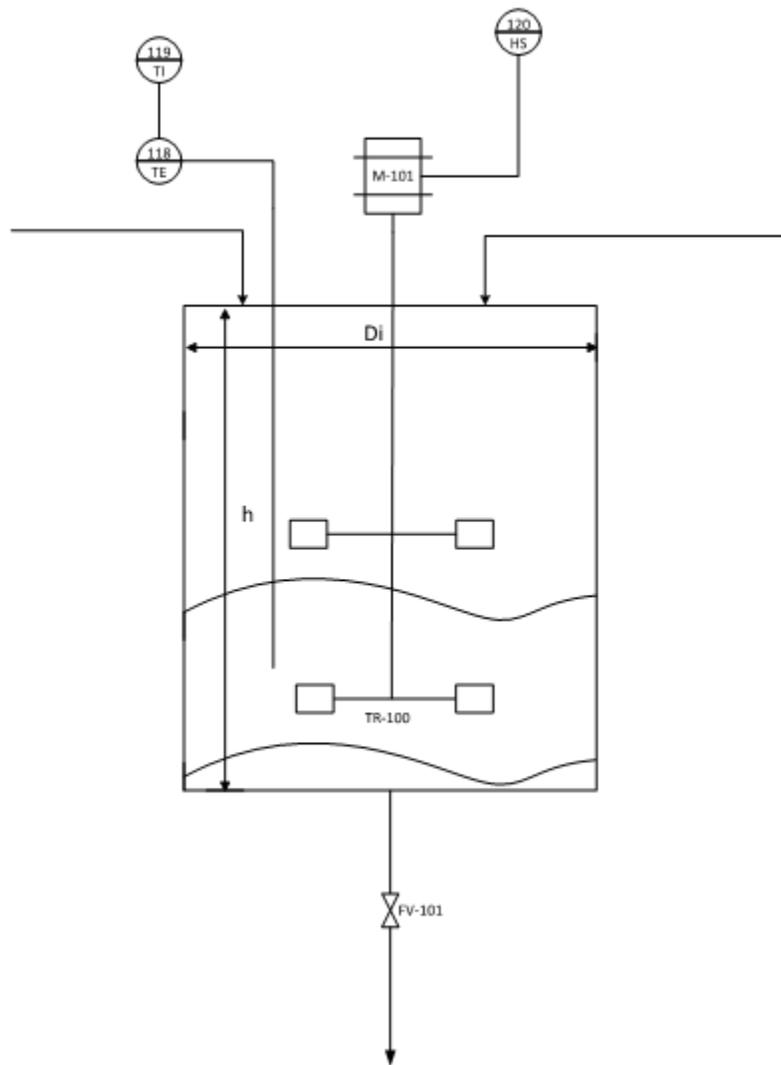


Figura 6 P&ID del reactor (fuente: autor)

En la **Tabla 8** se presenta la lista de los instrumentos del reactores batch de acuerdo al diagrama P&ID (ver **Figura 6**). La **Tabla 9** presenta la descripción de la válvula empleado en el proceso. El dimensionamiento del reactor (volumen, altura y diámetro) son presentados en **Tabla 10**.

Tabla 8 Lista de instrumentos del reactor batch

| LISTA DE INSTRUMENTOS | | | | |
|-----------------------|--------------------------|---|-----------|---------------|
| DESCRIPTOR | COMPONENTE | DESCRIPCION | TIPO | ESTADO NORMAL |
| 118 TE | Sensor | Mide temperatura | Eléctrico | Automático |
| 119 TI | Indicador de temperatura | Panel fijo que muestra valores de temperatura de la mezcla dentro del reactor | Eléctrico | Automático |
| 120 HS | Switch | Switch manual -start-stop-end | Eléctrico | Apagado |

Tabla 9 Válvulas

| LISTA DE VALVULAS | | | | |
|-------------------|------------|-------------|--------|---------------|
| DESCRIPTOR | COMPONENTE | DESCRIPCION | TIPO | ESTADO NORMAL |
| FV-101 | válvula | Manual | Manual | Nc |

Tabla 10 Dimensionamiento del reactor batch (Fuente: propia)

| COMPONENTE | Volumen(L) | h(m) | Di(m) | Capacidad en operación (L) |
|---------------|------------|-------|-------|----------------------------|
| Reactor batch | 2.7 | 0.235 | 0.12 | 1.89 |

7.3 Materiales y costos

Finalmente se presentan en la **Tabla 11**. Los costos relacionados con la construcción del reactor batch

Tabla 11 Costos asociados a la construcción del reactor

| MATERIAL | CANTIDAD | PRECIO | TOTAL |
|---|-----------------|---------------|--------------|
| CONTROL DE TEMPERATURA ON-OFF | 1 | 270.000 | 270.000 |
| TERMOCUPLA | 1 | 80.000 | 80.000 |
| EXTRUCTURA DEL MONTAJE | 1 | 190.000 | 190.000 |
| CONTROL DE AGITACION | 1 | 180.000 | 180.000 |
| CHAQUETA DE CALENTAMIENTO | 1 | 90.000 | 90.000 |
| LAMINA DE ACERO Y ARMADO DEL REACTOR | 1 | 80.000 | 820.000 |
| VALVULA DE SALIDA | 1 | 820.000 | 56.000 |
| ARMADO DE ELICES | 1 | 56.000 | 48.000 |
| MOTOR DE AGITACION | 1 | 48.000 | 90.000 |

7.4 Sistema de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales

Se analizó la densidad del aceite a utilizar en el proceso por medio del método del picnómetro. En la **Tabla 12** son presentados los datos obtenidos de este análisis.

Tabla 12 Datos para densidad de aceite vegetal

| Pesado | Medición |
|----------------------------------|-----------|
| Picnómetro vacío | 11,1986 g |
| Picnómetro con el aceite vegetal | 20,6293 g |
| Peso del aceite | 9,43 g |

Fuente: El Autor

Se realizaron los cálculos de la diferencia entre el picnómetro lleno y el picnómetro vacío; el valor obtenido será la masa del aceite vegetal.

Para los diferentes ensayos se empleó un volumen de 10 ml. Seguido se determinó la densidad de los aceites (ρ) con la Ec. 8

Aceite vegetal:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{9,43 \text{ g}}{10 \text{ ml}} = 0,943 \text{ g/ml} = 943 \text{ Kg/m}^3$$

La densidad aceite vegetal es de 943 kg/m³.

7.4.1 Cálculo de las cantidades de los reactivos.

Con los datos ya obtenidos se pudo proceder con el cálculo de las cantidades de los reactivos (catalizador, alcohol), requeridos para la transesterificación.

El primer reactivo utilizado fue el metanol, con el que se emplearon dos relaciones molares 1:5 y 1:7 aceite/alcohol, de acuerdo al diseño experimental planteado (ver **Tabla 6**)

Equivalencia volumétrica de una Mol de aceite.

$$\rho_{aceite} = \frac{M_{tg}}{V_{aceite}} = V_{aceite} = \frac{M_{tg}}{\rho_{aceite}}$$

$$V_{aceite} = \frac{M_{tg}}{\rho_{aceite}} = \frac{871,7 \text{ g}}{0,943 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = \mathbf{924.39 \text{ mL}}$$

Equivalencia volumétrica de una mol de metanol

$$\rho_{metanol} = \frac{M_{metanol}}{V_{metanol}} = V_{metanol} = \frac{M_{metanol}}{\rho_{metanol}}$$

$$\text{Donde; } M_{metanol} = 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}; \rho_{metanol} = 791,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ ó } 0,7917 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

$$V_{metanol} = \frac{32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0,7917 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = \mathbf{40,4193 \text{ ml}}$$

El anterior procedimiento se desarrolló para la relación molar 1:5; el mismo procedimiento se efectuó para la relación molar 1:7, por lo cual solo se entregan los valores finales.

Con la relación estequiometria se determinó la cantidad de metanol para 1000 mL de aceite vegetal.

$$\text{mL metanol} = V_{\text{aceite definido}} * \frac{1 \text{ mol de aceite}}{V_{\text{aceite}}} * \frac{5 \text{ mol de metanol}}{1 \text{ mol de aceite}} * \frac{V_{\text{metanol}}}{1 \text{ mol de metanol}}$$

$$1000 \text{ mL} * \frac{1 \text{ mol de aceite}}{924.39 \text{ mL}} * \frac{5 \text{ mol de metanol}}{1 \text{ mol de aceite}} * \frac{40,4193 \text{ mL metanol}}{1 \text{ mol de metanol}} = 218.62 \text{ mL metanol}$$

La estequiometria estableció que para un volumen de 1000 mL de aceite y una relación molar de 1 mol de aceite y 5 moles de metanol se hizo necesario un volumen de 218.62 mL de metanol para la obtención de una reacción completa.

Para la segunda relación molar (1:7), se hizo necesario un volumen de 306.08 mL para la obtención de una reacción completa de transesterificación.

El segundo reactivo que se trabajo fue el KOH que se utilizó como catalizador de la reacción de transesterificación. La cantidad de catalizador es proporcional al 0,5% de la alimentación de aceite (ver **Tabla 4** diseños de experimentos).

Para calcular el 0,5 % p/p del KOH necesario para la reacción se utilizó la ecuación presentada a continuación.

$$m \text{ KOH} = m \text{ aceite} \times \text{porcentaje de catalizador}$$

Donde

$$m \text{ aceite} = V \text{ aceite} * \rho \text{ aceite}$$

$$m \text{ aceite} = 1000 \text{ ml} * 0,924 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 924 \text{ g}$$

Reemplazando.

$$m \text{ KOH} = 924 \text{ g} \times 0,5\% = \mathbf{4,62 \text{ g}}$$

Son necesarios **4,62 gramos** de catalizador por cada litro de aceite vegetal.

8 PARTE EXPERIMENTAL.

La cantidad de reactivos empleados son presentados en la **Tabla 13**.

Tabla 13 Cantidad de Reactivos para el proceso de producción de biodiesel a nivel laboratorio

| Reactivos | Cantidad | |
|-------------------|-----------|-----------|
| Aceite vegetal | 1000 ml | |
| CH ₄ O | 1:5 | 1:7 |
| | 218.62 mL | 306.08 mL |
| KOH | 0.5% | 0.5% |
| | 4,62 | 4,62 |

8.1 Montaje experimental de la producción de biodiesel en el laboratorio

El montaje experimental para la fabricación del biodiesel se efectuó en el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ingeniería química de la Universidad de Pamplona, donde se desarrollaron las siguientes etapas:

Primero se filtró el aceite vegetal. Seguido se realizó la mezcla del alcohol/catalizador básico (KOH) y se inició la reacción de transesterificación. Al finalizar la transesterificación, se separaron la fase esterificada y el exceso de alcohol. Se efectuó la separación del biodiesel y glicerol, finalmente se realizó el lavado. En la **Figura 7** se observa un diagrama del proceso general donde se resumen los pasos mencionados anteriormente para la obtención del biodiesel en el laboratorio.

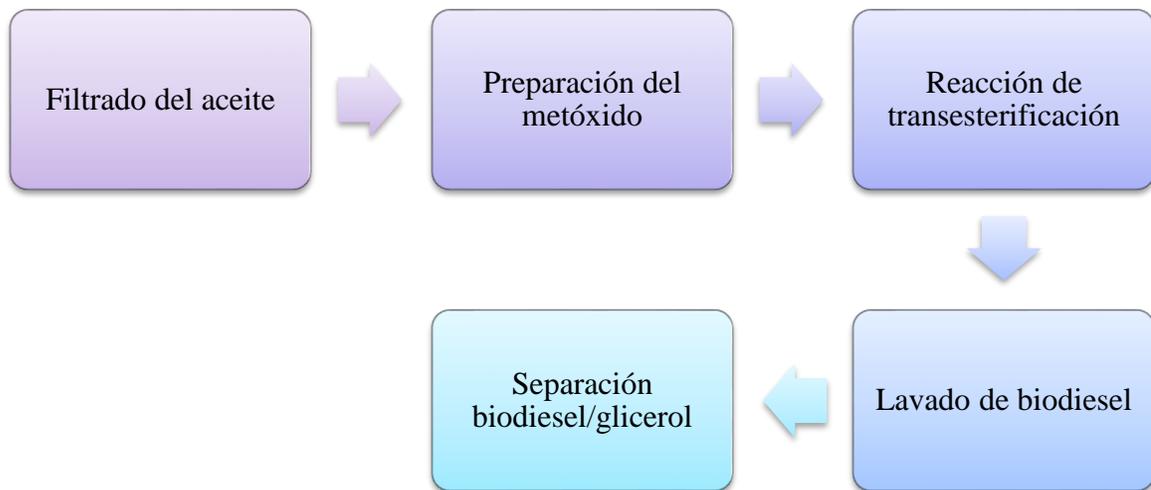


Figura 7 Diagrama de proceso general.

8.1.1 Filtración.

Se realizó la filtración del aceite vegetal. Para este proceso se empleó una bomba de vacío con el propósito de acelerar la filtración, la succión se realiza del lado del Erlenmeyer con el fin de forzar el paso de la solución por medio del papel filtro. En la **Figura 8** se puede apreciar el esquema del montaje efectuado para realizar el proceso de filtrado.

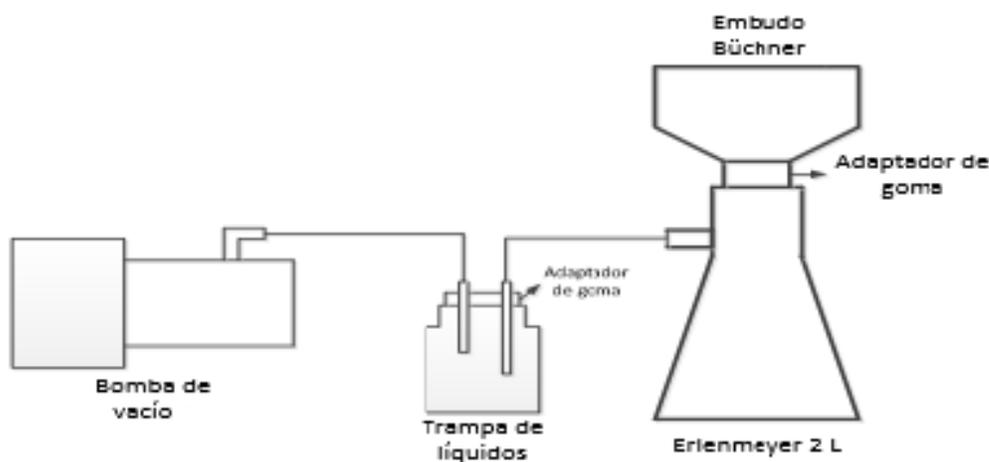


Figura 8 Montaje de filtrado.

8.1.2 Preparación del metóxido.

Se midió el volumen establecido para el metanol y los gramos necesarios de KOH, luego se adiciono poco a poco el catalizador al alcohol hasta completar la medida establecida. La disolución del catalizador sobre el alcohol debe ser con una constante agitación, teniendo en cuenta que en este proceso debe disolverse completamente el KOH.

8.1.3 Reacción de transesterificación

Para la reacción se empleó un reactor batch de capacidad de 2000 mL, el cual cuenta con agitación, una chaqueta de calentamiento y un controlador de temperatura. En la **Ilustración 4** se puede observar el montaje efectuado en esta etapa.

El proceso inició con la carga del aceite al reactor, activando el control de temperatura y calibrando la agitación a 200 rpm. Una vez el aceite alcanza una temperatura estable de 60°C, se agregó el metóxido previamente preparado. El tiempo de residencia en el reactor fue de 180 min.



Ilustración 4 Reactor construido (fuente: autor).

8.1.4 Separación.

Para esta fase se empleó un embudo de separación de 1000 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 2 h para obtener con seguridad una buena separación entre las fases generadas. En la **Ilustración 5** se muestra la separación de las fases.

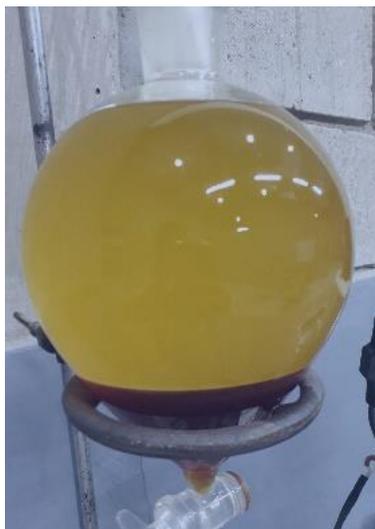


Ilustración 5 Separación de las fases (fuente: autor).

8.1.5 Lavado de biodiesel

Después de realizar la separación de las fases, el biodiesel se lavó para purificarlo y alcanzar la mayor concentración de metil ésteres. El lavado tuvo la función de eliminar trazas de glicerol, catalizador, alcohol, jabones o gomas que no reaccionaron, este proceso se efectuó hasta lograr neutralizar.

El lavado se realizó con agua a 40 °C, el volumen que se empleó de agua es la tercera parte del volumen de biodiesel obtenido. El volumen de agua empleado se dividió efectuando tres lavados.

El agua se vertió lentamente en el biodiesel para tener un contacto homogéneo con todo el biocombustible y así poder arrastrar al fondo del balón las trazas de las impurezas, posteriormente se dejó separar las fases (ver **Ilustración 6**). Por lo cual no se logró establecer un tiempo; este proceso se repitió tres veces.



Ilustración 6 Lavados 1, 2, 3 del biodiesel (fuente: autor).

8.1.6 Secado

Finalmente, el biodiesel se sometió a una temperatura de 120°C y una agitación constante con el fin de eliminar residuos de agua y obtener este en óptimas condiciones ver en la **Ilustración 7**.



Ilustración 7 Secado del biodiesel (fuente: autor).

8.2 Calidad y rendimiento del biodiesel producido.

8.2.1 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 [21].

En cuanto a la apariencia de biodiesel el promedio de las muestras tienen un color dorado solo 1 muestra un color marrón claro (1), con respecto a no tener sólidos y geles en el producto. 2 muestras presentan físicamente y visualmente estas características (muestras 3,4); la restante (2) presenta geles y sólidos en la fase líquida de las muestras.

Concluyendo el análisis de la apariencia del biodiesel, se pudo observar que la baja temperatura interviene en la estabilidad del producto.

8.2.2 Densidad del biodiesel

Para la determinación de la densidad se utilizó un picnómetro de 10 ml el cual se pesó seco y luego con el biodiesel; arrojando resultados que se muestran en la **Tabla 14**.

Tabla 14 Densidades de los ésteres metílicos obtenidos.

| Ensayo | Combinación de tratamientos | Densidad (g/mL) |
|--------|-----------------------------|-----------------|
| 1 | A | 0,850 |
| 2 | B | 0,94 |
| 3 | C | 0,872 |
| 4 | D | 0,865 |

En conclusión, para la determinación de la densidad se tomaron muestras diferentes de cada uno de los 4 ensayos de ésteres metílicos obtenidos en pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería química de la Universidad de Pamplona, seguidamente se determinó la densidad de cada muestra. Para establecer 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 2 muestras (1, 2), no cumplen con esta especificación ya que sobrepasan el rango permitido; los valores obtenidos de las 2 muestras (3, 4), 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.

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% [19].

Estudiando los resultados de las 4 muestras, se pudo evidenciar que ninguna cumple con el porcentaje máximo permitido, solo la muestra 4 se aproxima al límite máximo permitido. Una causa posible es que haya quedado residuos de catalizador; teniendo en cuenta lo anterior se pudo afirmar que el poder calorífico del combustible obtenido no es muy aceptable.

8.2.4 Punto de nube

El punto de nube se define como la temperatura a la cual se hacen visibles los cristales que se forman en el seno del líquido cuando una muestra de combustible se enfría gradualmente [19].

Se utilizó un equipo básico que estaba conformado por un baño de enfriamiento, un recipiente de vidrio que contiene la muestra y termómetros adecuados.

Se tomaron muestras diferentes de cada uno de los 4 ensayos de ésteres etílicos obtenidos, las cuales fueron sometidas a disminución de temperatura hasta que se pudo visibilizar la cristalización en el seno de la muestra líquida.

Las temperaturas obtenidas para el punto de nube se ven reflejadas en la **Tabla 16**

Tabla 16 temperatura del punto de nube obtenido en el laboratorio

| Ensayo | Punto de nube (°C) | Punto de nube teórico |
|--------|--------------------|---|
| 1 | 7 | Solo se reportan datos para biodiesel de palma – lavado con agua. (17 ± 1 °C) [24] |
| 2 | 6 | |
| 3 | 9 | |
| 4 | 15 | |

Analizando los resultados de las 4 muestras, se pudo percibir que ningún cumple con la temperatura estimada del punto de nube. Sin embargo, la muestra 4 refleja un valor aproximado a lo estipulado por la literatura. Una causa posible es que haya quedado residuos de agua en la muestra disminuyendo así el punto de nube. Teniendo en cuenta lo anterior se pudo afirmar que el punto de nube obtenido no es muy aceptable.

8.2.5 Rendimiento del biodiesel producido

Este análisis está sujeto a las condiciones que se plantearon en la Matriz de combinación de tratamientos para la producción de biodiesel en el laboratorio con Aceite vegetal (ver **Tabla 6**).

Partiendo de las condiciones de entrada en los cuatro ensayos se vio reflejado un importante rendimiento en las muestras de biodiesel obtenido, superando todas las muestras el 78% de productividad como se muestra en la siguiente **Tabla 17**.

Tabla 17 Porcentaje de rendimiento

| Ensayo | Combinación de tratamientos | Factores | | | |
|--------|-----------------------------|----------|------|--------------|---------------|
| | | X | Y | Z | % rendimiento |
| 1 | A | 1:5 | 50°C | Agua 40°C | 78,5 |
| 2 | B | 1:7 | 50°C | Agua 40°C | 81,3 |
| 3 | C | 1:5 | 60°C | Agua 40°C | 79,1 |
| 4 | D | 1:7 | 60°C | Agua 40°C | 85 |

Fuente: autor

Analizando la tabla se puede evidenciar que la relación molar aceite/alcohol es un importante parámetro para que se lleve a cabo la transesterificación.

Teniendo clara la metodología ideal para la obtención de biodiesel, se implementó la siguiente guía de laboratorio con las condiciones que mejor rendimiento le proporcionan a este.

8.2.6 Parámetros cinéticos

Resolviendo las sumatorias presentadas en la **sección 6.4** se obtiene:

$$Y_i = 2a_0 + x_{1i}a_1 + x_{2i}a_2 \quad \text{Ec. 24}$$

$$x_{1i}Y_i = x_{1i}a_o + x_{1i}^2 + x_{1i}x_{2i}a_2 \quad Ec. 25$$

$$x_{2i}Y_i = x_{2i}a_o + x_{1i}x_{2i}a_1 + x_{2i}^2a_2 \quad Ec. 26$$

El sistema matricial se resuelve mediante el cálculo de la inversa de la matriz y posteriormente esta matriz resultante es multiplicada por el vector de coeficientes. Los resultados son presentados en la **Tabla 19**. El cálculo de la energía de activación se realizó mediante el análisis del gráfico de Ln (k) contra 1/T correspondiente. Donde k_o representa el factor pre-exponencial de la ecuación Arrhenius, Ea la Energía de Activación de la reacción de transesterificación, α y β son los órdenes de reacción con respecto a la concentración de ácidos grasos y metanol, respectivamente, según la Ecuación 9.

Tabla 18 Parámetros cinéticos

| <i>Parámetros</i> | <i>Valor</i> | <i>Unidad</i> |
|-------------------|--------------|---------------|
| k_o | 0.9954 | L/mol/min |
| Ea | 0.6036 | J/mol |
| α | -0.0054 | - |
| β | 0.0050 | - |

8.3 Simulación de producción de biodiesel

En la **Figura 9** se muestran las etapas del proceso para la producción de biodiesel

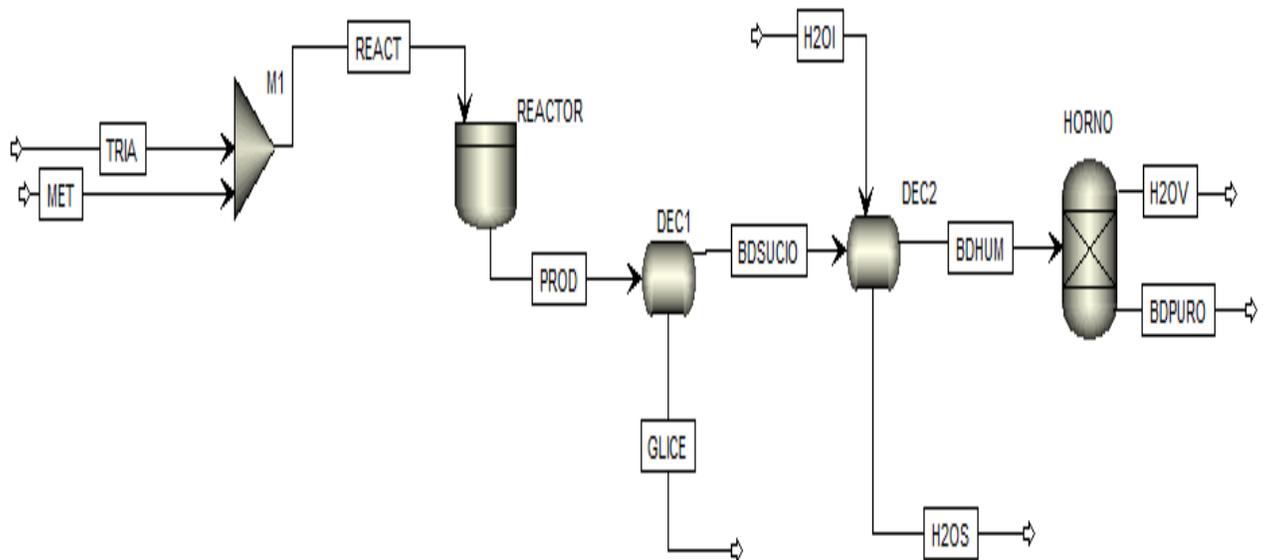


Figura 9 Simulación (fuente: autor).

8.3.1 Descripción del proceso

El proceso comienza con la alimentación de aceite (la composición del aceite es presentada en la **Tabla 7**) y metóxido, los cuales se combinan en el mezclador M-1. La mezcla se alimenta al reactor, el cual opera a una presión la atmosférica y una temperatura de 60°C.

La corriente de salida del reactor (PROD) es una mezcla de biodiesel, glicerol, metanol y los glicéridos que no se convirtieron.

Ya en el decantador (DEC1) el glicerol, metanol, los glicéridos no reactivos y el catalizador salen por la parte inferior de este, mientras que el biodiesel sucio es enviado a un segundo decantador (DEC2) donde se efectúan lavados con agua a 40 °C con el fin de eliminar impurezas presentes y obtener una mejor calidad de biodiesel.

Teniendo el biodiesel libre de impurezas es enviado a un horno que opera a 110 °C donde se elimina cualquier traza de agua presente en este, obteniendo así un biodiesel puro

8.3.2 Etapa de Mezclado

En ésta etapa el metanol y aceite vegetal se alimentan en una relación molar 7:1 respectivamente. Es decir que por cada mol de aceite reaccionan 7 moles de metanol. La **Figura 10** y **Tabla 19** presentan el equipo de mezclado y las condiciones de operación de este.

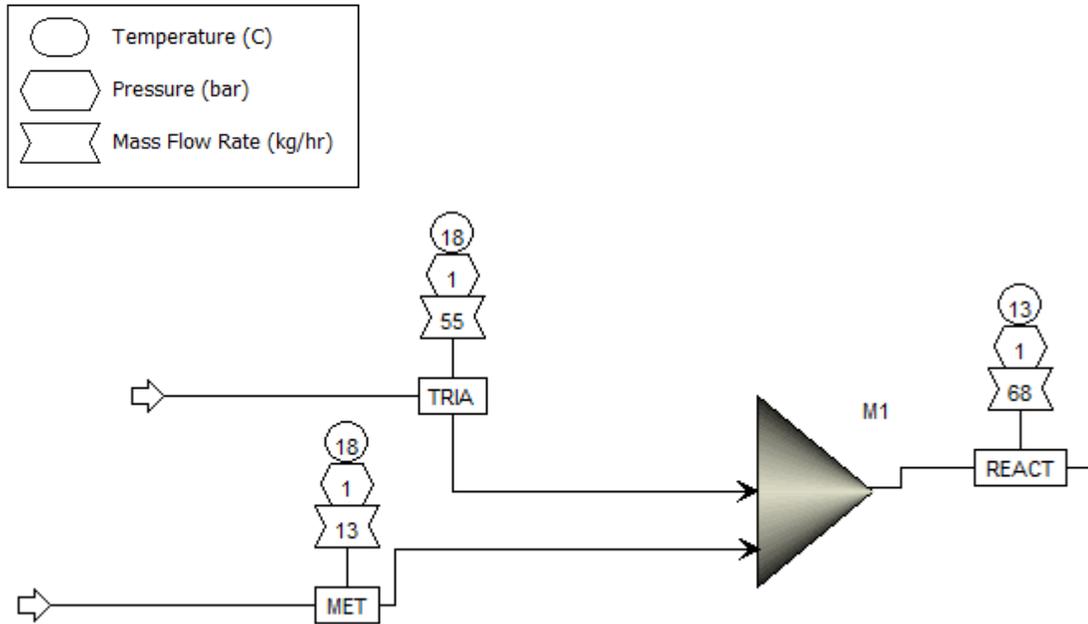


Figura 10 Etapa de Mezclado (fuente: autor)

Tabla 19 Tabla datos de alimentación

| | Corriente 1 | Corriente 2 |
|---------------------|-------------|-------------|
| Compuesto | aceite | metóxido |
| Presión | 1 atmósfera | 1 atmósfera |
| temperatura | 18 °C | 18 °C |
| Flujo másico | 55 kg/hr | 13 kg/hr |

8.3.3 Etapa de Reacción

La etapa de reacción está constituida por un reactor batch como se muestra en la **Figura 11**. La **Tabla 20** presenta las condiciones de operación del reactor.

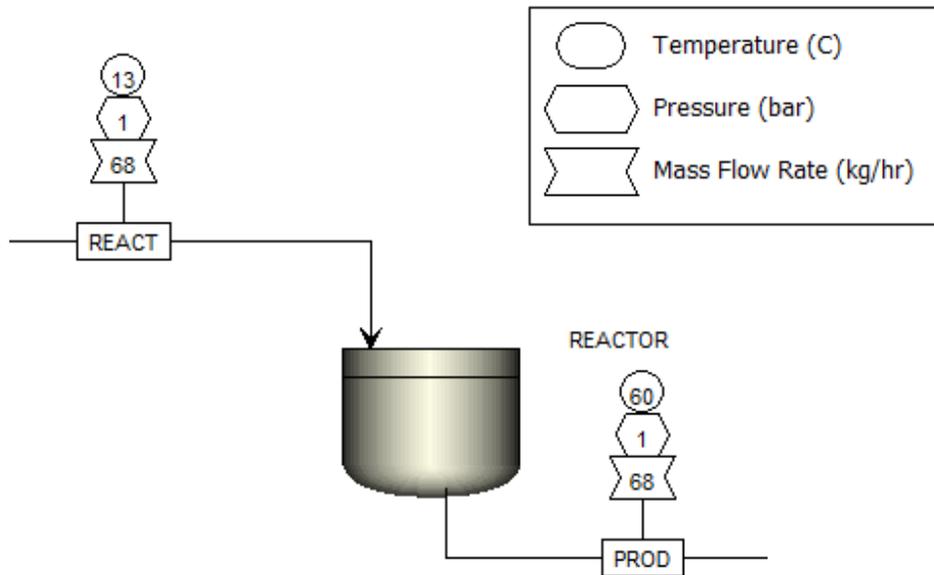


Figura 11 Etapa de Reacción (fuente: autor).

Tabla 20 Tabla de datos de reacción

| equipo | reactor |
|-------------|-------------|
| temperatura | 60 °C |
| presión | 1 atmósfera |
| Tiempo | 3 horas |

8.3.4 Etapa de Separación

En esta etapa el biodiesel es separado del glicerol metanol, los glicéridos no reactivos utilizando un decantador como se evidencia en la **Figura 12**. Las condiciones de operación de este equipo son presentadas en la **Tabla 21**.

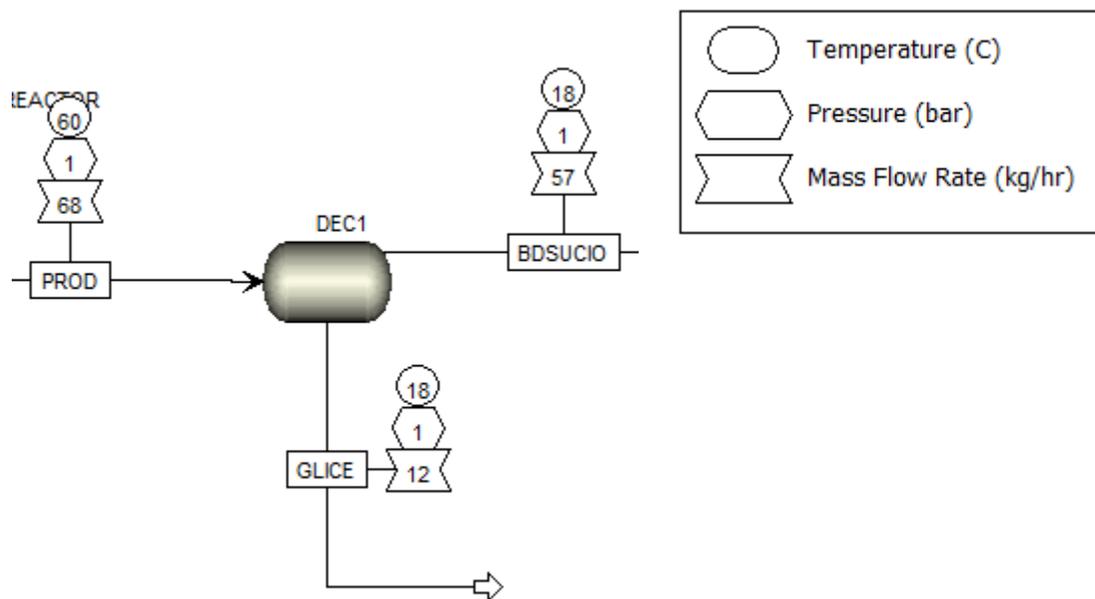


Figura 12 Etapa de Separación (fuente: autor).

Tabla 21 Tabla de datos del decantador

| equipo | Decantador 1 |
|-------------|--------------|
| temperatura | 18 °C |
| presión | 1 atmósfera |

8.3.5 Etapa de lavado

En esta etapa se efectúan lavados con agua a 40 °C con el fin de eliminar impurezas presentes y obtener una mejor calidad de biodiesel (ver **Figura 13**).

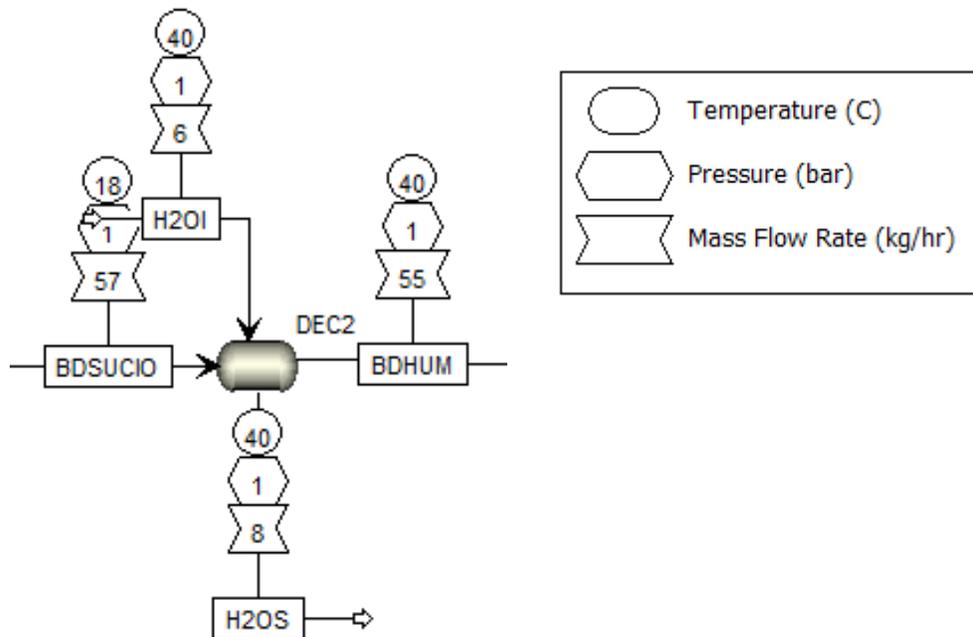


Figura 13 Etapa de lavado (fuente: autor).

8.3.6 Etapa de secado

En esta etapa el biodiesel precedente del lavado ingresa a un horno que opera a 110 °C donde se elimina cualquier traza de agua presente en este, obteniendo así un biodiesel puro (ver **Figura 14**)

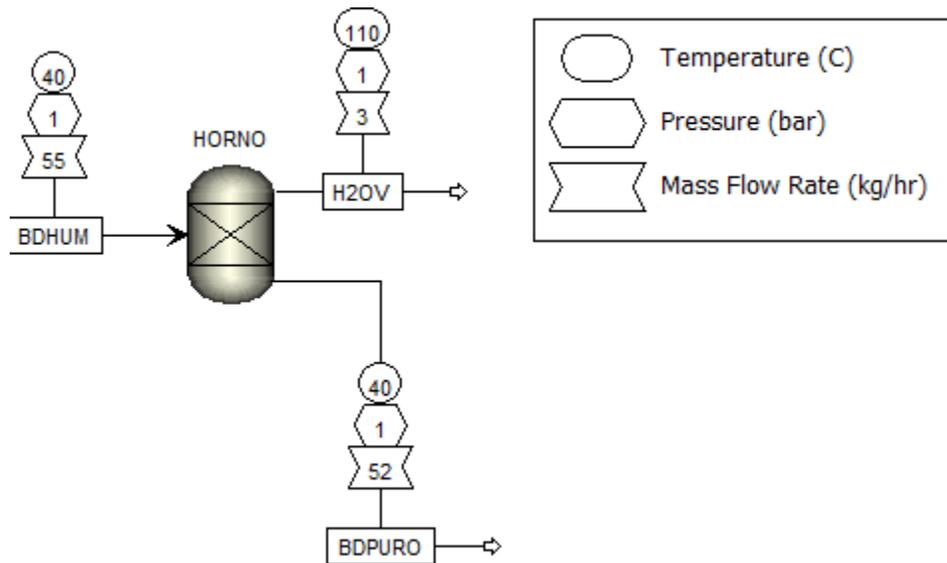


Figura 14 Etapa de secado (fuente: autor).



Capitulo IV

Estudio De

Mercado

DQS is member of:



*Formando líderes para la construcción de un
nuevo país en paz*

9 ESTUDIO DE MERCADO

En toda investigación que arroje como resultado la formulación y elaboración de un nuevo producto, es importante la aplicación de técnicas de recolección de la información como entrevistas, cuestionarios, encuestas y observaciones, que permitan realizar un análisis de la oferta y la demanda del producto con el fin de conocer la viabilidad de su implementación. En este capítulo se presenta el análisis del mercado de biodiesel a nivel nacional, que se encuentra basado en estadísticas obtenidas de la Unidad de Planeación Minero Energética, para establecer el contexto en el cual se va a ubicar la planta productora de biodiesel, y proceder a analizar el comportamiento esperado de la demanda local en el municipio de Pamplona.

9.1 Criterios De Investigación

Para realizar el estudio de mercados fue necesario definir el tipo, diseño y enfoque de la investigación, las técnicas e instrumentos para recolectar la información, y la población objetivo de este estudio.

Teniendo en cuenta que el producto elaborado en este caso es el biodiesel, es necesario conocer la opinión de los consumidores directamente realizando una investigación de campo, que se efectúa en el lugar y tiempo en que ocurren los fenómenos objeto de estudio y se apoya en informaciones que provienen de entrevistas, cuestionarios, encuestas y observaciones [30]. Una investigación de campo es útil dado que el biodiesel entraría al mercado como un producto sustituto del diésel y ACPM usado tradicionalmente por los conductores locales, y es importante obtener información de encuestas realizadas directamente a la población de estudio. Además de esto, se utiliza un estudio descriptivo, pues se busca especificar las propiedades del fenómeno

sometido a análisis, midiendo o evaluando diversos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar [31]

Con base en los objetivos establecidos se estableció un diseño transversal no experimental, esto debido a que se el objeto de estudio fue observado en un tiempo único y en el contexto natural al que pertenece. Se realizó la investigación con un enfoque cuantitativo con el fin de encontrar una medición numérica que represente los patrones de comportamiento de la población objetivo.

9.2 Mercado Nacional De Biodiesel

Para analizar el mercado potencial del biodiesel a nivel nacional, se estudió la cadena productiva de los combustibles automotrices en Colombia.

Según la Proyección de Demanda de Combustibles Líquidos en Colombia publicada en diciembre de 2016 por la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), el crecimiento promedio anual de la demanda de ACPM fue de 2.4%, siendo el combustible con una tasa de crecimiento mayor frente a un 1.9% de la Gasolina para Motor, 1.01% para el gas natural vehicular y 0.9% del Jet Fuel.

El sector transporte se constituye como el sector con mayor consumo energético del país [32]. Para el año 2015 su participación fue de 40.12% con un aumento de 7.7% respecto a la participación del 2014 (ver **Figura 15**) [33].

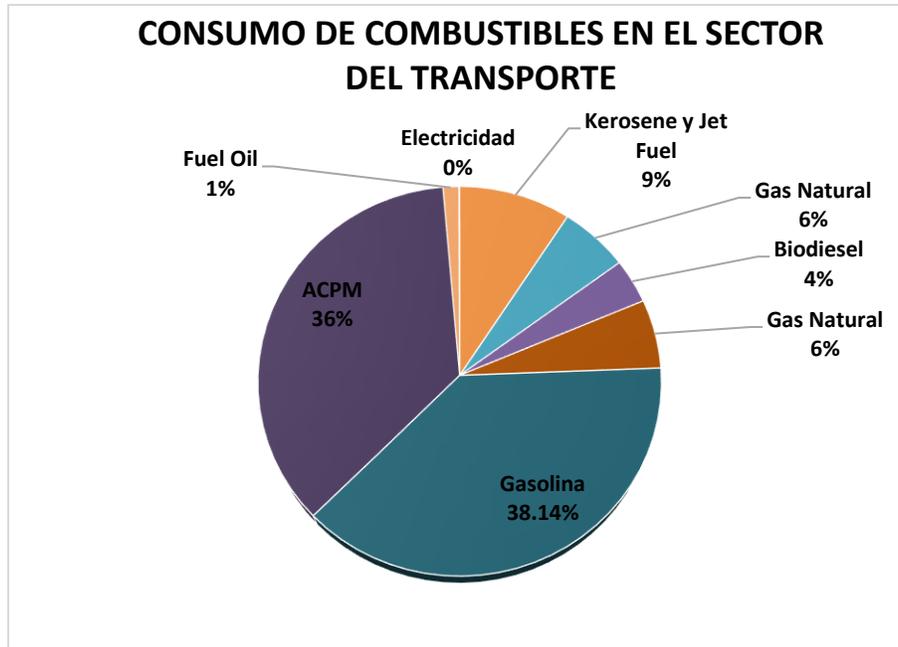


Figura 15 Distribución de energéticos sector del transporte [33]

La distribución del consumo de energía en el año 2015 se muestra en la **Figura 16**. Se consideran como fuentes de energía aquella proveniente del petróleo y sus derivados (88.4%), el gas natural (5.96%), los combustibles renovables como biocombustibles (3.87%) y alcohol carburante (1.71%) y finalmente la electricidad (0.06%).

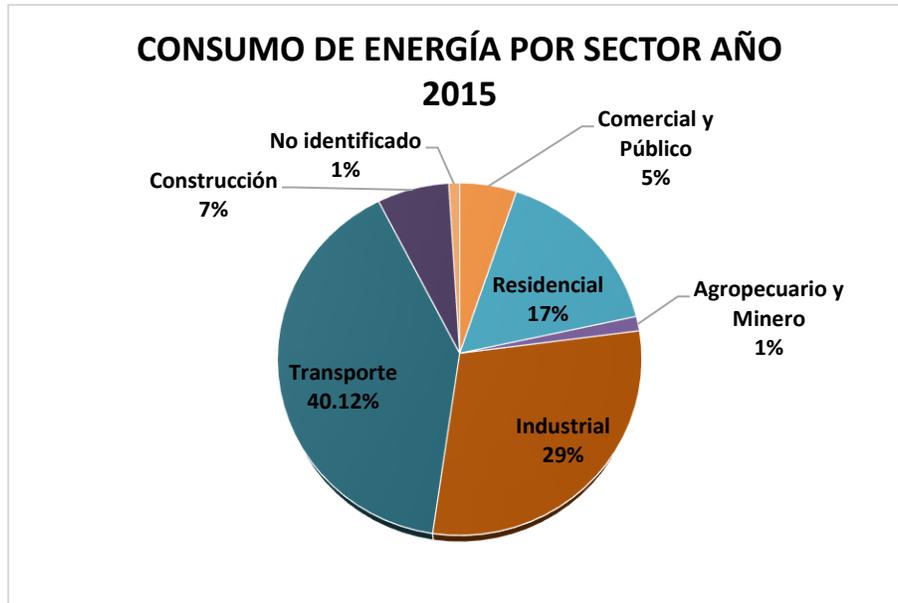


Figura 16 Distribución del consumo de energía en el año 2015 [33]

La distribución histórica del consumo de combustibles en el sector transporte se muestra en la **Figura 17**. El biodiesel presenta una participación de apenas 4.34% para el año 2015, pero tiene como mercado potencial el transporte impulsado a partir de ACPM, que representa un 46.5% del consumo de combustibles.

CONSUMO DE ENERGÉTICOS SECTOR TRANSPORTE

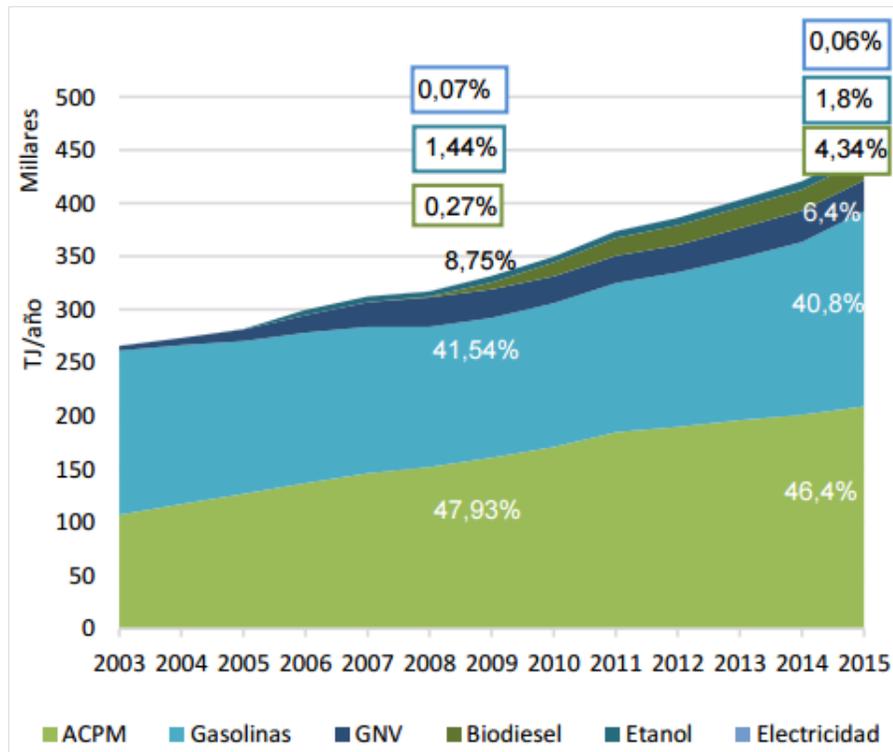


Figura 17 Distribución histórica del consumo de energéticos en el sector del transporte terrestre [33]

Un comparativo del consumo mensual de ACPM en los últimos años es mostrado en la **Figura 18**, entre febrero y marzo de 2015 el consumo se vio afectado por el paro camionero, con una reducción de 1.41% respecto del mismo mes en el 2014.

CONSUMO MENSUAL DE ACPM

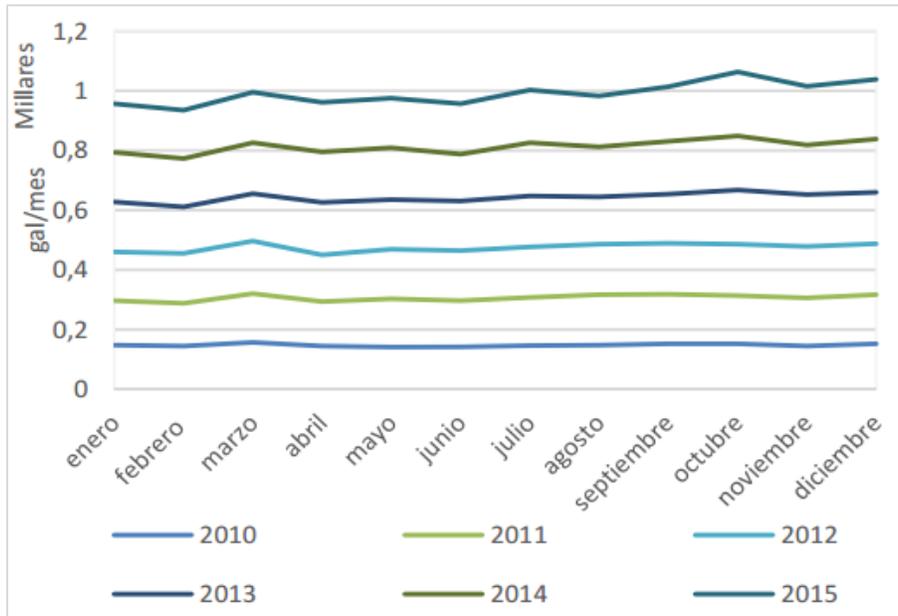


Figura 18 Distribución histórica del consumo mensual de ACPM [33]

9.2.1 Análisis De Precios Del Biodiesel

La fórmula para establecer el ingreso al productor del biocombustible para uso en motores diésel, se basa en el factor de producción eficiente, que tiene en cuenta el costo de oportunidad de las materias primas requeridas en la producción de biodiesel, el mismo para el ACPM de origen fósil y la garantía en la recuperación de las inversiones realizadas [34]. Actualmente este valor se basa en el mayor precio obtenido entre los siguientes:

- El precio establecido a partir del costo de la materia prima utilizada para su producción, calculado a partir del precio internacional de metanol, los costos de recolección del aceite usado de cocina y los costos de una fabricación eficiente.
- El precio referenciado internacionalmente con el valor de comercialización del diésel, ajustado según los cambios en las propiedades de los combustibles como resultado de la mezcla: mejora en cetanaje y disminución del contenido de azufre, lo que se traduce en un aumento de valor del producto; un menor poder calorífico del biodiesel frente al combustible convencional (**Figura 19**), lo que ocasiona una disminución de su precio comercial.

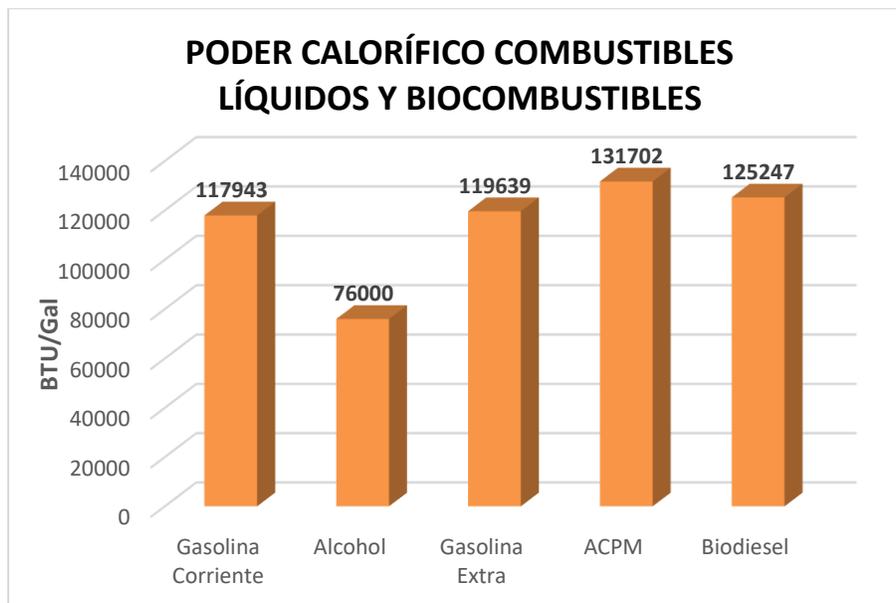


Figura 19 Poder calorífico de combustibles líquidos y biocombustibles [35]

El precio mínimo calculado a partir de un análisis de costos de producción de biocombustible tomando como referencia un valor promedio de los últimos 10 años, actualizado cada año según el comportamiento del índice de precios del productor (70%) y la tasa de cambio (30%), así como se observa en la **Figura 19**.

9.2.2 Proyección De La Demanda De Biodiesel

Los requerimientos futuros de biodiesel están asociados a la demanda del combustible ACPM (ver **Figura 20**). La fuente fue la Proyección de Demanda de Energía para el sector de transporte realizada por la UPME (ver **Figura 21**), teniendo en cuenta un crecimiento económico de 4% en el largo plazo y el precio comercial vigente [35].

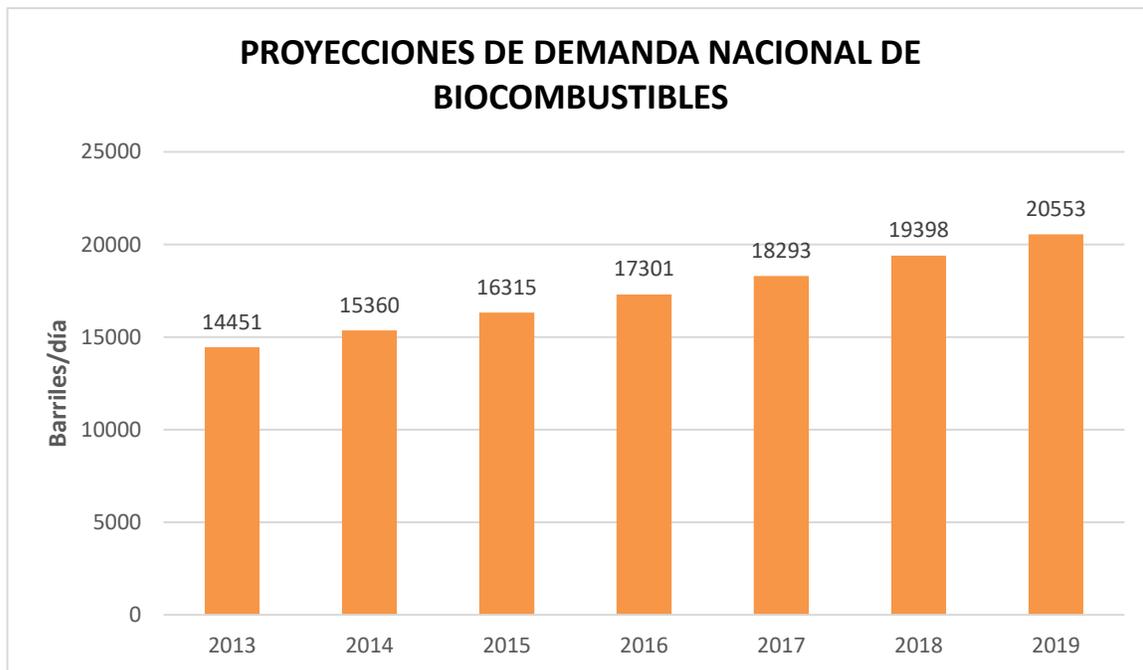


Figura 20 Proyección de la demanda de energía para el sector transporte [33]

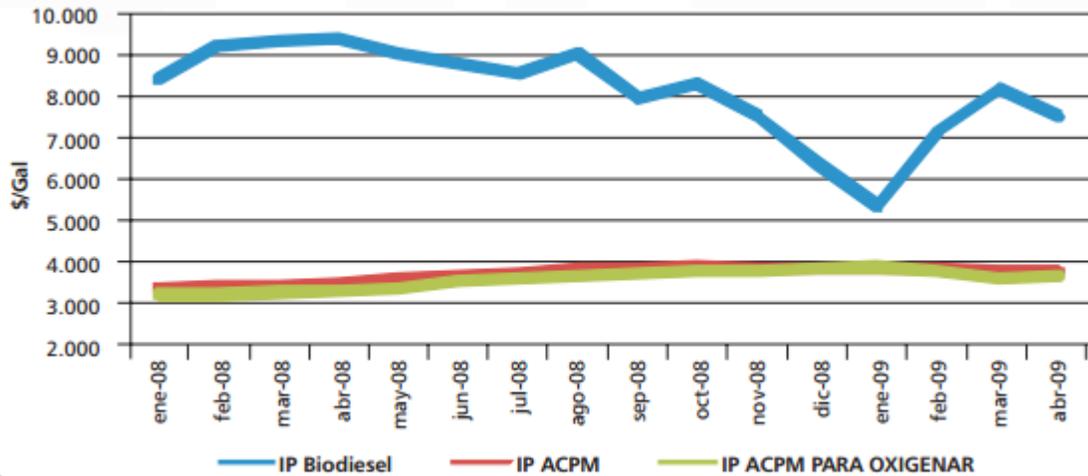


Figura 21 Evolución del Ingreso al Productor ACPM y Biodiesel [35]

9.2.3 Oferta Nacional De Biodiesel

Es posible analizar el déficit en la oferta de biocombustibles en Colombia partiendo de la proyección de la demanda mostrada anteriormente y la capacidad instalada de producción anual con la que cuentan las plantas productoras de biodiesel existentes en Colombia. Estos datos son basados en la oferta de biodiesel en mezcla al 10%, lo que implica que el déficit se incrementará debido a la meta establecida por la legislación actual, que establece un aumento progresivo hasta llegar al B20 para el año 2025. Lo anteriormente mencionados se puede apreciar en la **Figura 22**.

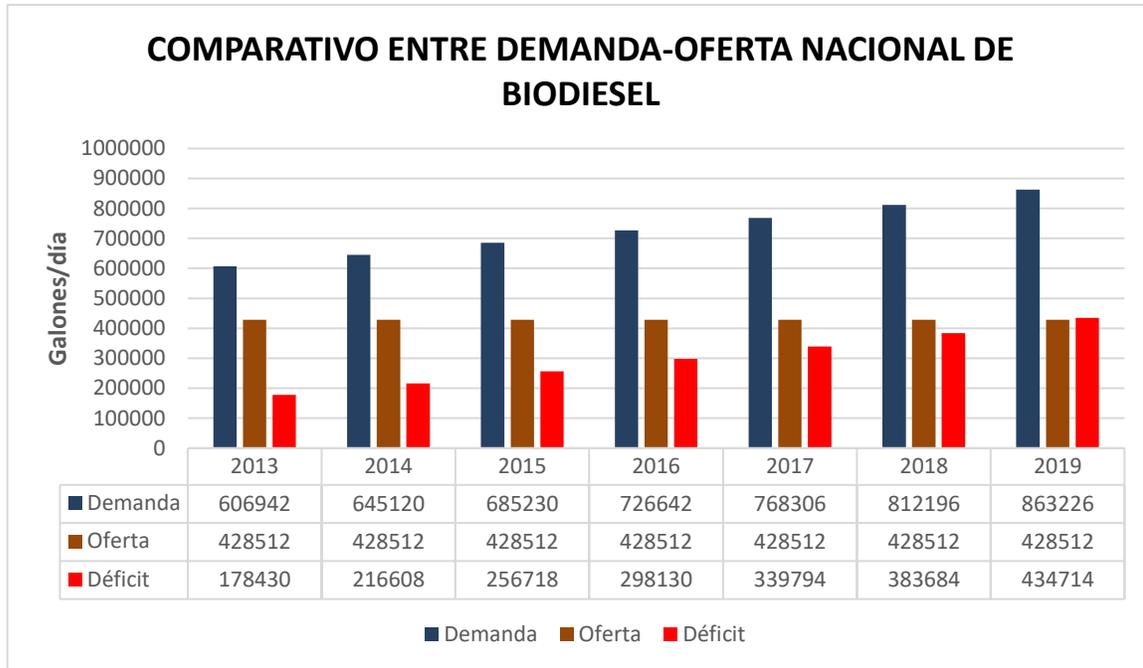


Figura 22 Comparativo entre la demanda nacional proyectada de Biodiesel y la oferta nacional de Biodiesel entre 2013-2019 [33]

9.3 Análisis De Mercado Local

Actualmente no hay comercialización de biocombustibles en Pamplona, por lo cual se presenta la oferta de diésel o ACPM. En la **Tabla 22** se muestran las estaciones de servicio certificadas que funcionan actualmente en el municipio.

Tabla 22 Estaciones de Servicio del municipio de Pamplona [36]

| Estación de Servicio | Nit EDS | Capacidad de Almacenamiento (Galones) |
|---|-------------|--|
| Cotranal Ltda | 890500446-6 | 16150 |
| Coopmotilón Ltda | 800152028-1 | 22000 |
| Estación de Servicio El Alto | 96185064-4 | 28041 |
| Estación de Servicio Troco | 13353413-0 | 19200 |
| Estación los Adioses | 88157139-1 | 7638 |
| Estación Panamericana | 1981618-3 | 13300 |
| El Buque Ltda | 807008102-7 | 20337 |
| Estación de Servicio Salida a Bucaramanga | 91212381-2 | 18181 |

9.3.1 Análisis De La Demanda

9.3.1.1 Población Y Muestreo

Para llevar a cabo el estudio de mercados para el montaje de una planta productora de Biodiesel a partir de aceite usado de cocina se tendrá en cuenta una población objetivo conformada por los conductores de transporte público colectivo (busetas), como clientes potenciales de la planta productora de Biodiesel.

Se tomó una muestra de 18 conductores de transporte público urbano municipal, teniendo en cuenta que la flota de transporte activo en Pamplona es de 20 busetas que manejan 6 rutas diferentes para llevar el servicio a todos los sectores.

Para determinar el tamaño de la muestra para una población finita (menor a 100.000 habitantes) 1 [37] Se utiliza la ecuación:

$$n = \frac{n_o}{1 + \frac{n_o}{N}} \quad \text{Ec. 27}$$

Dónde el valor de n_o se calcula a partir de la ecuación 2:

$$n_o = \frac{z^2 * p * q}{e^2} \quad \text{Ec. 28}$$

Dónde z tiene un valor de 1.96 para un nivel de confianza de 95%, p y q equivalen a 0.5 cada uno, y e es el máximo error permitido de 8%. Al reemplazar estas cantidades en la ecuación 2 se obtiene una constante n_o de 150.0625. Para una población $N=20$ se obtiene un tamaño de muestra de 17.65.

9.3.1.2 Encuesta

Una vez definido el tamaño de muestra por estudiar (18 conductores), se procedió a elaborar el instrumento para recolectar la información necesaria en la investigación, que en este caso es una encuesta.



ESTUDIO DE OPINIÓN SOBRE LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA DE BIODIESEL EN EL MUNICIPIO DE PAMPLONA

1. *¿Ha escuchado sobre el biodiesel?*

- Si
- No
- Ns/Nr

2. *¿Conoce los beneficios del biocombustible?*

- No conoce nada
- Conoce el tema
- Conoce detalladamente el tema

3. *El biodiesel es un combustible renovable que se puede obtener a partir de aceite de cocina usado, ¿Qué opinión tiene de la propuesta de usar combustibles amigables con el ambiente?*

- Muy favorable
- Favorable
- Poco favorable
- Desfavorable

4. ¿cree usted que es posible implementar la utilización de este combustible al sistema de transporte público?

- Si
- No

Que tan importante le parece a usted los siguientes aspectos al momento de elegir combustible

5. Baja contaminación ambiental

- Muy importante
- Importante
- Poco importante
- Sin importancia

6. Bajo costo respecto a otros combustibles

- Muy importante
- Importante
- Poco importante
- Sin importancia

7. Menor consumo de combustible respecto al combustible convencional

- Muy importante
- Importante
- Poco importante
- Sin importancia



8. *Ante las ventajas mecánicas que trae la utilización de biocombustible para el motor, como mejor lubricación, menor ensuciamiento de los inyectores, y menor desgaste de los componentes internos del motor, ¿Qué tan favorable le parece utilizar este combustible alternativo en su vehículo diésel?*

- Muy Favorable
- Favorable
- Poco favorable
- Desfavorable

9. *¿Cuál es el mayor inconveniente para utilizar biocombustible en su vehículo?*

- Reducción de potencia en el motor
- Falta de oferta
- Desconocimiento del producto
- Posible daño de alguna parte del vehículo
- Posible aumento del precio del biodiesel

10. *¿Al terminar esta encuesta, tiene usted algún interés por implementar el uso de biodiesel en su vehículo?*

- Si
- No
- Ns/Nr

9.3.1.3 Resultados Del Análisis De La Demanda

1. ¿Ha escuchado sobre el biodiesel?

En la **Tabla 23** se evidencian los resultados a la pregunta 1

Tabla 23 resultados a la pregunta 1

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|-----------|---------------------|---------------------|
| Si | 8 | 44.44% |
| No | 9 | 50% |
| Ns/Nr | 1 | 5.56% |

Entre los conductores consultados el 50% de ellos manifiesta no tener conocimiento sobre el biodiesel, junto a un 6% para el cual le es indiferente conocer o no sobre el tema. Ver **Figura 23**

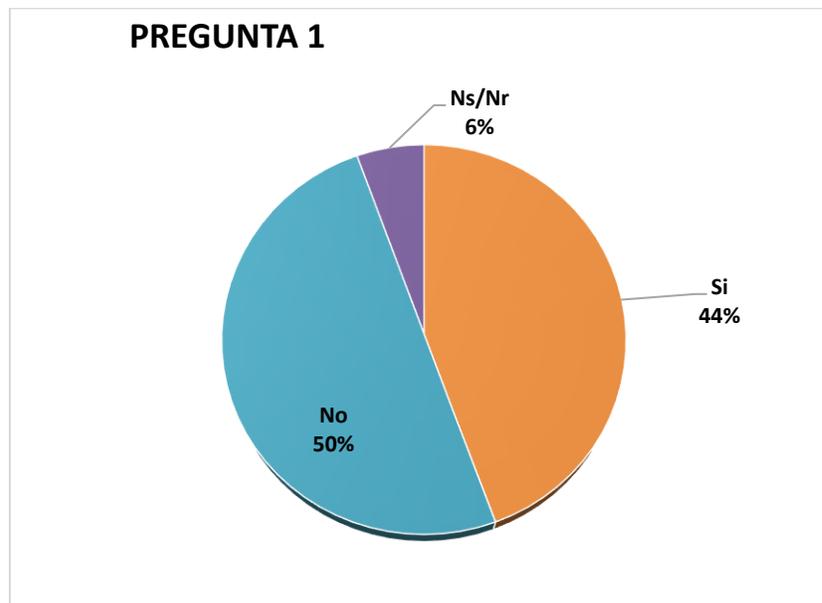


Figura 23 Diagrama circular pregunta 1

2. ¿Conoce los beneficios del biocombustible?

En la **Tabla 24** se evidencian los resultados a la pregunta 2

Tabla 24 resultados a la pregunta 2

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| No conoce nada | 12 | 66.7% |
| Conoce el tema | 5 | 27.7% |
| Conoce detalladamente el tema | 1 | 5.56% |

Sólo seis de los 18 conductores encuestados, equivalente a un 33.26% manifestaron tener conocimiento sobre los beneficios de usar biocombustibles en sus vehículos. Ver **Figura 24**

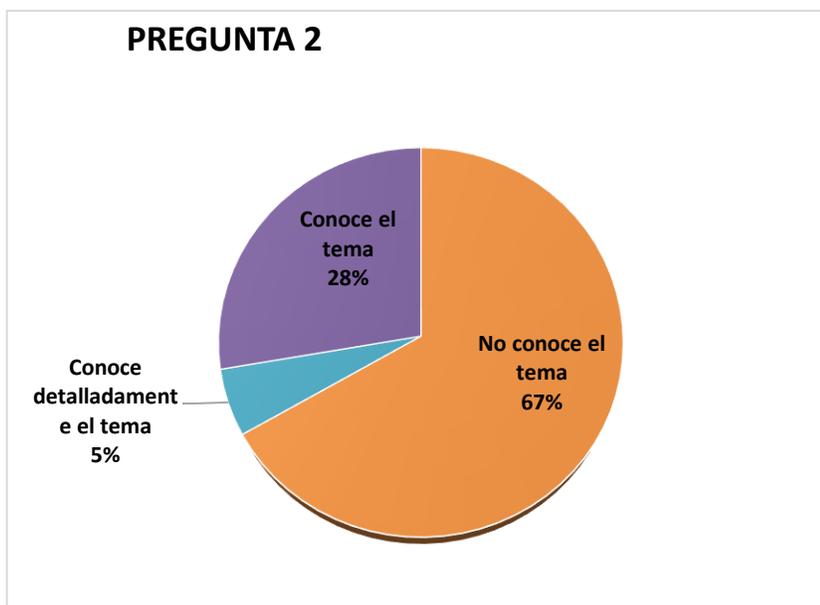


Figura 24 Diagrama circular pregunta 2

3. El biodiesel es un combustible renovable que se puede obtener a partir de aceite de cocina usado, ¿Qué opinión tiene de la propuesta de usar combustibles amigables con el ambiente?

Los resultados son presentado en la **Tabla 25**

Tabla 25 resultados a la pregunta 3

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|----------------|---------------------|---------------------|
| Muy favorable | 5 | 27.7% |
| Favorable | 9 | 50% |
| Poco favorable | 3 | 16.67% |
| Desfavorable | 1 | 5.56% |

Un alto porcentaje de la población de conductores de transporte público (77.7%) piensa favorablemente a cerca del uso de combustibles amigables con el ambiente (ver **Figura 25**).

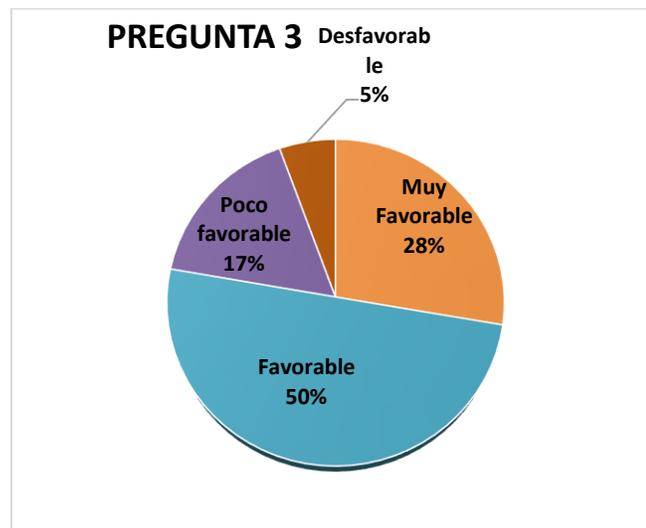


Figura 25 Diagrama circular pregunta 3

4. ¿cree usted que es posible implementar la utilización de este combustible al sistema de transporte público?

Los resultados son presentados en la **Tabla 26**

Tabla 26 resultados a la pregunta 4

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|-----------|---------------------|---------------------|
| Si | 11 | 61.11% |
| No | 7 | 38.89% |

La propuesta de implementar el biodiesel como combustible para los automotores utilizados en el transporte público presenta un porcentaje de aceptación del 61.11% entre los encuestados (ver **Figura 26**).

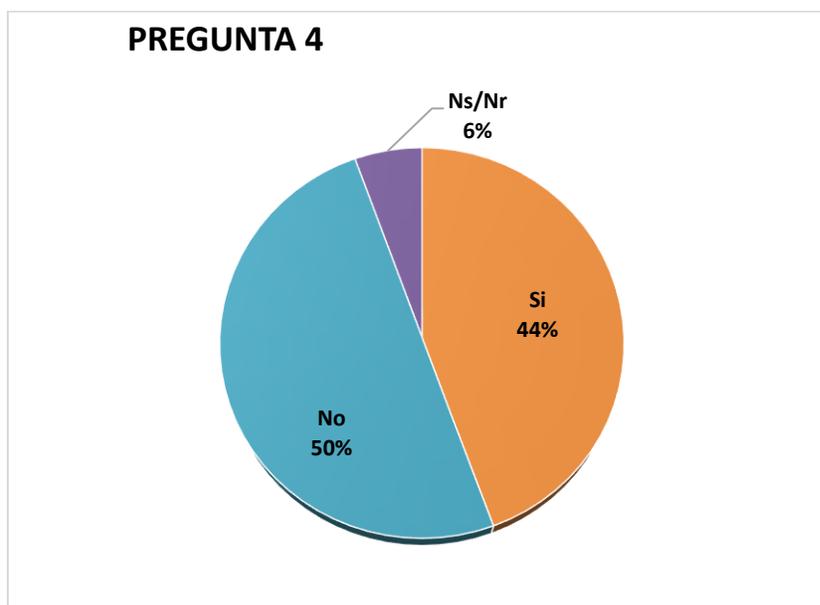


Figura 26 Diagrama circular pregunta 4

Preguntas 5, 6 y 7:

Que tan importante le parece a usted los siguientes aspectos al momento de elegir combustible:

5. Baja contaminación ambiental

Los resultados son presentados en la **Tabla 27** y la **Figura 27**

Tabla 27 resultados a la pregunta 5

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| Muy importante | 4 | 22.22% |
| Importante | 5 | 27.78% |
| Poco importante | 7 | 38.89% |
| Sin importancia | 2 | 11.2% |

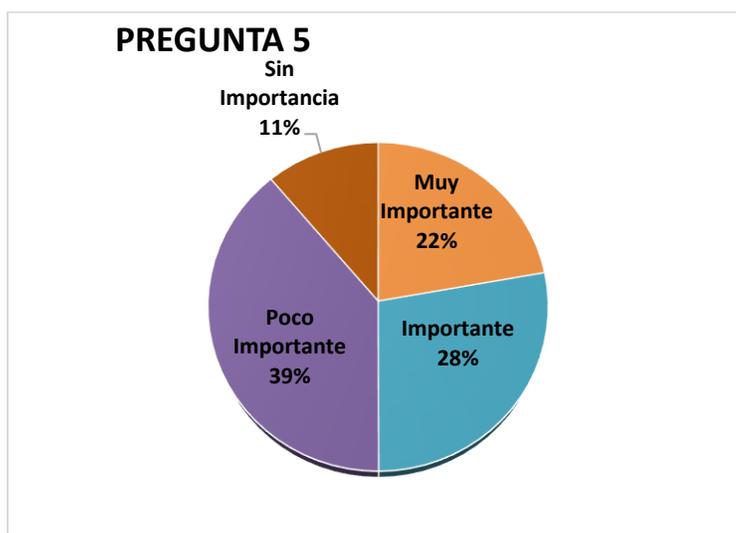


Figura 27 Diagrama circular pregunta 5

6. Bajo costo respecto a otros combustibles

Los resultados son presentados en la **Tabla 28** y la **Figura 28**

Tabla 28 resultados a la pregunta 6

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| Muy importante | 7 | 38.8% |
| Importante | 8 | 44.44% |
| Poco importante | 2 | 11.2% |
| Sin importancia | 1 | 5.56% |

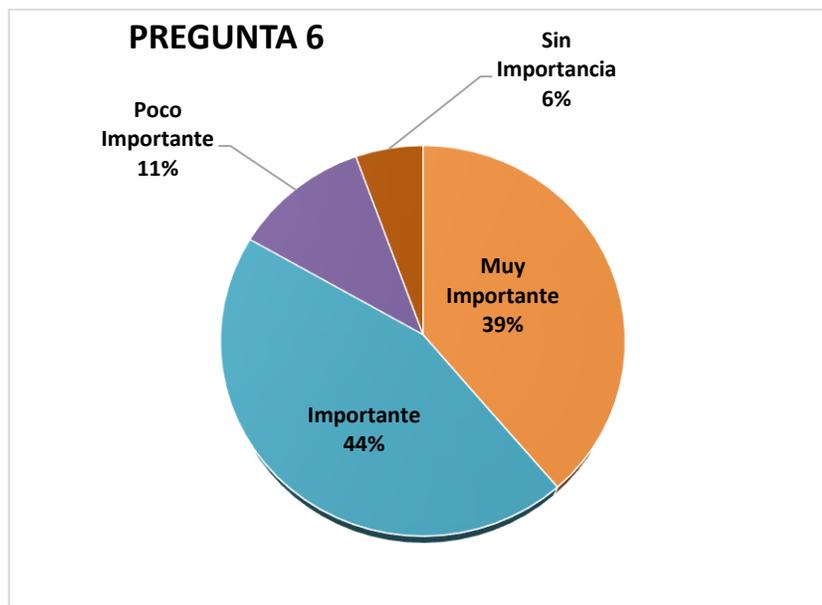


Figura 28 Diagrama circular pregunta 6

7. Menor consumo de combustible respecto al combustible convencional

Los resultados son presentados en la **Tabla 29** y la **Figura 29**

Tabla 29 resultados a la pregunta 7

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| Muy importante | 5 | 27.77% |
| Importante | 9 | 50% |
| Poco importante | 3 | 16.67% |
| Sin importancia | 1 | 5.56% |

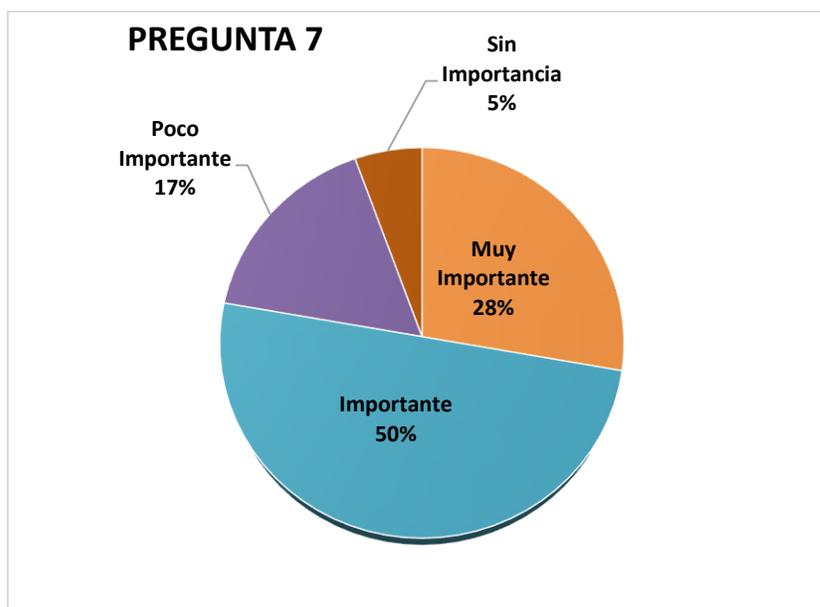


Figura 29 Diagrama circular pregunta 7

En cuanto a los aspectos considerados al momento de elegir el combustible para su vehículo, la baja contaminación ambiental es un aspecto de poca importancia (39%), mientras que el bajo costo del combustible y el rendimiento del combustible son considerados aspectos importantes a tener en cuenta, con un 44% y 50% respectivamente.

8. Ante las ventajas mecánicas que trae la utilización de biocombustible para el motor, como mejor lubricación, menor ensuciamiento de los inyectores, y menor desgaste de los componentes internos del motor, ¿Qué tan favorable le parece utilizar este combustible alternativo en su vehículo diésel?

Los resultados son presentados en la **Tabla 30**

Tabla 30 resultados a la pregunta 8

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|----------------|---------------------|---------------------|
| Muy favorable | 3 | 16.67% |
| Favorable | 10 | 55.56% |
| Poco favorable | 4 | 22.22% |
| Desfavorable | 1 | 5.56% |

Al conocer las ventajas mecánicas sobre el motor del uso de biodiesel, el 72% de los conductores encuestados considera favorable la implementación del combustible alternativo (ver **Figura 30**).

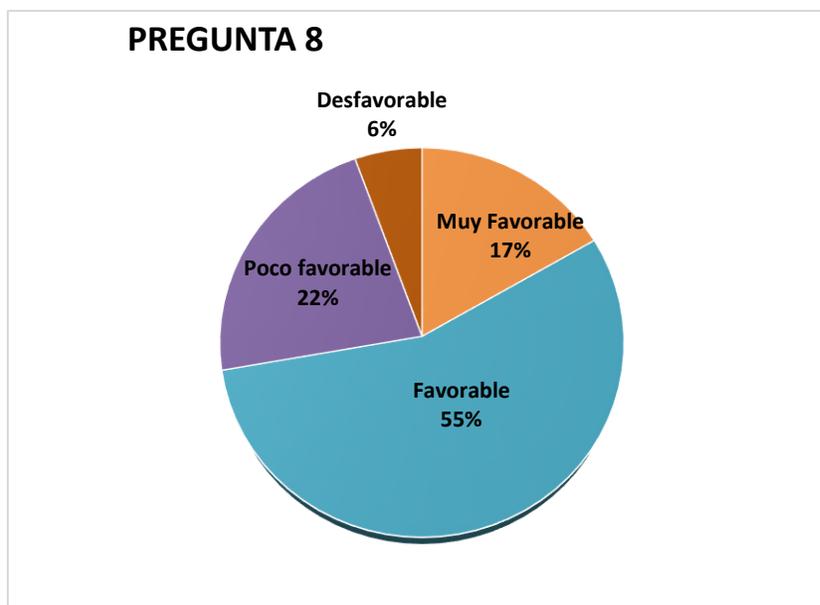


Figura 30 Diagrama circular pregunta 8

9. ¿Cuál es el mayor inconveniente para utilizar biocombustible en su vehículo?
 Los resultados de esta pregunta son presentados en la **Tabla 31** y la **Figura 31**

Tabla 31 resultados a la pregunta 9

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Reducción de potencia del motor | 3 | 16.67% |
| Falta de oferta | 5 | 27.77% |
| Desconocimiento del producto | 9 | 50% |
| Posible aumento del precio | 1 | 5.56% |

El desconocimiento del producto y la falta de oferta de biodiesel en la región son los mayores impedimentos para la utilización de biodiesel por parte de las personas encuestadas.

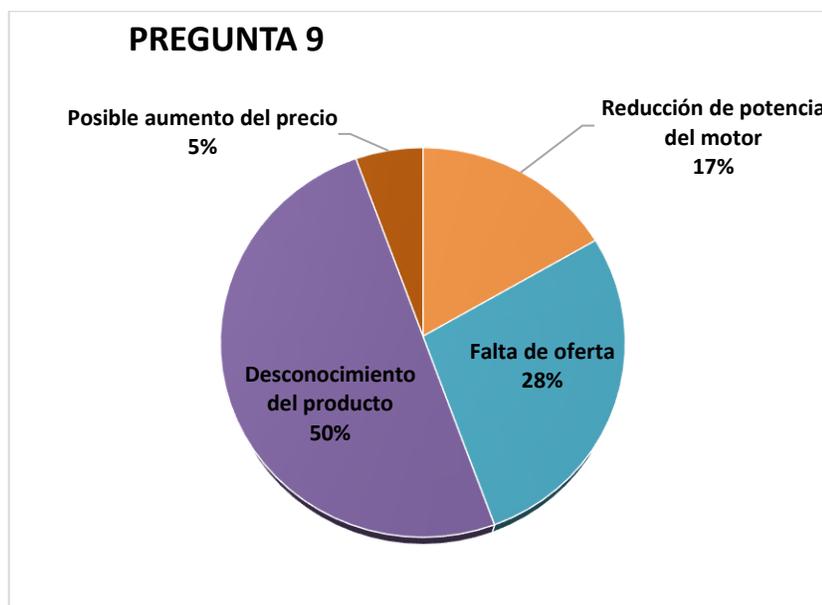


Figura 31 Diagrama circular pregunta 9

10. ¿Al terminar esta encuesta, tiene usted algún interés por implementar el uso de biodiesel en su vehículo?

Los resultados son presentados en la **Tabla 32**

Tabla 32 resultados a la pregunta 10

| Respuesta | Frecuencia Absoluta | Frecuencia Relativa |
|-----------|---------------------|---------------------|
| No | 7 | 38.8% |
| Si | 10 | 55.56% |
| Ns/Nr | 1 | 5.56% |

Finalmente, el 56% de los consultados afirmaron presentar interés por emplear biodiesel en sus automotores, luego de responder la totalidad de la encuesta (ver **Figura 32**).

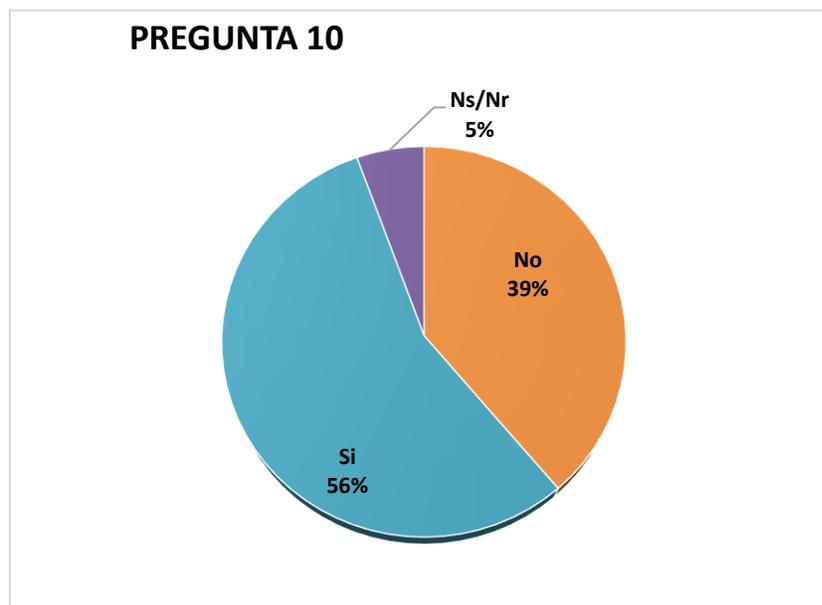


Figura 32 Diagrama circular pregunta 10

De acuerdo con las encuestas realizadas para analizar la aceptación del biodiesel como combustible del transporte público de Pamplona, se identificaron como oportunidades del mercado el bajo costo comercial del producto frente a los combustibles tradicionales, las ventajas mecánicas que trae para el desempeño del motor, y en un menor porcentaje el interés por consumir un combustible amigable con el medio ambiente.



También se observó el preocupante desconocimiento por parte de los consumidores potenciales del biocombustible. Esta situación permite establecer la necesidad de estrategias de mercado que lleven el producto hasta cada cliente potencial, donde no sólo se informe sobre el producto, sino que además se eduque sobre todo lo correspondiente a los biocombustibles, de manera que los consumidores conozcan claramente las ventajas de su uso, las estaciones de servicio donde sería ofertado el biodiesel y los beneficios de mantenimiento que trae para su vehículo. Con esto, es posible eliminar los prejuicios de los consumidores y generar confianza a cerca del biodiesel, para manejar en un futuro la promoción del producto a través de la experiencia de sus clientes con las personas de su entorno.

DQS is member of:



10 CONCLUSIONES

- Se evidenciaron rendimientos de reacción superiores al 78%. Se concluye que el metanol es la variable que tiene principal efecto en la reacción y que al trabajar con la relación molar alcohol/aceite 7:1 y una temperatura de 60 °C, el rendimiento de la reacción más elevado en comparación con los 3 ensayos restantes. Obteniendo una eficiencia del 85%.
- La revisión bibliográfica permitió la recopilación de información sobre la producción de biodiesel en el departamento de Norte de Santander, dando como resultado que una de las plantas de producción se encuentra ubicada en el municipio de Tibú. Además de parámetros para el diseño y realización de la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales.
- Al realizar la simulación del proceso de obtención de ésteres metílicos de aceite vegetal mediante ASPEN PLUS, se puede concluir que los beneficios proporcionados al generar parámetros y rutas de cálculo de propiedades termodinámicas que intervienen en el proceso de producción de biodiesel, nos permitió una visualización unificada de los escenarios de funcionamiento para mejorar y optimizar la calidad del biodiesel.
- Con el diseño y construcción del reactor batch se pudo evidenciar que debido a los materiales utilizados este puede ser ajustado y empleado para diferentes procesos.

11 BIBLIOGRAFIA

- [1] J. L. Pérez and A. Ruiz, “Producción de biodiesel a partir de aceite de Palma africana,” *Memorias Del I Congreso de IA e IQ Del Sureste de Mexico*. .
- [2] J. Hill, E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky, and D. Tiffany, “Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels.,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 103, no. 30, pp. 11206–11210, Jul. 2006.
- [3] H. Scott Fogler, *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*, Cuarta Edi. México: Pearson. Prentice Hall, 2008.
- [4] T. Keinonen and R. Takala, *Product Concept Design A Review of the Conceptual Design of Products in Industry*. Springer, 2006.
- [5] W. Hsu and B. Liu, “Conceptual design: issues and challenges,” *Comput. Des.*, vol. 32, no. 14, pp. 849–850, 2000.
- [6] I. López and L. Borzacconi, *Introducción al Diseño de Reactores*. 2009.
- [7] Gómez, “Simulación de una planta piloto para la producción de biodiesel en el laboratorio de operaciones unitarias de la esiqie,” Mexico: escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas, 2010.
- [8] P. Castro, J. Coello, and L. Castillo, “Opciones Para la Producción y Uso de Biodiesel en el Perú,” p. 27, 2007.
- [9] F. Romero, “Cinética De La Reacción De Transesterificación Del Aceite De Higuierilla En La Obtención De Biodies,” p. 4, 2003.
- [10] L. I. Orifici, C. D. Bahl, M. C. Gely, A. Bandoni, and A. M. Pagano, “Modeling

- and Simulation of the Biodiesel Production in a Pilot Continuous Reactor,” *Mec. Comput.*, vol. XXXII, pp. 1451–1461, 2013.
- [11] “Impacto social y económico en el uso de biocombustibles,” *J. Technol. Manag. Innov.*, pp. 3–8.
- [12] A. M. Castaño, “Estudio y Obtención de Biodiesel a Partir de Residuos Grasos de Pereira,” p. 29, 2010.
- [13] F. Romero, “Cinética de la Reacción de Transesterificación del Aceite de Higuierilla en la Obtención de Biodiesel,” p. 18, 2003.
- [14] “Diario la Opinión,” *Edición Viernes 3 Mayo*, 2013.
- [15] E. M. Shahid and Y. Jamal, “Production of biodiesel: A technical review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4732–4745, 2011.
- [16] C. A. Cardona Alzate, *Biodiesel*. Manizales, 2009.
- [17] “Kyoto Protocol,” 1997.
- [18] E. Blangino, “Modelado y correlación de propiedades en biodiesel,” *Anales*, vol. 16, pp. 93–97, 2004.
- [19] E. A. Bulla Pereira, “Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura,” Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [20] M. E. Borges and L. Díaz, “Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review,” *Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2839–2849, 2012.

- [21] D. H. D. Martinez, “Desarrollo de la ingeniería conceptual para la producción de biodiesel a partir de aceite doméstico desechado en la localidad tercera de Bogotá,” Universidad de América, 2010.
- [22] G. Palh and W. Beitz, *Engineering Design A Systematic Approach*, no. 2^a. Springer, 1996.
- [23] L. López, J. Bocanegra, and D. Malagón - Romero, “Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado,” *Ing. Univ.*, vol. 19, no. 1, pp. 155–172, 2015.
- [24] C. A. Diaz, “Diseño y construcción de una planta piloto de producción de biodiesel de manera continua,” 2005.
- [25] G. Towler and R. Sinnott, “Capital Cost Estimating,” in *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process design*, Second., no. 1975, 2013, pp. 307–354.
- [26] V. Aristizabal M, C. A. García V, and C. A. Cardona A, “Integrated Production of Different Types of Bioenergy from Oil Palm Through Biorefinery Concept,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 7, no. 4, pp. 737–745, 2016.
- [27] R. (Chemical engineer) Smith, *Chemical process design and integration*. McGraw-Hill, 2005.
- [28] M. Ficko, I. Drstvenšek, M. Brezočnik, J. Balič, and B. Vaupotic, “Prediction of total manufacturing costs for stamping tool on the basis of CAD-model of finished product,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 164–165, pp. 1327–1335, 2005.

- [29] E. B. Nauman, *Chemical Reactor Design, Optimization, and Scaleup*. 2008.
- [30] M. Balestrini, *Como se elabora el proyecto de investigación*. Caracas: Editorial B. L. Consultores Asociados, 2002.
- [31] H. S. Roberto, F. C. Carlos, and B. L. Pilar, *Metodología de la Investigación*. 2006.
- [32] *Balance Energético Colombiano*. Unidad de Planeación Minero Energética, 2016.
- [33] *Proyección de Demanda de Combustibles Líquidos-Revisión*. Unidad de Planeación Energética, 2016.
- [34] *Resolución 181780 del 29 de diciembre de 2005*. .
- [35] *Biocombustibles en Colombia*. Unidad de Planeación Minero Energética.
- [36] “Dirección de Hidrocarburos, Ministerio de Minas y Energía - Colombia.” [Online]. Available: https://www.sicom.gov.co/sicom/images/portada/EDS_ZF_2010_2013.pdf.
- [37] C. Valdivieso, O. Valdivieso, and R. Valdivieso, *Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión (No. 0311)*. 2011.

ANEXO 1: Guía de Laboratorio

| | | | |
|---|--------------------------------------|--------|-------------|
|  | Guía Unificada de Laboratorio | Código | FLA-23 v.00 |
| | | Página | 112 de 1 |

1. Título

Diseño y Construcción de un Reactor Batch Para la Producción de Biodiesel Como Combustible de Origen Orgánico Producido a Partir de Aceites Vegetales Variando la Relación Molar Aceite/Alcohol

2. Objetivo

Obtener biodiesel como alternativa de combustible producido a partir de aceites vegetales y usados de cocina

3. Marco Teórico

El biodiesel es un combustible compuesto por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables, como aceites vegetales, empleado en motores de ignición de compresión, tanto como en calderas de calefacción. Dicho en términos más simples: el biodiesel es un combustible de origen orgánico producido a partir de aceites vegetales o grasas animales; asimismo, puede ser utilizado como sustituto o aditivo del diésel convencional. El término *bio* hace referencia a su

naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diésel tradicional derivado del petróleo; por su parte, *diésel* alude a su uso en motores de este tipo.

El biodiésel es un combustible alternativo para el diésel del petróleo, es producido principalmente por una reacción llamada transesterificación; llevada a cabo entre un aceite y un alcohol en presencia de un catalizador, para obtener los mono-alquil ésteres y glicerol, que luego se separan y se purifican.

4. Materiales, Equipos e Insumos

NaOH o KOH

Metanol o de etanol

Aceite vegetal o aceite usado de cocina 1L

1 probeta de 1000mL

Embudo de decantación de 1000 ml

2 embudos de decantación de 500 mL

Condensador

5. Procedimiento

Preparación del metóxido

La relación molar aceite/alcohol. mol/mol es de 1:7 y el porcentaje de catalizador es del 0,5% con respecto al aceite.

Se mide el volumen establecido para el alcohol y los gramos necesarios de catalizador, luego se adiciona poco a poco el catalizador al alcohol hasta completar la medida establecida. La disolución del catalizador sobre el alcohol debe ser con una constante

agitación, teniendo en cuenta que en este proceso debe disolverse completamente el catalizador

Reacción de transesterificación

Para la reacción se emplea un reactor batch de capacidad de 2000 mL, el cual cuenta con agitación, una chaqueta de calentamiento y un controlador de temperatura.

El proceso que se realiza es; cargar el aceite al reactor, seguidamente se le suministra el metoxido preparado, se debe garantizar este se cierre de manera adecuada. Luego se digita la temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se activa el sistema a aproximadamente 200 rpm. Se deja la reacción por un tiempo de 180 min

Separación

Para esta fase se emplea un embudo de separación de 1000 mL. Este proceso consiste en que después de finalizado el tiempo de reacción, el producto obtenido es vertido al embudo y después es dejado por un tiempo de 2 h para obtener con seguridad una buena separación entre las fases generadas.

Lavado de biodiesel

Después de realizar la separación de las fases, el biodiesel debe lavarse para purificarse y alcanzar la mayor concentración de metil 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 lavado se realiza con agua a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, el volumen que se emplea de agua es la tercera parte del volumen de biodiesel obtenido. El volumen de agua empleado se divide efectuando tres lavados. Un aspecto importante es que el vertimiento 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.

Secado

Finalmente, el biodiesel se sometió a una temperatura de 120°C y una agitación contaste con el fin de eliminar residuos de agua y obtener este en óptimas condiciones.

NOTA

Si el aceite a utilizar es un aceite usado de cocina se debe filtra y calentar a 120°C para eliminar residuos de agua e impurezas.

7. Nivel de Riesgo

No dejar recipientes abiertos o muestras reposando en el área de trabajo. Limpiar cualquier derrame si se llega a presentar el caso. Disponer de los desechos químicos en los contenedores apropiados

8. Bibliografía

- * Cardona Alzate CA. Biodiesel. Manizales: 2009.
- * Gómez. Simulación de una planta piloto para la producción de biodiesel en el laboratorio de operaciones unitarias de la esiqie. Mexico: escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas, 2010.