

## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **ANTECEDENTES**

El biodiesel es un combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales. La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM), define al biodiesel como un combustible compuesto de esterres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales. El término bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diésel tradicional derivado del petróleo; mientras que diésel se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible el biodiesel puede ser usado en forma pura “B100” o mezclado con diésel de petróleo “BXX” (XX representa el porcentaje de biodiesel contenido en la mezcla).

La idea de usar aceites vegetales como combustible para los motores de combustión interna data de 1895, cuando Rudolf Diésel desarrollaba su motor. En la presentación del motor diésel en la Exposición Mundial de París en 1900, el Ing. Diésel usó aceite de maní como combustible.

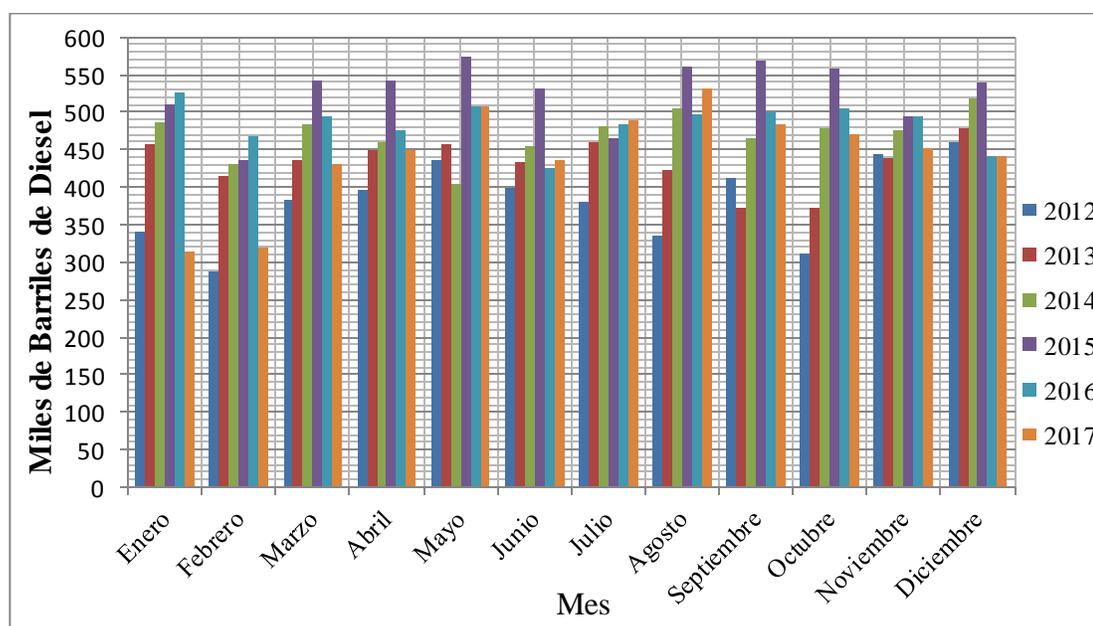
El sector del transporte consume un 30% de toda la energía utilizada en el mundo. Esta cifra se eleva en la Unión Europea al 32% y en España al 39%. Actualmente se consumen diariamente 83,7 millones de barriles de petróleo en todo el mundo y las estimaciones indican que esta cifra aumentará hasta llegar a los 112 millones de barriles diarios en 2020. Cada año se utiliza una cantidad de petróleo cuatro veces superior a la que se descubre. No es que el petróleo se vaya a acabar a corto plazo, pero extraer lo que queda se va haciendo cada vez más difícil y más caro. El suministro futuro depende de nuevos yacimientos, siempre de pequeño tamaño, y de la mejoría en las tecnologías de extracción de los grandes pozos ya existentes, en su mayoría descubiertos en la década de los 70. Más tarde o más temprano, la escasez de petróleo está asegurada, por lo que encontrar y desarrollar soluciones alternativas no sólo es una cuestión ambiental, sino también una necesidad estratégica de futuro. Los

biocombustibles constituyen una salida poco traumática para atenuar la escasez de crudo, ya que son capaces de sustituirlos sin necesidad de realizar grandes cambios en el parque automotor mundial (Cano Lozano Y., (2009).

En la Figura 1-1. Se muestra la producción de diésel en Bolivia en los últimos 6 años, en la misma se puede observar que en los últimos 2 años dicha producción disminuyó.

Figura 1- 1 Bolivia: Producción de Diésel.

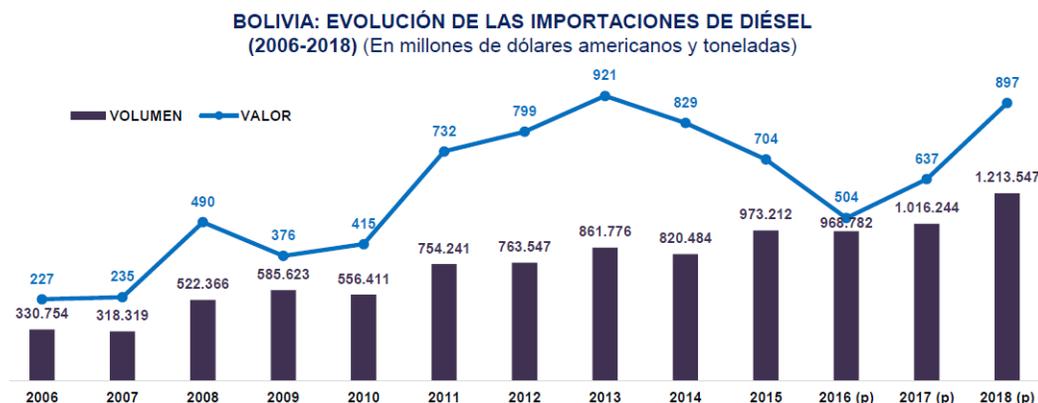
(En miles de barriles)



Fuente: INE/Elaboración Propia.

En los últimos 13 años, las importaciones de diésel sumaron 7.767 millones de dólares por la compra de cerca de 10 millones de toneladas. En 2018, las compras externas de diésel experimentaron un crecimiento en valor y en términos porcentuales de 41 % y 19 % respectivamente, comparado con el 2017, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística (INE).

Figura 1- 2 Evolución de la importación de diésel.



Fuente: INE / Elaboración: IBCE

Como se muestra en la Figura 3, los principales países de los cuales Bolivia importa este combustible son Argentina, Chile, Perú, Swasilandia, Suiza y otros.

Figura 1- 3 Importación de diésel, según país.

**BOLIVIA: IMPORTACIONES DE DIÉSEL SEGÚN  
PAÍS DE ORIGEN, 2018 (p)**  
(En toneladas y millones de dólares)

Nº	PAÍS DE ORIGEN	VOLUMEN	VALOR
1	Argentina	566.520	422
2	Chile	373.305	268
3	Perú	165.938	119
4	Swasilandia	34.850	24
5	Suiza	26.374	23
6	Arabia Saudita	23.405	18
7	Paraguay	17.000	18
8	Países Bajos	3.655	3
9	Singapur	2.500	2
<b>Total Importado</b>		<b>1.213.547</b>	<b>897</b>

Fuente: INE / Elaboración: IBCE

En la gestión 2018, el 47 % del valor importado de diésel provino de Argentina, el 30 % desde Chile y 13 % desde Perú.

En el año 1992 se inició la producción a escala industrial del biodiésel en toda Europa (Austria, Bélgica, Francia, Alemania, Italia, Suecia), pero Alemania produjo el primer biodiésel comercial ya en 1988 a partir de aceite de colza; este era el metilester de

colza, con el cual se efectuaron pruebas sobre los motores de los vehículos que lo empleaban, como controles de calidad de aire y de ambiente.

Por otra parte, en el periodo 1998-1999, impulsados por el alto costo de las oleaginosas y una depresión en el precio del diésel petrolífero, se implementaron procesos para el empleo de los aceites usados para frituras. Es así como en Austria, Italia y Francia con sistemas de recolección adecuada y muy bien organizados, se aseguran un importante suministro de materia prima para producir biodiesel.

El Aceite Vegetal Usado (AVU), es todo aquel aceite proveniente, en forma continua o discontinua, de establecimientos de todo tipo que generan o elaboran productos comestibles y que, en su utilización, han sufrido un proceso térmico que ha cambiado las características propias del producto original por lo general estos cambios son un aumento en la viscosidad, un cambio en el color, aumento del índice de acides, etc.

Cuando los aceites usados de cocina se vierten por el lavadero son una fuente de contaminación de aguas de ríos, lagos, etc. además de provocar un impacto estético, aportan otros contaminantes como la elevada Demanda Química de Oxígeno (DQO) que en gran medida afecta al intercambio gaseoso. Un litro de aceite usado puede llegar a contaminar 40 000 litros de agua, que es equivalente al consumo de agua anual de una persona en su domicilio (Gonzales C. y Gonzales U., 2015).

En las redes de saneamiento, los aceites usados, al unirse con restos de jabones y detergentes de uso doméstico, llegan a provocar las denominadas “bolas de grasa”, capaces de generar situaciones de atascos y roturas en colectores, sujetas a velocidades bajas de caudal, así como en desagües generales de viviendas y elementos anexos.

### **Biodiesel en el mundo**

La compañía petrolera Finlandesa Neste Oil cuenta con cuatro grandes plantas de producción de biodiesel, dos de ellas ubicadas en la refinería de Porvoo (Finlandia) con una capacidad de producción anual total de 380 000 toneladas, otras dos en Singapur y Rotterdam (Holanda) con capacidades de producción anual similares de

800 000 toneladas, lo que la convierte en el primer productor mundial de diésel renovable.

Por otro lado, la industria de biodiesel en Estados Unidos de América cuenta con aproximadamente 97 plantas de biodiesel con una capacidad de producción anual conjunta de 7,7 millones de toneladas según información de la Energy Information Administration (EIA).

Aun así EEUU importa biodiesel de Argentina e Indonesia, dichas importaciones pasaban de 644 mil toneladas en el 2014 a 1,2 millones de toneladas en el 2015 y a 2,3 millones de toneladas en el 2016.

En 2018 la Unión Europea adquirió 1.3 millones de toneladas de biodiesel d origen argentino por US\$ 890 millones.

### **Biodiesel en América latina**

En 2011 Brasil, Argentina y Colombia eran los únicos países latinoamericanos que figuraban entre los principales productores de biodiesel en el mundo, en 2007 Argentina exportaba por primera vez biodiesel en una cantidad de 160.000 toneladas ese año, actualmente la industria del biodiesel en Argentina cuenta con 37 fábricas, con capacidad de producción anual conjunta cercana a 4.4 Mt/año.

Colombia produce biodiesel utilizando como prima, mayormente, aceite de palma, en la actualidad cuenta con 12 empresas con una capacidad instalada conjunta de 916 000 toneladas.

En Bolivia sólo existen 2 empresas dedicadas a la producción de biodiesel, la empresa cochabambina Bioma SRL y en Santa Cruz El Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT). Otra empresa dedicada al reciclado del aceite vegetal usado es Ecogreen que recolecta dicho aceite para luego exportarlo a España, donde le darán un uso industrial transformándolo en: biodiesel, pinturas o jabones.

Bioma SRL actualmente tiene a cinco empresas comprometidas (entre hoteles y restaurantes de pollos) que le dan la materia prima y de las cuales recoge entre 10 a

11 mil litros de aceite usado comestible por semana y produce por día hasta 3 mil litros de biodiesel.

El precio del diésel de petróleo subvencionado desde septiembre del 2019 es de 3.72 Bs/L, el precio promedio del diésel en el mundo es de 8.88 Bs mientras que el precio del Biodiesel es de 2.55 Bs/L según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

### **Identificación y caracterización de la idea del proyecto**

En Bolivia no existe registro de la cantidad de consumo de aceite vegetal, pero de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística (INE) el país produce 98.2 millones de litros al año (2016) y según los datos registrados por el Observatorio Agroambiental y Productivo (OAP) el consumo promedio de aceite de soya y girasol en Bolivia al año es de 14 litros por habitante, siendo hasta la fecha (10 de septiembre de 2019) 11 501 400 habitantes en el país, se puede estimar que aproximadamente 161 019 600 litros de aceite serían consumidos en el país y una gran parte de esta cantidad sería desechada y que al tirarlo por el drenaje perjudicaría gravemente al medio ambiente.

Se estima que un litro de aceite usado puede llegar a contaminar 40000 litros de agua, que es equivalente al consumo de agua en un año de una persona en su domicilio. Además en las redes de Saneamiento, los aceites usados, al reunirse con los restos de detergentes y jabones, llegan a provocar las denominadas bolas de grasa que ocasionan situaciones de atasco en colectores y alcantarillas.

El desecho de aceites usados, también incrementa el costo de depuración en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. En aquellos municipios que no disponen de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, el aceite arrojado por la cañería culmina en un curso de agua. El aceite puede causar la muerte de la flora acuática porque es difícilmente biodegradable, formando, en lagunas o ríos, una película difícil de eliminar y que afecta la capacidad de intercambio de oxígeno del agua con el aire.

## **Mercado Consumidor**

El mercado consumidor que se plantea para el biodiesel investigado en el presente proyecto es el parque automotor de vehículos con motor diésel de los nueve departamentos del estado plurinacional de Bolivia.

De acuerdo a la información proporcionada por el Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE) y basándonos en el dato de la importación de diésel de petróleo en el año 2016 se podría estimar que el país estaría dispuesto a consumir 968 782 toneladas métricas de biodiesel al año.

Entre las razones por las que los consumidores de diésel de petróleo estarían dispuestos a remplazarlo por el producto que se desea obtener, se tiene que él biodiesel:

- Tiene un alto número de cetano, lo que mejora la combustión.
- Tiene buena lubricidad.
- Presenta un punto de ignición más alto que el diésel lo que le confiere mayor seguridad en el manejo y almacenamiento
- Se puede mezclar con el diésel de petróleo en cualquier proporción y la mezcla se mantiene estable. Por otra parte la mezcla de biodiesel con gasóleo aumenta el rendimiento de los motores (Pardal, 2012).
- Es un combustible oxigenado lo que facilita la combustión, es decir, contribuye a una combustión más limpia.

En el mercado externo, el biodiesel es utilizado para el corte obligatorio de diésel con biodiesel, con un porcentaje de corte que varía según la legislación de cada país. Los mercados más grandes para el biodiesel son Estados Unidos y la Unión Europea debido a que en los lugares mencionados existe dicha legislación de corte obligatorio y una demanda de este producto.

## **Mercado Competidor**

Actualmente en el país solo existen 2 empresas dedicadas a la producción de biodiesel, la empresa cochabambina Bioma SRL y en Santa Cruz El Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT).

Bioma SRL actualmente tiene a cinco empresas comprometidas (entre hoteles y restaurantes de pollos) que le dan la materia prima y de las cuales recoge entre 10 a 11 mil litros de aceite usado comestible por semana.

Por su parte El Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT), implemento una planta piloto, con fines investigativos, para producir biodiesel a partir de aceite de soya, girasol, piñón y cusi; que luego es utilizado en mezcla con diésel en motores a diésel convencionales estacionarios y en los motorizados del parque automotor del CIAT (tractores, camiones, micros y camionetas).

La industria del biodiesel en la República de Argentina cuenta en la actualidad (septiembre del 2017) con 37 fábricas, con una capacidad anual conjunta de aproximadamente 4.4 Mt/año. Es un complejo industrial de gran relevancia para el país, ya que en el año 2016 produjo cerca de 2.6 Mt de biodiesel, exportando 1.6 Mt y generando divisas por US\$ 1.175 millones.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Elaborar Biodiesel a escala de laboratorio a partir de aceite vegetal usado en la ciudad de Tarija.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades (*humedad, índice de acidez, densidad y viscosidad*) de la materia prima: aceite vegetal usado para la elaboración de Biodiesel a escala laboratorio.
- Analizar y seleccionar el proceso experimental de elaboración de Biodiesel a partir de aceite vegetal usado.

- Diseñar y ejecutar la fase experimental del proceso de elaboración de Biodiesel a partir de aceite vegetal usado.
- Determinar y caracterizar las propiedades fisicoquímicas estándar y de calidad (*porcentaje de humedad y volátiles, índice de acidez, viscosidad, densidad*) del producto experimental obtenido.
- Determinar el rendimiento y/o eficiencia del proceso experimental utilizado para la elaboración de biodiesel a partir de aceite vegetal usado.
- Presentar, analizar y valorar los resultados del proceso experimental de elaboración de Biodiesel a partir de aceite vegetal usado.

## **JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La realización de una investigación experimental para la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal usado queda justificada en los puntos detallados a continuación:

### **Justificación ambiental**

La producción de biodiesel representa una alternativa de reutilización del aceite que fue utilizado en la fritura de alimentos en diferentes mercados, domicilios y locales de comida rápida en la ciudad de Tarija y que luego es vertido al sistema de alcantarillado y en la mayoría de los casos a los ríos; ocasionando atascos, costos adicionales en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y contaminación de los ríos.

Las ventajas más evidentes del biodiesel es que se trata de una sustancia biodegradable, no explosiva, no inflamable, renovable, no tóxica, cuya combustión genera bajos niveles de emisiones en gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y material particulado (MP) (Mofijur et al., 2016).

### **Justificación tecnológica**

El biodiesel puede ser utilizado inmediatamente en los motores diesel sin requerir estas modificaciones, contiene 11% de oxígeno en peso y no contiene azufre, por esta

razón el uso de este biocombustible puede extender la vida útil de los motores porque posee mejores cualidades lubricantes que el combustible de diésel de petróleo y facilita la combustión, es decir, contribuye a una combustión limpia, mientras el consumo, encendido, rendimiento, y el par del motor (torque) varían muy poco respecto a sus valores normales.

Debido a la existencia de un marco legal en el país que impulsa la producción y regula la utilización de biodiesel (Ley N° 3207, 30 de septiembre de 2005) se justifica la investigación de la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales usados.

### **Justificación social**

La investigación de obtención de biodiesel, su posterior desarrollo y ejecución contribuirá a mejorar la calidad de vida de la población debido a que disminuye la contaminación del aire y agua en el departamento de Tarija debido a sus beneficios ambientales, así también da un valor económico al aceite vegetal que es desechado por los diferentes locales de comida rápida.

### **Justificación económica**

El costo internacional del diésel es 8.88 Bs (19 de octubre de 2018) y en Bolivia es de 3.72 Bs, lo que significa que el estado paga 5.16 Bs por litro de diésel por concepto de subvención.

Por lo tanto se justifica la investigación de obtención de biodiesel como una alternativa para contribuir a reducir costos de subvención en la importación de diésel en el país.

### **Justificación personal**

La realización de la presente investigación de obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado, busca cumplir con el requisito para optar el grado académico de licenciatura en ingeniería química, como así también, plasmar conocimiento teóricos y prácticos adquiridos a lo largo de la formación profesional dentro de la carrera.

## **CAPITULO II MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Biodiesel**

Es un combustible renovable derivado de aceites vegetales vírgenes de plantas oleaginosas (soya, girasol, colza, palma y otros), aceites vegetales usados o grasas animales; mezclado con alcohol (metanol o etanol), usado en motores a diésel en cualquier concentración de mezcla con diésel (también se lo puede usar puro), producido a través de un proceso químico llamado transesterificación que remueve la glicerina del aceite (Barba Moscoso M., 2007).

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) especifica al biodiesel o FAME (Fatty Acid Methyl Ester) como esteres mono alquílico de ácidos grasos de cadena larga.

El biodiesel es un líquido de color amarillo-ámbar, con una viscosidad similar a la del diésel de petróleo, no es inflamable, no es explosivo, con un punto de inflamación superior comparado con el diésel de petróleo, es biodegradable, disminuye significativamente las emisiones de gases tóxicos y de otras sustancias volátiles cuando se quema como combustible. Además, presenta mejor índice de cetano y mejor eficiencia en la lubricación.

La siguiente tabla muestra características típicas del diésel de petróleo y el biodiesel, en la que se evidencia un cierto grado de similitud.

Tabla II-1 Propiedades del biodiesel vs. Diésel de petróleo.

<b>Propiedades</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>Diésel</b>
Norma del combustible	ASTM D975	ASTM PS121
Composición	C <sub>12</sub> -C <sub>22</sub> FAME	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> -C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
Metilester	95.5->98.0% (normas)	0.0
Carbono (% peso)	77.0	86.5
Azufre (% peso)	0-0.0024	0.05 máx.
Agua (ppm peso)	0.05 % máx.	161.0
Oxígeno (% peso)	11.0	0.0
Hidrógeno (% peso)	12.0	13.0
Nº de Cetano	48-55	40-55
PCI (kJ/kg)	37.700	41.860
Viscosidad cinemática (40°C)	1.9-6.0	1.3-4.1
Punto de inflamación (40°C)	100-170	60-80
Punto de ebullición (40°C)	182-338	188-343
Gravedad específica (kg/L) (60°F)	0.88	0.85
Relación de Aire/combustible	13.8	15.0

Fuente: Sarmiento Torres, R. (2008).

## 2.2 Historia del biodiesel

La idea de usar aceites vegetales como combustible para los motores de combustión interna data de 1895, cuando Rudolf Diésel desarrollaba su motor. En la presentación del motor diésel en la Exposición Mundial de París en 1900, el Ing. Diésel usó aceite de maní como combustible.

\*FAME.- Fatty Acid Methyl Ester

Sin embargo la alta viscosidad de los aceites (aproximadamente 10 veces más que en el diésel) fue limitante en su utilización, debido a que esto implicaba una pobre atomización del combustible y se obtenía una combustión incompleta. También debido al alto punto de ignición de los aceites vegetales y su tendencia a oxidarse térmicamente complicó su uso, debido a la formación de depósitos en las boquillas de los inyectores y una disminución de la lubricidad. No obstante se intentó modificar sus propiedades para aproximarse a las del diésel por medio de otros métodos como la dilución o microemulsión, la pirólisis o la transesterificación. Pero el bajo precio que por entonces tenía el petróleo hizo que enseguida el diésel ocupase el lugar preferencial y se abandonase el aceite como alternativa.

### 2.3 Ventajas y desventajas del biodiesel

En cuanto a ventajas en comparación con el diésel, podemos hablar de una serie de ventajas y desventajas medioambientales, técnicas, económicas y sociales. Las mayores ventajas son las medioambientales, pues tiene un nivel muy bajo de emisiones y contaminación.

Tabla II-2 Ventajas y desventajas del biodiesel.

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Medioambientales.</b>	Está libre de azufre y aromáticos.	Las emisiones de nitrógeno son superiores en comparación con el diésel de petróleo.
	No es tóxico.	
	Tiene un carácter renovable y es biodegradable. Se degrada cuatro veces más rápido que el diésel.	
	Reduce las emisiones de partículas, óxidos de carbono, óxidos de azufre, y los hidrocarburos aromáticos policíclicos.	
	Es posible fabricarlo a partir de aceite para freír ya usado.	
<b>Técnicas</b>	Tiene un alto número de cetano, lo que mejora la combustión.	Tiende a disolverse más fácilmente en el lubricante que el diésel.
	Tiene buena lubricidad.	Problemas de congelación del combustible en invierno, debido al alto punto de congelación (entre 0 y -5°C).
	Es un combustible oxigenado lo que	Por sus propiedades solventes,

	facilita la combustión.	puede ablandar y degradar ciertos materiales.
	Se puede mezclar con el gasóleo en cualquier proporción, la mezcla se mantiene estable y aumenta el rendimiento de los motores.	Problemas de almacenamiento por la degradación del combustible en depósito si se deja durante un tiempo prolongado.
	Presenta un punto de ignición más alto que el diésel lo que le confiere mayor seguridad en el manejo y almacenamiento.	La densidad y viscosidad son ligeramente más altas que la del combustible diésel lo cual plantea problemas de utilización en climas muy fríos.
		La potencia del motor disminuye porque el poder calorífico inferior (P.C.I.) del biodiesel es menor.
<b>Económicas</b>	Permite el fortalecimiento de la agroindustria.	Ligero descenso en la economía de combustible.
<b>Sociales.</b>	Genera empleos directos e indirectos en las zonas rurales.	
	Evita el abandono de tierras de cultivo.	

Fuente: Barros Piñero, X. (2015).

## 2.4 Métodos de obtención de biodiesel

Existen cuatro métodos principales de obtención de biodiesel: el uso directo de aceites y mezcla con diésel de petróleo, pirólisis, microemulsificación (combinación de codisolventes) y transesterificación. El método comúnmente más utilizado es la transesterificación.

## 2.5 Pirolisis

Los procesos de craqueo térmico (pirolisis) se llevan a cabo normalmente a temperaturas elevadas y presiones atmosféricas. Habitualmente, este proceso se utiliza para obtener combustibles líquidos, ya que para obtener altos rendimientos a gases, se requeriría de elevadas temperaturas, lo que lleva asociado un gran gasto energético.

El uso de esta tecnología para la producción de combustibles líquidos presenta diferentes ventajas:

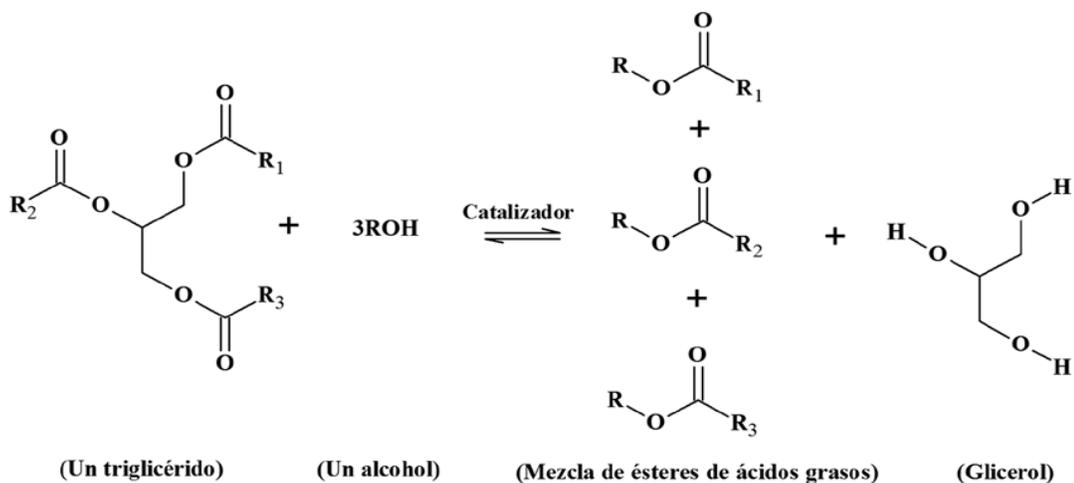
- La infraestructura necesaria es muy similar a la utilizada en el refino del petróleo, por tanto se pueden aprovechar dichas instalaciones.
- Los combustibles obtenidos tienen una composición muy similar al diésel.
- Tiene un bajo coste.
- Es muy flexible en cuanto a la alimentación de materia prima.

## 2.6 Transesterificación

El biodiésel es obtenido generalmente mediante una transesterificación de aceites o grasas, haciendo reaccionar un alcohol de cadena corta (usualmente metanol) en presencia de un catalizador (usualmente NaOH). Las materias primas más frecuentes para la producción de biodiésel son los aceites vírgenes o reciclados de las oleaginosas de producción mundial, tales como girasol, soja, palma africana y otros.

La reacción de transesterificación depende principalmente de la naturaleza de la materia prima, la concentración del catalizador, la relación molar alcohol-aceite, la temperatura, la agitación, presión y tiempo de reacción, el contenido de humedad, y de ácidos grasos libres.

Figura 2- 1 Mecanismo de la reacción de transesterificación



Fuente: Castellar Ortega G., Angulo Mercado E. y Cardozo Arrieta B. (2014).

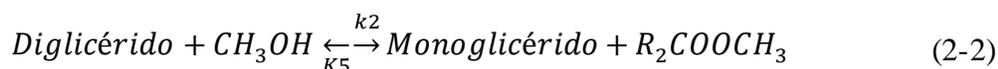
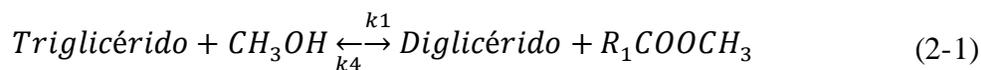
En la reacción de transesterificación, un mol de triglicéridos reacciona con tres moles de alcohol para formar un mol de glicerol y tres moles de los respectivos

alquilésteres, en una secuencia de tres reacciones reversibles donde los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, monoglicéridos y finalmente glicerol. El glicerol y los ésteres son productos inmiscibles que se distribuyen en dos fases después de la reacción. Estas fases pueden ser separadas después de decantar o centrifugar.

Existen varios tipos de catálisis para la transesterificación pero comercialmente para la producción de biodiesel la más comúnmente utilizada es la catálisis homogénea, que se puede dividir principalmente en alcalina y ácida. También se han utilizado otros tipos de catalizadores heterogéneos (en fase sólida). Otras alternativas interesantes pueden ser la utilización de catalizadores enzimáticos como las lipasas.

### 2.6.1 Cinética de la reacción de transesterificación

El estudio cinético de una reacción química se basa en la de terminación de la ecuación que represente la velocidad del proceso en función de las concentraciones de las especies reactantes y de la constante cinética. La transesterificación consiste de tres reacciones reversibles consecutivas en la que es liberada una molécula de éster en cada una, el triglicérido es convertido paso a paso a diglicérido, monoglicérido y finalmente glicerol, como resultado se obtiene seis constantes de equilibrio distintas.



Las reacciones son reversibles, aunque el equilibrio se desplaza hacia la producción de ésteres de ácidos grasos y glicerol, el conjunto de ecuaciones diferenciales, caracterizando la cinética de reacción de cada paso implicado en la transesterificación del triglicérido, puede ser escrito como describen las siguientes ecuaciones:

$$r_{TG} = \frac{d[TG]}{dt} = -k_1[TG][A] + k_2[DG][E] \quad (2-4)$$

$$r_{DG} = \frac{d[DG]}{dt} = k_1[TG][A] - k_2[DG][E] - k_3[DG][A] + k_4[MG][E] \quad (2-5)$$

$$r_{MG} = \frac{d[MG]}{dt} = k_3[DG][A] - k_4[MG][E] - k_5[MG][A] + k_6[GL][E] \quad (2-6)$$

$$r_{GL} = \frac{d[GL]}{dt} = k_5[MG][A] - k_6[GL][E] \quad (2-7)$$

$$r_E = \frac{d[E]}{dt} = k_1[TG][A] - k_2[DG][E] + k_3[DG][A] - k_4[MG][E] + k_5[MG][A] - k_6[GL][E] \quad (2-8)$$

$$r_A = \frac{d[A]}{dt} = -k_1[TG][A] + k_2[DG][E] - k_3[DG][A] + k_4[MG][E] - k_5[MG][A] + k_6[GL][E] \quad (2-9)$$

Dónde:

[TG] – Concentración de triglicéridos

[DG] – Concentración de diglicéridos

[MG] – Concentración de monoglicéridos

[A] – Concentración del Alcohol

[E] – Concentración del Ester

Por otra parte, centrándonos en la reacción global de transesterificación, en ensayos realizados sobre aceite de soya transesterificado con metanol en presencia de soda caustica en condiciones subcríticas; los datos cinéticos reportados por Nouredini H. se correlacionaron con una cinética de segundo orden:

$$(-r_{TG}) = K[TG][A] - \left(\frac{K}{K_{eq}}\right)[GL][E] \quad (2-10)$$

### 2.6.2 Catálisis básica

La transesterificación alcalina homogénea generalmente es más rápida y menos costosa cuando la comparamos con la ácida u otros tipos de catalizador. Las bases fuertes como el NaOH y el KOH son los catalizadores más usados. Estos hidróxidos presentan altas conversiones a condiciones moderadas y tiempos de reacción cortos, además son menos corrosivos para los equipos industriales y requieren pequeños volúmenes de alcohol, lo que representa reactores económicos y de menor tamaño.

### 2.6.3 Catálisis ácida

Los catalizadores ácidos son recomendados para transesterificar aceites con un alto contenido de ácidos grasos libres tales como el aceite de palma o los aceites reciclados.

Sin embargo, la reacción es lenta y requiere temperaturas y presiones más altas, y de igual manera demanda mayores cantidades de alcohol. Al igual que la catálisis básica la reacción es fuertemente afectada por la presencia de agua, disminuyendo el rendimiento de la transesterificación.

### 2.6.4 Catálisis heterogénea

Una opción que se ha explorado en últimas fechas es el empleo de catalizadores heterogéneos, tanto básicos como ácidos. Las principales ventajas de estos catalizadores son: simplificación del proceso de purificación del biodiesel, reutilización del catalizador, aumento de la eficiencia en comparación con la catálisis homogénea y la posibilidad de llevar a cabo simultáneamente las reacciones de transesterificación y esterificación.

La principal desventaja en el uso de catálisis heterogénea es la limitada difusión de los reactantes a la superficie del catalizador. No obstante, este problema se ha resuelto

en últimas fechas mediante el empleo de nano-catalizadores sólidos, o bien, usando un disolvente que facilite la transferencia de reactivos a la superficie del catalizador.

## **2.7 Materias primas**

Existe una gran variedad de materias primas válidas para la producción de biodiesel, que contienen los triglicéridos necesarios para producir los ésteres. A continuación se muestran las principales materias primas empleadas para este fin:

- Aceites vegetales convencionales: girasol, colza, palma coco, soja.
- Aceites vegetales alternativos: cynaracurduculus, brassicacarinata, camelina sativa, crambeabyssinica, jatropha curcas, ricino, pogianus.
- Aceites de semillas modificadas genéticamente: girasol de alto oleico
- Grasas animales: sebo de vaca, sebo de búfalo, grasa de pescado, grasa de pollo.
- Aceites de fritura usados en la cocción de alimentos.
- Otras fuentes: micro algas, producciones microbianas.

Las materias primas más utilizadas en la actualidad son los aceites vegetales, especialmente de colza y girasol en el caso de Europa. Otra materia prima muy importante son los aceites usados, pues además de ser una materia prima muy barata, se solventa el problema de su tratamiento como residuos, tanto los costes como su gestión.

### **2.7.1 Aceites y grasas**

Las grasas animales y los aceites vegetales son los lípidos que se encuentran con mayor abundancia en la naturaleza. Aunque parecen diferentes (las grasas animales como la mantequilla y la manteca son sólidas, mientras que los aceites vegetales como el de maíz y el de cacahuete son líquidos) sus estructuras están estrechamente relacionadas. Las grasas y los aceites son triacilgliceroles (TAG, también llamados triglicéridos), triésteres del glicerol con tres ácidos carboxílicos de cadena larga.

### 2.7.2 Triglicéridos

Generalmente, los triglicéridos constan de un mol de glicerol y tres mol de ácidos grasos (AG) que por lo general son diferentes. La glicerina tiene tres grupos OH razón por el cual puede estar de forma mono, di o triesterificada por los ácidos grasos. Cuando los tres ácidos grasos son iguales en el triglicérido se define como triglicérido simple pero cuando los AG son diferentes se define como triglicérido compuesto; para el caso de los AG estos pueden variar en la longitud de la cadena de carbonos e hidrógenos y el número de enlaces saturados e insaturados (Dobles enlaces). En la Tabla II-3, se puede ver los porcentajes en peso (%p/p) del aceite de soja.

Tabla II-3 Composición %p/p del aceite de soja.

Ácidos grasos	Formula	Composición %p/p
Mirístico	$C_{14}H_{28}O_2$	0.1
Palmítico	$C_{16}H_{32}O_2$	12.2
Estearico	$C_{18}H_{36}O_2$	2.5
Oleico	$C_{18}H_{34}O_2$	21.5
Linoleico	$C_{18}H_{32}O_2$	56.6
Linolénico	$C_{18}H_{30}O_2$	7.1
<b>Total</b>	-	100

Fuente: C. C. C. M. Silva, N. F. P. Ribeiro, M. M. V. M. Souza, and D. a. G. Aranda, (2010).

### 2.7.3 Aceite vegetal usado

El aceite residual de cocina es uno de los grandes responsables de la contaminación del agua. Los aceites comestibles provenientes de materias primas como girasol, soja, oliva, maíz o palma, forman en la superficie del agua una película difícil de eliminar que afecta su capacidad de intercambio de oxígeno y altera el ecosistema.

Las grasas animales y los aceites de cocina usados son conocidas como “grasas amarillas” si el nivel de ácidos grasos libres es menor al 15% p/p, y “grasas oscuras o marrones” si el contenido de AGL es superior al 15% p/p.

Los aceites residuales de cocina usados son principalmente obtenidos de la industria de restaurantes o reciclados en sitios especiales (contenedores, camiones cisternas).

Puede no tener ningún costo o un 60% menos que los aceites refinados dependiendo de la fuente y la disponibilidad. Los aceites usados presentan un gran nivel de reutilización, y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible

Los aceites reciclados son considerados como una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiesel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitarían los costes de tratamiento como residuo.

## **2.8 Alcohol**

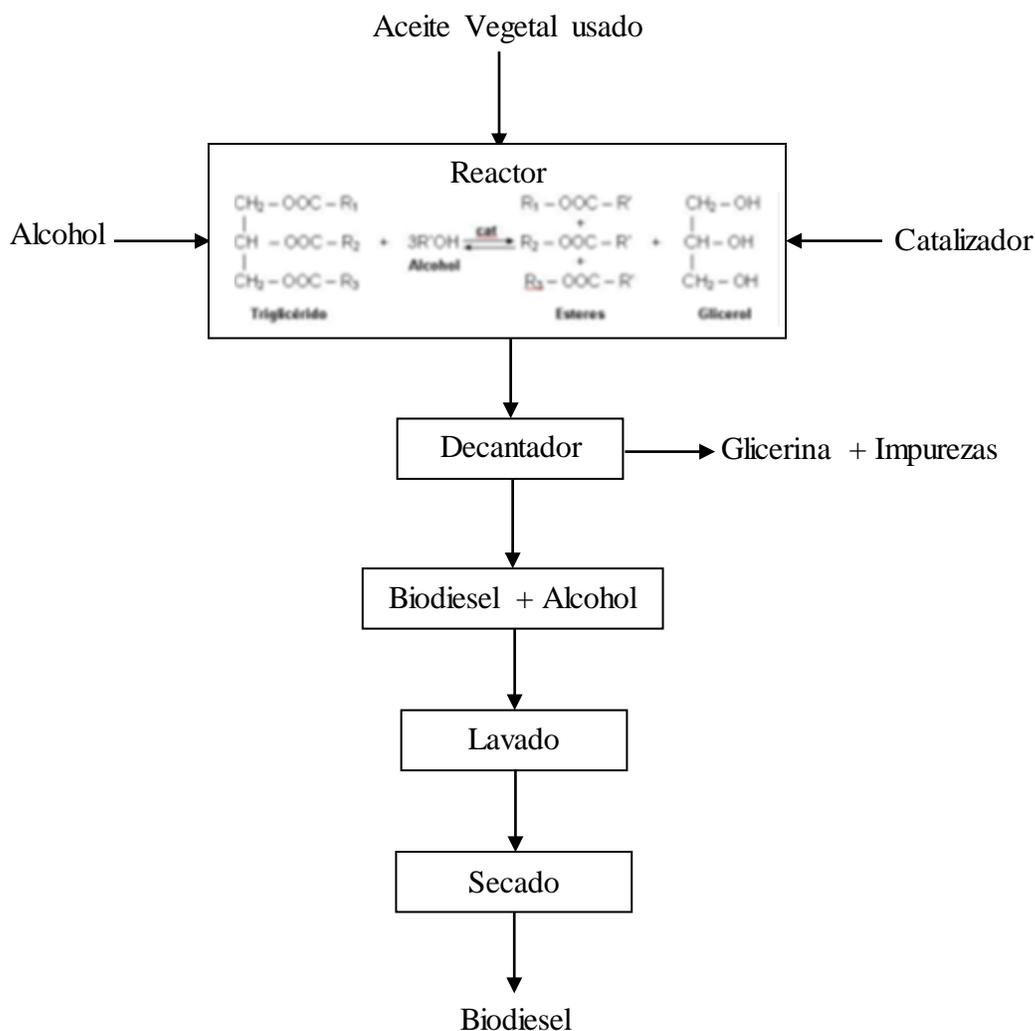
El alcohol es el principal insumo para la producción de biodiesel. Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiesel son metanol y etanol, aunque, se pueden utilizar otros alcoholes (propanol, isopropanol, butanol y pentanol), pero éstos son mucho más sensibles a la contaminación con agua, la cual inhibe la reacción. Pese a su naturaleza tóxica, el metanol es el alcohol más utilizado debido a su alta reactividad y bajo costo; además, los ésteres de metilo presentan mejores propiedades (menor viscosidad, punto de nube a temperaturas más bajas, por ejemplo) de acuerdo a las necesidades de los motores, en comparación de los ésteres producidos con alcoholes como el etanol.

## **2.9 Metodología del estudio**

### **2.9.1 Descripción de la metodología**

La metodología que se va a emplear en el proyecto es una metodología experimental para realizar una investigación aplicada, la información se obtendrá de fuentes primarias, secundarias y terciarias.

Figura 2- 2 Representación esquemática del proceso para la obtención de biodiesel



Fuente: Elaboración propia

Primeramente se realizara la recolección de la materia prima de diferentes locales de pollo frito, la misma que será caracterizada fisicoquímicamente.

Entre las propiedades fisicoquímicas que se determinara en el aceite vegetal usado se encuentran: densidad, índice de acidez, viscosidad y humedad.

El aceite se filtrara a vacío, previo calentamiento para facilitar la filtración, usando una bomba de vacío y papel filtro.

Se identificarán las variables más importantes que influirán en el proceso de producción del biodiesel y se procederá a montar el equipo para la reacción de transesterificación.

El aceite previamente tratado se introducirá en el reactor, el mismo que estará sumergido en un baño con control de temperatura, se introducirá el metanol en una relación molar aceite-alcohol 1:7 y 0.5% en peso de NaOH como catalizador.

Se realizarán diferentes experiencias variando la temperatura y tiempo de reacción para determinar los parámetros más idóneos del proceso.

Se separará los productos obtenidos de la reacción de esterificación en una ampolla de separación y el biodiesel se lavará con agua templada.

Luego se realizará las pruebas para determinar la calidad del biodiesel obtenido y se calculará el rendimiento del proceso.

### **2.9.2 Caracterización fisicoquímica de la materia prima**

El Aceite Vegetal Usado (AVU), es todo aquel aceite proveniente, en forma continua o discontinua, de establecimientos de todo tipo que generan o elaboran productos comestibles y que, en su utilización, han sufrido un proceso térmico que ha cambiado las características propias del producto original.

Los aceites comestibles usados tienen un aspecto importante de mencionar, el mismo aceite se utiliza varias veces; ésta condición provoca cambios en la composición física y química del aceite que por lo general se traducen en un aumento de la viscosidad, un cambio en el color, como se observa en la Tabla II-4, las propiedades físicas y química de una muestra de aceites usados.

Tabla II-4 Propiedades fisicoquímicas de los aceites de fritura usados.

Parámetro	Aceite		Unidades	Norma
	Usado	Virgen		
Viscosidad Cinemática a 40 °C	40.2	32.6	cSt	EN ISO 3104
Densidad a 15 °C	926.0	920.0	kg/m <sup>3</sup>	EN ISO 12185
Punto de inflamación	286.0	274	°C	EN ISO 2719
Índice de Yodo	108.0	119	cg l/g aceite	EN 14111
Índice de saponificación	193.2	190	mg KOH/g aceite	AOCS CD3 1993
Índice de Acidez	1.7	0.15	mg KOH/g aceite	EN 14104
Contenido de agua	1200.0	-	mg/kg	EN ISO 12937

Fuente: Torres Rivero, L. (2017).

Los aceites reciclados son considerados como una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiesel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitarían los costes de tratamiento como residuo.

### 2.9.3 Caracterización del producto: Biodiesel

Existen diversas especificaciones para biodiesel que han sido implementadas en varios países alrededor del mundo, en EE.UU. se ha adoptado la norma ASTM D 6751, en Europa la EN 14214, y en Brasil la ANP N° 7/08. Estos estándares han surgido del consenso de grupos relevantes que han participado en su elaboración, como ser: fabricantes de vehículos, motores y equipos de inyección, compañías refinadoras, productores de biocombustibles, representantes de los gobiernos y de los usuarios de biocombustibles.

Las propiedades físicas y químicas del biodiesel dependen tanto del proceso de fabricación como de la naturaleza de la materia prima a partir de los cuales se ha producido. En la Tabla II-5 se muestran las propiedades que el biodiesel debe tener para que sea comercializado según la norma EN 14214.

Tabla II-5 Requerimientos del biodiesel según la Norma Europea EN 14214.

Propiedad	Unidades	Mínimo	Máximo	Método
Contenido de metilésteres	% p/p	96.5	-	EN 14103
Densidad (15 °C)	kg/m <sup>3</sup>	860	900	EN ISO 3675
Viscosidad (40 °C)	mm <sup>2</sup> /s	3.50	5.00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120	-	EN ISO 3679
Contenido de azufre	mg/kg	-	10.0	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Residuo carbonoso Conradson	% p/p	-	0.30	EN ISO 10370
Número de cetano	-	51.0	-	EN ISO 5165
Contenido de cenizas sulfatadas.	% p/p	-	0.02	ISO 3987
Contenido de agua	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Contaminación total	mg/kg	-	24.0	EN 12662
Corrosión a la lámina de Cu	-	-	Clase 1	EN ISO 2160
Estabilidad a la oxidación	h (110 °C)	6.00	-	EN 14112
Índice de acidez	mg KOH/g	-	0.50	EN 14104
Numero de Yodo	g I <sub>2</sub> /g	-	1.2	EN 14111
Metililolenato	% p/p	-	12.0	EN 14103
Metilésteres poliinsaturados	% p/p	-	1.00	EN 14103
Contenido de metanol	% p/p	-	0.20	EN 14110
Contenido de monoglicéridos	% p/p	-	0.80	EN 14105
Contenido de diglicéridos	% p/p	-	0.20	EN 14105
Contenido de triglicéridos	% p/p	-	0.20	EN 14105
Glicerol libre	% p/p	-	0.02	EN 14105 EN 14106
Glicerol total	% p/p	-	0.25	EN 14105
Grupo I metales (Na + K)	mg/kg	-	5.00	EN 14108 EN 14109
Grupo II metales (Ca + Mg)	mg/kg	-	5.00	EN 14538
Contenido de fósforo	mg/kg	-	10.0	EN 14107
POFF	°C	-	0	EN 116
Verano		-	-15	
Invierno				

Fuente: Avellaneda Vargas, F. A. (2010).

#### 2.9.4 Selección del método de obtención de biodiesel a partir de AVU

Existen cuatro métodos principales para la obtención de biodiesel: el uso directo de aceites y mezcla con diésel de petróleo, pirólisis, microemulsificación (combinación de codisolventes) y esterificación. En la Tabla II-6 se muestra una comparación de las ventajas y desventajas de estos cuatro métodos.

Tabla II-6 Comparación entre los métodos de obtención de biodiesel.

<b>Método</b>	<b>Definición</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Problemas de utilización en motores</b>
<b>Uso directo y mezcla con gasóleo</b>	Uso directo como combustible diésel o mezcla con gasóleo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Naturaleza líquida-portabilidad.</li> <li>• Contenido de calor (80% del combustible diésel).</li> <li>• Fácilmente disponibles. Renovable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor viscosidad.</li> <li>• Baja volatilidad.</li> <li>• Reactividad de las cadenas de hidrocarburos insaturadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formación de coque.</li> <li>• Depósitos de carbono.</li> <li>• Formación de un anillo de lubricación adherente en el cilindro de los motores.</li> <li>• Espesantes y gelificantes del aceite lubricante.</li> </ul>
<b>Microemulsiones</b>	Microestructuras con dimensiones generalmente en el rango 1-150 nm, formadas de manera espontánea a partir de dos líquidos inmiscibles (aceite y alcohol).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena pulverización durante la combustión.</li> <li>• Viscosidades de combustible más bajas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor número de cetano.</li> <li>• Bajo contenido de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustión incompleta.</li> <li>• Formación de depósitos de carbón pesados.</li> <li>• Aumento de la lubricación del aceite.</li> </ul>
<b>Pirolisis</b>	Conversión de cadenas largas y sustancias saturadas en biodiesel por medio de calor.	Químicamente similar a los derivados de petróleo, gasolina y diésel.	Uso intensivo de energía durante el craqueo (mayores costes).	
<b>Transesterificación</b>	Reacción de un aceite o grasa con un alcohol en presencia de un catalizador para formar ésteres y glicerina.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renovable.</li> <li>• Mayor número de cetano.</li> <li>• Menos emisiones.</li> <li>• Alta eficiencia de combustión.</li> </ul>	Eliminación de subproductos (glicerina y aguas residuales).	

Fuente: Barros Piñero, X. (2015).

Los métodos que prometen mejores resultados, como se puede ver en la comparación realizada en tabla anterior, son la Pirolisis y transesterificación; estos serán sometidos

a una matriz de decisión, como se muestra en las siguientes tablas, para seleccionar el más conveniente.

Tabla II-7 Factores a evaluar y valores de ponderación.

Factor evaluado	Comentario	Ponderación del evaluador
Aplicabilidad del proceso	No es muy relevante en la selección, pero es deseable que el proceso pueda ser aplicado en las condiciones del lugar en el que se realizara el proyecto.	5
Complejidad del proceso	Lo más deseable es que el proceso seleccionado no sea de gran complejidad.	10
Costo	El costo de los reactivos, equipos, energía, etc. es de gran importancia.	15
Disponibilidad de la tecnología	Se considera uno de los factores más importantes al momento de la selección, porque de él depende la realización o no del proyecto.	30
Calidad del producto	Es un factor importante, debido a que se busca obtener un producto que cumpla con las características de las normas existentes de calidad del biodiesel.	20
Rendimiento	Así como la calidad del producto, el rendimiento que se pueda alcanzar con el proceso seleccionado es muy relevante.	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II-8 Matriz de decisión para el proceso de pirolisis.

N°	%	Proceso evaluado: pirolisis	Calificación 1=deficiente 2=adecuado 3=bueno 4=muy bueno	A	%*A
1	5	Aplicabilidad del proceso	2	0.5	2.5
2	10	Complejidad del proceso	1	0.25	2.5
3	15	Costo	2	0.5	7.5
4	30	Disponibilidad de la tecnología	2	0.5	15
5	20	Calidad del producto	4	1	20
6	20	Rendimiento	4	1	20
	<b>100</b>				<b>67.5</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II-9 Matriz de decisión para el proceso de transesterificación.

N°	%	Proceso evaluado: Transesterificación	Calificación 1=deficiente 2=adecuado 3=bueno 4=muy bueno	A	%*A
1	5	Aplicabilidad del proceso	4	1	5
2	10	Complejidad del proceso	4	1	10
3	15	Costo	2	0.5	7.5
4	30	Disponibilidad de la tecnología	4	1	30
5	20	Calidad del producto	3	0.75	15
6	20	Rendimiento	3	0.75	15
	<b>100</b>				<b>82.5</b>

Fuente: Elaboración propia.

De las matrices de decisión anteriores se puede observar que el método de transesterificación obtiene mayor puntaje y por lo tanto es más conveniente que el de pirolisis para la obtención de biodiesel.

En la tabla II-10 se muestra las ventajas y desventajas de la catálisis ácida y básica para el proceso de transesterificación.

Tabla II-10 Ventajas y desventajas de la catálisis ácida y básica.

Catálisis	Ventajas	Desventajas
Básica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de reacción alta.</li> <li>• Condiciones moderadas de presión y temperatura.</li> <li>• Menor costo.</li> <li>• Menor volumen de alcohol.</li> <li>• Menos corrosivos para los equipos industriales.</li> <li>• Mejores rendimientos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más difíciles de recuperar o separar.</li> <li>• Provocan aparición de jabón.</li> <li>• Incompatibilidad con la presencia de ácidos grasos libres.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El biodiesel presenta mejor calidad final.</li> </ul>	
Acida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos rendimientos.</li> <li>• Adecuados para aceites con altos niveles de ácidos grasos libres.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura y presión más alta</li> <li>• Reacción lenta.</li> <li>• Mayores cantidades de alcohol.</li> </ul>

Fuente: Bulla Pereira E., (2014); Vicente Pardal A., (2012) y Avellaneda Vargas F., (2010).

En las siguientes tablas se aplicará una matriz de decisión para la catálisis básica y ácida para seleccionar la más adecuada.

Tabla II-11 Factores a evaluar y valores de ponderación en la selección del catalizador.

Factor evaluado	Comentario	Ponderación del evaluador
Velocidad de reacción	Es relevante en la selección, debido a que es deseable que el tiempo para que transcurra la reacción no sea muy largo.	15
Compatibilidad con la presencia de ácidos grasos libres	Debido a que la materia prima AVU contiene mayor cantidad de ácidos grasos libres que el aceite virgen, este factor es considerable en la selección del catalizador.	15
Costo	El costo del catalizador no es de gran importancia debido a la poca cantidad que se requiere del mismo, es por esto que se le asigna una ponderación de	5
Temperatura y presión	Es un factor considerable debido a que depende de él la complejidad del proceso.	10
Calidad del producto	Es un factor importante, debido a que se busca obtener un producto que cumpla con las características de las normas existentes de calidad del biodiesel.	25
Rendimiento	Así como la calidad del producto, el rendimiento que se pueda alcanzar con el catalizador seleccionado es muy relevante.	30

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II-12 Matriz de decisión para catálisis básica.

Nº	%	Catalizador evaluado: Básico	Calificación 1=deficiente	A	%*A
----	---	------------------------------	------------------------------	---	-----

			2=adecuado 3=bueno 4=muy bueno		
1	15	Velocidad de reacción	4	1	15
2	15	Compatibilidad con la presencia de ácidos grasos libres	2	0.5	7.5
3	5	Costo	4	1	5
4	10	Temperatura y presión	4	1	10
5	25	Calidad del producto	4	1	25
6	30	Rendimiento	4	1	30
	<b>100</b>				<b>92.5</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II-13 Matriz de decisión para catálisis ácida.

Nº	%	Catalizador evaluado: Acido	Calificación 1=deficiente 3=adecuado 4=bueno 5=muy bueno	A	%*A
1	15	Velocidad de reacción	1	0.25	3.75
2	15	Compatibilidad con la presencia de ácidos grasos libres	4	1	15
3	5	Costo	2	0.5	2.5
4	10	Temperatura y presión	2	0.5	5
5	25	Calidad del producto	3	0.75	18.75
6	30	Rendimiento	3	0.75	22.5
	<b>100</b>				<b>67.5</b>

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis anterior se puede concluir que el mejor proceso para la obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado es la transesterificación básica, por lo tanto este será el proceso empleado en el presente trabajo de investigación.

## **2.10 Parámetros que afectan la producción de biodiesel**

Para llevar a cabo una transesterificación exitosa se deben tomar en cuenta los diferentes parámetros que afectan la reacción como lo son la relación molar alcohol/aceite, humedad, ácidos grasos libres, temperatura, agitación, tiempo de reacción y catalizador.

### **a) Relación molar**

La relación molar alcohol-aceite es una de las variables más importantes que afectan el rendimiento de la reacción. Según su estequiometría, la reacción de transesterificación requiere 3 moles de un alcohol y 1 mol de triglicéridos para dar 3 moles de éster monoalquílico de ácido graso y 1 mol de glicerina. Sin embargo, considerando que la reacción de transesterificación es un equilibrio químico, se puede conseguir un desplazamiento del mismo a la derecha utilizando relaciones metanol:aceite superiores a la estequiométrica. Cuando se utiliza un 100% de exceso de alcohol, la reacción transcurre a una alta velocidad llegándose también a altos rendimientos de ésteres metílicos.

### **b) Humedad**

La presencia de agua en el aceite disminuye el rendimiento del biodiesel, debido a la presencia de los ácidos grasos, por lo tanto, la materia prima debe ser libre de agua. La presencia de humedad en el aceite provoca la formación de jabón, consume catalizador y reduce la eficacia de los catalizadores.

### **c) Ácidos grasos libres**

Los ácidos grasos libres (AGL) son los ácidos monocarboxílicos saturados o insaturados que están presentes en las grasas o aceites pero no están conectados a la estructura de la glicerina. Mayor cantidad de ácidos grasos libres conduce a mayor índice de acidez.

El contenido de ácidos grasos libres (AGL) debe ser menor al 2%, debido a que en el proceso de transesterificación alcalina los ácidos reaccionan con el catalizador alcalino y tienden a formar jabón en lugar de ésteres metílicos.

#### **d) Temperatura**

La reacción de transesterificación es llevada a cabo en torno al punto de ebullición del alcohol, puesto que, al aumentar la temperatura del medio de reacción, se produce un aumento de la solubilidad del metanol en el aceite, originando una mayor velocidad de reacción. También se ha de tener en cuenta que dicho aumento de la temperatura se traducirá en mayores tasas de saponificación o cualquier otra reacción secundaria.

La temperatura influye claramente en la reacción de transesterificación y en el rendimiento del producto biodiesel. Una temperatura elevada puede disminuir la viscosidad del aceite, dando lugar a un aumento de la velocidad de reacción y a una disminución del tiempo de reacción. Sin embargo algunos autores mostraron que cuando la temperatura de reacción aumenta por encima del nivel óptimo, la conversión en biodiesel disminuye porque elevadas temperaturas de reacción aceleran la reacción de saponificación de los triglicéridos. La temperatura de reacción debe ser menor que el punto de ebullición del alcohol para asegurar que este no se pierde por vaporización.

#### **e) Velocidad de agitación**

Al inicio de la reacción, los triglicéridos y el metanol forman dos fases inmiscibles. Dado que la concentración de triglicéridos en metanol es baja, el rendimiento inicial de la reacción es bajo. Por lo tanto, en los momentos iniciales, la reacción es controlada por el mecanismo de transferencia de materia. La agitación es necesaria para aumentar el grado de mezcla de las dos fases y aumentar la velocidad de la transesterificación.

A medida que los triglicéridos se convierten en ésteres de ácidos grasos, disminuye la viscosidad de la mezcla de reacción, produciéndose un aumento en la velocidad de la misma, y según avanza la reacción y más ésteres alquílicos se producen, se forma una única fase, los efectos de la mezcla van disminuyendo, el régimen de la reacción cambia a control cinético y la velocidad de reacción estará controlada principalmente

por la temperatura. Por tanto, incrementando el grado de mezcla y la temperatura se obtendrán altas velocidades de reacción.

#### **f) Tiempo de reacción**

El porcentaje de conversión se incrementa con el tiempo de reacción. El rendimiento de la transesterificación es directamente proporcional al tiempo de reacción, sin embargo, puede variar dependiendo del tipo de aceite comestible usado y del catalizador que se utilice. La formación de metilésteres es abundante en los primeros minutos con una buena agitación y condiciones óptimas, pero es casi nula con el avance de la reacción después de 90 minutos.

#### **g) Cantidad de catalizador**

Los catalizadores son clasificados como: álcalis, ácidos o enzimas. La transesterificación con catalizador alcalino es mucho más rápida que la catalizada con ácido. Los ácidos son ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico o ácido sulfónico orgánico. Los álcalis incluyen hidróxido de sodio, metóxido de sodio, hidróxido de potasio, metóxido de potasio.

El hidróxido de sodio es más efectivo que el metóxido de sodio debido a que se supone que una pequeña cantidad de agua se produce mezclando NaOH y MeOH. El hidróxido de sodio también se prefiere para catalizar las transesterificaciones porque es más económico. Las conversiones a éster a una relación molar 6:1 para 1% de NaOH es un tiempo 60 minutos. La transesterificación, usando 1% de ácido sulfúrico concentrado, es insatisfactoria cuando la relación molar son 6:1.

## **CAPITULO III**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

#### **3.1 Introducción**

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) perteneciente al Departamento de Procesos Industriales Biotecnológicos y Ambientales (DPIBA) de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Los datos experimentales y parámetros que se obtengan de la materia prima, aceite vegetal usado, servirán como guía y como datos iniciales para la obtención del biodiesel.

#### **3.2 Recolección de la materia prima**

La materia prima fue recolectada en septiembre del 2018, de diferentes locales dedicados a la venta de comida rápida ubicados en San Lorenzo y en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho del departamento de Tarija.

La recolección del aceite se realizó en los mismos envases en los que se adquiere el aceite antes de ser usado (PET), para lo cual se tuvo en cuenta su coloración que nos permite saber que el aceite no haya sido reutilizado en exceso, se consultó la marca de aceite que es usada generalmente siendo esta la marca "Fino". La cantidad de AVU recolectada fue de 10 litros aproximadamente.

#### **3.3 Caracterización fisicoquímica de la materia prima**

Después de la recolección de la materia prima se procedió a su caracterización, para determinar propiedades físicas y químicas de este desecho (índice de acidez, densidad, viscosidad y porcentaje de humedad).

##### **3.3.1 Determinación del índice de acidez**

El índice de acidez fue determinado siguiendo la Norma Boliviana NB 34004. Los ácidos grasos libres presentes en una solución de aceite y alcohol etílico son determinados por titulación con solución de NaOH, estandarizada en el Centro de

Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), utilizando fenolftaleína como indicador.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Pesar 28.2 g de muestra de aceite vegetal usado, mezclarlo con 50 ml de alcohol y agregar 2 ml de indicador.

Titular con el estándar de hidróxido de sodio, agitando vigorosamente hasta que aparezca la primera indicación de color rosa permanente.

Expresión de los resultados:

El porcentaje de ácidos grasos libres en la mayoría de los tipos de grasas y aceites se calcula como ácido oleico (Norma Boliviana NB 34004).

$$I_a = \frac{mL \text{ de alcali} \times N \times 28.2}{M} \quad (3-2)$$

Datos:

$$N = 0.09052 \text{ eq} - g/l$$

$$M = 28.123 \text{ g}$$

$$mL_{\text{alcali}} = 1.8 \text{ ml}$$

$$I_a = \frac{1.8 \text{ ml} \times 0.09052 N \times 28.2}{28.193 \text{ g}}$$

$$I_a = 0.1629 \%$$

Figura 3- 1 Determinación del índice de acidez del AVU



Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.3.2 Determinación de la densidad

Para medir de la densidad se utiliza el principio de flotación de Arquímedes mediante el método del aerómetro (densímetro de inmersión). La muestra que se va a analizar se trasvasará a una probeta y debe estar a la temperatura de graduación del instrumento (15°C). Se introduce el aerómetro en la muestra y se deja estabilizar. Una vez alcanzado el equilibrio térmico se lee en la escala del aerómetro la gravedad específica y multiplicándose por la densidad del agua a 4 °C se obtiene la densidad de la sustancia.

La densidad del aceite vegetal usado leída en el aerómetro es de 0.8839 g/ml o 883.9 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.3 Determinación de la viscosidad

La viscosidad fue determinada mediante el viscosímetro rotacional Raypa, la muestra de aceite vegetal usado se introdujo en un vaso de precipitados de 500 ml, se seleccionó el usillo adecuado consultando previamente en las tablas de selección del manual del equipo y se deja que el aparato calcule la viscosidad dinámica.

Figura 3- 2 Determinación de la viscosidad del AVU



Fuente: Elaboración propia, (2019).

Los resultados obtenidos de las mediciones fueron: 185 mPas

Con el dato de la densidad del AVU determinado anteriormente y haciendo uso de la fórmula de la viscosidad cinemática (Bird, Stewart y Lightfoot, pag.1-6), se obtiene:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3-3)$$

$$\nu = \frac{185 \times 10^{-3} \text{ Pas}}{883.9 \text{ kg/m}^3}$$

$$\nu = 2.093 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu = 2.093 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \times \frac{1 \times 10^6 \text{ cSt}}{1 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\nu = 209.3 \text{ cSt}$$

### 3.3.4 Determinación del porcentaje de humedad y volátiles

La determinación de humedad y volátiles se realiza siguiendo la Norma Boliviana NB 34010 (Determinación de humedad y material volátil de aceites y grasas), se pesa aproximadamente 25 gr de muestra de aceite vegetal usado en un vaso de precipitados previamente secado y tarado, la muestra se introdujo a una estufa a una temperatura superior a los 100 °C y se pesa cada 10 min hasta que el peso sea constante, lo que indica que ya se ha eliminado toda el agua y los volátiles. Finalmente, con la siguiente fórmula se halla el porcentaje de humedad:

$$\% \text{Humedad} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (3-4)$$

Datos:

$$m_{\text{inicial}} = 25.465 \text{ g}$$

$$m_{\text{final}} = 25.405 \text{ g}$$

$$\% \text{Humedad} = \frac{25.465 \text{ g} - 25.405 \text{ g}}{25.465 \text{ g}} \times 100$$

$$\%Humedad = 0.235 \%$$

$$contenido\ de\ agua = \frac{25465\ mg - 25405\ mg}{0.0254\ kg}$$

$$Contenido\ de\ agua = 2362.2\ mg/kg$$

### 3.4 Determinación de las cantidades de reactivos

#### 3.5 Metanol

Primeramente se debe determinar la masa promedio de ácidos grasos y la masa promedio de triglicéridos para calcular la cantidad de metanol. Un aspecto importante en esta parte es identificar cual es la naturaleza del aceite usado. El aceite usado de fritura es marca ‘Fino’ el cual tiene como aceite principal el aceite de soja. Utilizando los datos obtenidos en la Tabla II-3, se elabora la Tabla III-1, siguiendo el siguiente procedimiento:

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

$$M_{AG\ Miristico} = (M_{Carbono} \times N^{\circ}_{Carbonos}) + (M_{Hidrogeno} \times N^{\circ}_{Hidrogenos}) + (M_{Oxigeno} \times N^{\circ}_{Oxigenos}) \quad (3-5)$$

$$M_{AG\ Miristico} = \left(12.011 \frac{g}{mol} \times 14\right) + \left(1.00794 \frac{g}{mol} \times 28\right) + \left(15.9994 \frac{g}{mol} \times 2\right)$$

$$M_{AG\ Miristico} = 228.37\ g/mol$$

Posteriormente se determina la masa molar de cada uno de los triglicéridos (TG) que componen el aceite:

$$M_{TG} = ((M_{AG} - 1) \times 3) + 41 \quad (3-6)$$

$$M_{TGLaurico} = ((228.31\ g/mol - 1) \times 3) + 41$$

$$M_{TGLaurico} = 723.1\ g/mol$$

Obtenidas todas las  $M_{TG}$  se determinará la masa exacta del AG y de TG en el aceite.

$$M_{TG} = M_{TG} x \frac{\%p/p TG}{100} \quad (3-7)$$

$$M_{AG} = 228.37 \frac{g}{mol} x \frac{0.1}{100}$$

$$M_{AG} = 0.23 \text{ g/mol}$$

$$M_{TG} = 723.1 \frac{g}{mol} x \frac{0.1}{100}$$

$$M_{TG} = 0.72 \text{ g/mol}$$

Al conseguir todas las masas molares exactas se obtiene el promedio AG y TG para el aceite usado de fritura de soja.

Tabla III-1 Composición ácidos grasos del aceite vegetal usado.

Ácidos grasos	Formula	Contenido % p/p	Aceite usado de fritura			
			Masa Molar AG (g/mol)	Masa Molar TG (g/mol)	Masa Molar AG (g/mol)	Masa Molar TG (g/mol)
Mirístico (C14:0)	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	0.1	228.37	723.10	0.23	0.72
Palmítico (C16:0)	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	12.2	256.42	807.27	31.28	98.49
Estearico (C18:0)	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	2.5	284.48	891.43	7.10	22.29
Oléico (C18:1)	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	21.5	282.46	885.39	60.73	190.36
Linoléico (C18:2)	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	56.6	280.44	879.34	158.73	497.80
Linolénico (C18:3)	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	7.1	278.43	873.29	19.77	62.00
Total	-	100	-	-	277.84	871.66

Fuente: Elaboración propia, (2018).

El primer reactivo que se trabajará será el metanol para este caso según el diseño de experimentos se empleara dos relaciones molares 1:5; 1:7 (Pereira Bulla E., 2014). El siguiente procedimiento se desarrollara solo para la primera relación planteada ya que

el mismo proceso se efectuará para la otra relación, por lo cual de la segunda sólo se darán los resultados. Los pasos que se desarrollan son:

Determinar la cantidad del volumen de aceite para un mol de aceite:

$$\rho_{Aceite} = \frac{M_{TG}}{V_{aceite}} \quad (3- 8)$$

$$V_{aceite} = \frac{M_{TG}}{\rho_{Aceite}}$$

$$V_{aceite} = \frac{871.7 \text{ g}}{0.8839 \text{ g/ml}}$$

$$V_{aceite} = 986.197 \text{ ml}$$

Determinar el volumen de Metanol para un mol de metanol:

$$\rho_{Metanol} = \frac{M_{Metanol}}{V_{Metanol}} \quad (3- 9)$$

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

Dónde:

$$M_{Metanol} = 32.04 \text{ g/mol}$$

$$\rho_{Metanol} = 0.7918 \text{ g/ml}$$

$$V_{Metanol} = \frac{32.04 \text{ g/mol}}{0.7918 \text{ g/ml}}$$

$$V_{Metanol} = 40.4647 \text{ ml}$$

Se determinara la cantidad de metanol requerida para transesterificar 760 ml de aceite vegetal usado con la siguiente relación estequiométrica:

$$V_{aceite \text{ definido}} \times \frac{1 \text{ mol}_{aceite}}{V_{aceite}} \times \frac{5 \text{ mol}_{Metanol}}{1 \text{ mol}_{aceite}} \times \frac{V_{Metanol}}{1 \text{ mol}_{Metanol}} \quad (3- 10)$$

$$760 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ mol}_{aceite}}{986.197 \text{ ml}} \times \frac{5 \text{ mol}_{Metanol}}{1 \text{ mol}_{aceite}} \times \frac{40.4647 \text{ ml}}{1 \text{ mol}_{Metanol}} = 155.918 \text{ ml}$$

El cálculo de la estequiometria establece que para un volumen de 760 ml de AVU y una relación molecular de 1 mol de aceite y 5 moles de metanol se requiere un volumen de 155.918 ml de metanol para obtener una reacción de transesterificación completa.

Realizando los mismos cálculos para un volumen de 720 ml de AVU y una relación molecular de 1 mol de aceite y 7 moles de metanol, se requiere un volumen de 206.808 ml de metanol para obtener una reacción de transesterificación completa.

### 3.6 Catalizador (NaOH)

La cantidad de catalizar es también una proporción variable en los ensayos ya que depende del porcentaje que se determine según los cálculos estequimetricos. Se empleara 0.5% en peso de catalizador. El NaOH es en escamas con una pureza del 98%. La cantidad de NaOH está dado por:

$$m_{NaOH} = m_{Aceite} \times \% \text{ catalizador} \quad (3- 11)$$

Dónde:

$$m_{Aceite} = V_{Aceite} \times \rho_{Aceite} \quad (3- 12)$$

$$m_{Aceite} = 760 \text{ mL} \times 0.8839 \text{ g/mL}$$

$$m_{Aceite} = 671.764 \text{ g}$$

$$m_{NaOH} = 671.764 \text{ g} \times 0.005 = 3.35882 \text{ g}$$

Determinar el exceso de NaOH. Esta cantidad tiene la finalidad de neutralizar los ácidos grasos libres contenido en la fase esterificada. Con la siguiente relación estequiométrica se determina este exceso:

$$m_{Aceite} \times \frac{\%AGL}{100\%} \times \frac{1 \text{ mol}_{AG}}{M_{AG}} \times \frac{1 \text{ mol}_{NaOH}}{1 \text{ mol}_{AG}} \times \frac{M_{NaOH}}{1 \text{ mol}_{NaOH}} \quad (3- 13)$$

Dónde:

$$M_{NaOH} = 39.997 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$671.764 \text{ g} \times \frac{0.1632}{100\%} \times \frac{1 \text{ mol}_{AG}}{277.8 \text{ g/mol}} \times \frac{1 \text{ mol}_{NaOH}}{1 \text{ mol}_{AG}} \times \frac{39.997 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol}_{NaOH}} \\ = 0.1578 \text{ g de NaOH}$$

La cantidad de NaOH total:

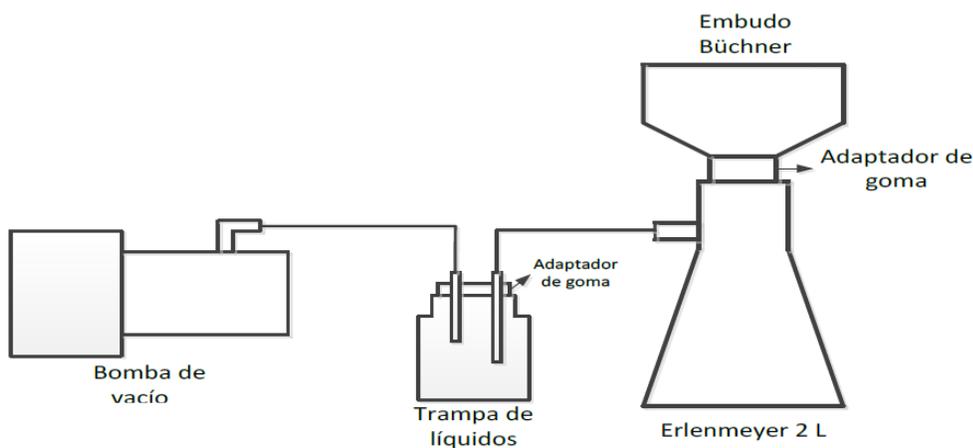
$$mT_{NaOH} = m_{NaOH \text{ al } 0.5\%} + \text{Exceso de NaOH} \quad (3-14)$$

$$mT_{NaOH} = 3.3588 \text{ g} + 0.1578 \text{ g} = 3.5176 \text{ g}$$

### 3.7 Preparación de la materia prima

Para eliminar restos de partículas sólidas presentes en el aceite, se realizó la filtración al vacío a través de un papel filtro de 10 L de aceite. Para facilitar la filtración, el aceite se calentó a 80 °C con el fin disminuir la viscosidad. En la Figura 2-3 se puede observar el esquema del montaje para realizar el proceso de filtración.

Figura 3- 3 Esquema del proceso de filtración a vacío



Fuente: Bulla Pereira, A. E. (2014).

### 3.8 Transesterificación

La reacción de transesterificación se llevará a cabo en un balón de 2 bocas utilizado como reactor. Previamente se colocó un tapón de goma en una de las bocas del balón posteriormente se tara el balón y se pesó en él la cantidad necesaria de catalizador, terminado de pesar se tapa la segunda boca para así evitar que el NaOH absorba humedad del ambiente.

El aceite vegetal fue medido en una probeta de 1000 ml y trasvasado al reactor con la ayuda de un embudo, el metanol se midió en una probeta de 500 ml bajo campana de extracción para evitar inhalar vapores de este reactivo tóxico, de igual modo se lo trasvasa al balón con la ayuda de un embudo y se tapa la boca del reactor para evitar la volatilización del metanol.

Seguidamente, se coloca el reactor a baño María y se acopla el condensador al reactor mediante la boca superior, por la segunda boca se coloca un termómetro para medir la temperatura a la que se encuentran los reactivos.

Se procede a calentar la mezcla hasta alcanzar la temperatura de reacción requerida, procurando no sobrepasar dicha temperatura, luego se deja transcurrir la reacción por el tiempo definido para el ensayo en cuestión.

Alcanzado el tiempo necesario de reacción se deja enfriar los productos de reacción y se procede a la separación de los mismos en una ampolla de separación.

Figura 3- 4 Equipo de obtención de biodiesel



Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.9 Decantación

La decantación se realiza en 2 ampollas de separación de 250 ml c/u, en las cuales se trasvasaba los productos de la reacción con la finalidad de separar la glicerina del biodiesel obtenido, la fase inferior (biodiesel) fue recogida en frasco de vidrio para posterior refinación y la fase superior (Glicerina) se recogió en una botella PET, en total se recogió aproximadamente 1500 ml de glicerina.

Figura 3- 5 Separación de la glicerina del biodiesel



Fuente: Elaboración propia, (2019).

### **3.10 Purificación del biodiesel**

Para la purificación del biodiesel, ya que aún contiene restos de metanol, glicerina, catalizador y jabones que se formaron, se adiciona agua destilada previamente calentada a baño María en un volumen igual a un tercio del volumen de biodiesel, se agita manualmente y se deja de nuevo en el embudo de decantación; permitiendo la separación de fases y descartando la fase acuosa.

El proceso se repite hasta alcanzar un valor de pH del agua de lavado cercano a la neutralidad. Terminado el proceso de separación, el producto se calienta a 110 °C (Avellaneda Vargas F., 2010) para evaporar el agua que podía estar presente hasta que no se observen burbujas de agua que hierva. Una vez deshidratado, se almacena a 4 °C.

Figura 3- 6 Lavado del biodiesel



Fuente: Elaboración propia, (2019).

### **3.11 Caracterización fisicoquímica del producto obtenido**

#### **3.11.1 Determinación del porcentaje de humedad y volátiles**

Para la determinación de humedad y volátiles se pesa aproximadamente 50 gr de muestra de biodiesel en un vaso de precipitados previamente secado, la muestra se introdujo a una estufa a una temperatura superior a los 100 °C y se pesa cada 10 min

hasta que el peso sea constante, lo que indica que ya se ha eliminado toda el agua y los volátiles.

Figura 3- 7 Estufa utilizada para determinación de humedad



Fuente: Elaboración propia, (2019).

Finalmente, con la siguiente fórmula se halla el porcentaje de humedad:

$$\%Humedad = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (3- 15)$$

El cálculo se realizara solo para la primera muestra, para las demás muestras el procedimiento es el mismo:

$$\%Humedad = \frac{57.616 \text{ gr} - 57.559 \text{ gr}}{57.616 \text{ gr}} \times 100$$

$$\%Humedad = 0.0989 \text{ gr}$$

Para las demás muestras el porcentaje de humedad es:

Tabla III-2 Porcentaje de humedad de muestras de biodiesel.

Código de muestra	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	% de humedad
B1	25.102	25.094	0.03186
B2	23.008	22.996	0.04823
B3	22.137	22.126	0.04969
B4	26.498	26.488	0.03773
B5	22.643	22.638	0.02208
B6	27.572	27.563	0.03264
B7	31.598	31.586	0.03797
B8	23.899	23.896	0.01255
R1	27.704	27.699	0.01479
R2	22.728	22.719	0.03960
R3	23.973	23.966	0.02795
R4	25.375	25.364	0.04334
R5	19.150	19.141	0.04399
R6	24.485	24.473	0.04900
R7	22.343	22.337	0.02360
R8	26.987	26.980	0.02593

B.- primera replica

R.- Segunda replica

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.11.2 Determinación de la densidad

La densidad relativa es la densidad de una sustancia relacionada a la de otra sustancia de referencia a temperatura y presión definidas. Generalmente, para líquidos la sustancia de referencia es el agua y para gases el aire. La densidad relativa es un número abstracto sin dimensiones.

El método consiste en determinar la masa a volúmenes iguales de agua y de biodiesel que se utilizarán para calcular la relación entre ambos valores, bajo condiciones específicas de temperatura.

Se determina la masa del picnómetro completo con la precisión de 0,1 mg; se llena con agua destilada evitando la formación de burbujas de aire, se coloca el termómetro y se deja destapada la rama del capilar.

Se sumerge en un baño de agua a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 30 min controlando la temperatura del baño con el termómetro del picnómetro; cuando se alcance la temperatura deseada se enrasa la rama capilar del picnómetro con agua destilada a la

misma temperatura y se tapa; se extrae del baño, se limpia, se seca exteriormente y se determina su masa con la precisión de 0,1 mg.

El picnómetro se vacía y luego se lava con agua destilada. Se seca interiormente utilizando una corriente de aire seco y exteriormente con un paño seco o con papel filtro.

Se llena el picnómetro con el biodiesel, evitando la formación de burbujas de aire; se coloca el termómetro y se deja destapada la rama del capilar, se sumerge en el baño de agua a  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 30 min controlando la temperatura del baño con el termómetro del picnómetro.

Cuando se alcance la temperatura deseada, se enrasa la rama del capilar del picnómetro con el aceite o grasa vegetal o animal a la misma temperatura y se tapa, después se procede como se detalla para el agua destilada.

La densidad relativa se calcula con las siguientes expresiones:

$$G_1 = M_1 - M \quad (3- 16)$$

$$G_2 = M_2 - M \quad (3- 17)$$

$$\delta = \frac{G_1}{G_2} \quad (3- 18)$$

$$\delta = \frac{M_1 - M}{M_2 - M} \quad (3- 19)$$

En donde:

$M_1$  – Masa del picnómetro con muestra

$M_2$  – Masa del picnómetro con agua

$M$  – Masa del picnómetro vacío

$G_1$  – Masa neta del biodiesel

$G_2$  – Masa neta del agua

$\delta$  – Densidad relativa del biodiesel

Determinación de la densidad del agua destilada:

$$M_2 = 47.276$$

$$M = 22.518$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{M_2 - M}{V} \quad (3- 20)$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{47.276 \text{ g} - 22.518 \text{ g}}{25 \text{ ml}}$$

$$\rho_{H_2O} = 0.99032 \text{ g/ml}$$

Cálculo de la densidad relativa para la muestra B1:

Primera determinación:

$$M_1 = 45.3179$$

$$M_2 = 47.276$$

$$M = 22.518$$

$$\delta = \frac{45.3179 - 22.518}{47.276 - 22.518}$$

$$\delta = 0.92091$$

$$\rho_{B1} = \delta \times \rho_{H_2O} \quad (3- 21)$$

$$\rho_{B1} = 0.92091 \times 0.99032 \text{ g/ml}$$

$$\rho_{B1} = 0.911996 \text{ g/ml}$$

Segunda determinación:

$$M_1 = 45.3178$$

$$M_2 = 47.276$$

$$M = 22.518$$

$$\delta = \frac{45.3178 - 22.518}{47.276 - 22.518}$$

$$\delta = 0.92090$$

$$\rho_{B1} = \delta x \rho_{H2O} \quad (3- 22)$$

$$\rho_{B1} = 0.92090 x 0.99032 \text{ g/ml}$$

$$\rho_{B1} = 0.911992 \text{ g/ml}$$

El procedimiento para calcular la densidad de las demás muestras de biodiesel es el mismo, en la Tabla III-3 se muestran los resultados de las densidades para todas las muestras:

Tabla III-3 Densidad de muestras de biodiesel.

<b>Código demuestra</b>	<b><math>\rho_{Bi}</math> (Primera medición)</b>	<b><math>\rho_{Bi}</math> (Segunda medición)</b>	<b><math>\rho_{Bi}</math> (<i>Promedio</i>)</b>
B1	0.91199	0.91199	0.91199
B2	0.91760	0.91748	0.91754
B3	0.92536	0.92528	0.92532
B4	0.91872	0.91871	0.91872
B5	0.92472	0.92472	0.92472
B6	0.91748	0.91732	0.91740
B7	0.91887	0.91887	0.91887
B8	0.91951	0.91948	0.91950
R1	0.91468	0.91480	0.91474
R2	0.92520	0.92512	0.92516
R3	0.91868	0.91876	0.91872
R4	0.91467	0.91470	0.91469
R5	0.91984	0.91996	0.91990
R6	0.91534	0.91538	0.91536
R7	0.92832	0.92836	0.92834
R8	0.91689	0.91678	0.91684

B.- primera replica

R.- Segunda replica

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.11.3 Determinación de la viscosidad

La viscosidad fue determinada mediante el viscosímetro rotacional Raypa, se seleccionó el husillo adecuado para medir bajas viscosidades con ayuda de las tablas de selección disponibles en el manual del equipo y teniendo en cuenta que el porcentaje de fondo de escala sea  $<10\%$  y  $>90\%$ , el husillo adecuado fue el R2 el cual se introduce en la muestra de biodiesel contenida en un frasco de vidrio y se deja que el aparato calcule la viscosidad dinámica.

Figura 3- 8 Equipo para la determinación de la viscosidad dinámica



Fuente: Elaboración propia, (2019).

Los resultados obtenidos de la viscosidad dinámica son utilizados junto a la densidad para calcular la viscosidad cinemática de cada muestra de biodiesel.

Tabla III-4 Viscosidad dinámica y cinemática de muestras de biodiesel.

Código	$\mu$ (mPas)	$\rho_{Bi}$ (Promedio)	$\nu = \mu/\rho$
--------	--------------	------------------------	------------------

de Muestra			(mm <sup>2</sup> /s)
B1	174	0.91199	190.792
B2	177	0.91754	192.907
B3	190	0.92532	205.334
B4	172	0.91872	187.217
B5	182	0.92472	196.816
B6	168	0.91740	183.126
B7	170	0.91887	185.010
B8	174	0.91950	189.233
R1	179	0.91474	195.684
R2	176	0.92516	190.237
R3	185	0.91872	201.367
R4	180	0.91469	196.788
R5	178	0.91990	193.499
R6	178	0.91536	194.459
R7	185	0.92834	199.280
R8	175	0.91684	190.873

B.- Primera replica

R.- Segunda replica

Fuente: Elaboración propia, (2019).

#### 3.11.4 Determinación del índice de acidez

El índice de acidez se define como los mg de hidróxido de potasio necesarios para neutralizar 1 g de muestra. Para la determinación de los ácidos presentes en la muestra se hace una neutralización de estos utilizando una base, con la ayuda de un indicador en la muestra se puede evidenciar el punto en el que se neutralizan los ácidos presentes en la muestra con la cantidad de base gastada para neutralizarlos (Pereira Bulla E., 2014).

La determinación del índice de acidez fue realizada por titulación ácido-base de muestras de 5 g aproximadamente de biodiesel, disueltos en 50 ml de solución acuosa de i-propanol y etanol, utilizando 3 gotas de fenolftaleína como indicador y una solución de KOH 0,1 N de concentración estandarizada en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID).

Figura 3- 9 Titulación ácido base del biodiesel



Fuente: Elaboración propia,(2019).

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

$$mgKOH = N_{desolución\ KOH} \times \frac{56.11\ gKOH}{1\ eq - gKOH} \times mlKOH \quad (3- 23)$$

$$mgKOH = 0.1 \frac{eq - gKOH}{l} \times \frac{56.11\ gKOH}{1\ eq - gKOH} \times 0.6\ ml$$

$$mgKOH = 3.366\ mg$$

$$Indice\ de\ acidez = \frac{3.366\ mgKOH}{6.214\ g}$$

$$Indice\ de\ acidez = 0.542 \frac{mg\ KOH}{g\ de\ biodisel}$$

El procedimiento para determinar el índice de acidez de las demás muestras es el mismo, los resultados se muestran en la Tabla III-5:

Tabla III-5 Índice de acidez de las muestras de biodiesel.

<b>Muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>mg KOH/g de muestra</b>	0.542	0.264	0.462	0.251	0.385	0.210	0.295	0.378
<b>Muestra (Replica)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>mg KOH/g de muestra</b>	0.514	0.212	0.328	0.299	0.380	0.121	0.349	0.171

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.12 Descripción de equipos, materiales y métodos utilizados

#### 3.12.1 Estufa

Este equipo fue utilizado para evaporar el agua y sustancias volátiles de las muestras de análisis del producto obtenido (Biodiesel). La cual consta de un regulador de temperatura que va desde la distribución de calor en su interior es por conducción.

Tabla III-6 Características de la Estufa utilizada.

Especificaciones técnicas		Fotografía
Marca	Heraeus	
Rango de temperatura	10 °C a 250 °C	
Potencia	0.3 kW	
Peso	33 kg	
Espacio útil	43 l	

Fuente: Elaboración propia, (2019).

#### 3.12.2 Balanza Analítica

Esta balanza se utilizó en el análisis de la materia prima (aceite vegetal usado) y en el proceso de obtención del biodiesel para pesar las cantidades de catalizador.

Tabla III-7 Características de la balanza analítica.

Especificaciones técnicas		Fotografía
Marca	KERN	
Capacidad máxima	120 g	
Sensibilidad	1 mg	

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.12.3 Balanza

Esta balanza se utilizó en el análisis de humedad y índice de acidez del producto (biodiesel) la cual fue útil para analizar todas las muestras a analizar.

Tabla III-8 Características de la balanza.

Especificaciones técnicas		Fotografía
Marca	GIBERTINI	
Precisión	0.001 g	
Capacidad máxima	510 g	
Temperatura de funcionamiento	+15 °C/+30 °C	

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.12.4 Viscosímetro

El viscosímetro se utiliza para determinar la viscosidad de la materia prima (AVU) y el producto obtenido (Biodiesel). El principio de funcionamiento se basa en la viscosimetría rotacional; mide la viscosidad captando el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante una aguja inmersa en la muestra de fluido a estudiar.

Tabla III-9 Características del viscosímetro.

Especificaciones técnicas		Fotografía
Marca	Raypa	
Velocidades	0.3 a 200 rpm	
Precisión	$\pm 1$ % del fondo de escala	
Reproductibilidad	$\pm 0.2$ %	
Rango de temperatura	- 15 °C a +180 °C	
Red eléctrica	100-240 V	

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.12.5 Calentador con agitador magnético

Este equipo se utiliza para calentar y agitar la mezcla de reacción en el proceso de obtención del biodiesel, también se utiliza para secar el biodiesel luego del lavado. Consta de un regulador de temperatura y otro regulador de la velocidad del agitador.

Tabla III-10 Características del agitador magnético.

Especificaciones técnicas		Fotografía
Marca	Agimatic	
Potencia	630 W	
Temperatura máxima	350 °C	
Rango de Velocidad de agitación	60 a 1600 rpm	
Peso	4.0 kg	

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.12.6 Bomba de vacío

La bomba de vacío fue utilizada el proceso de adecuación de la materia prima, generando vacío en el matraz kitasato para filtrar el aceite vegetal usado.

Tabla III-11 Características del agitador magnético.

Especificaciones técnicas		Fotografía
Marca	Telstar	
Número de etapas	2	
Caudal nominal	3 a 3.6 m <sup>3</sup> /h	
Potencia del motor	0.4 kW	
Velocidad de rotación	2800 a 3400 rpm	
Peso	7 kg	
Temperatura ambiente mínima y máxima	5-40°C	

Fuente: Elaboración propia, (2019).

### 3.13 Sustancias/Reactivos empleados

- Metanol (CH<sub>4</sub>O)
- Hidróxido de Sodio (NaOH)
- Aceite
- Agua destilada
- Etanol (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH) al 95 %
- Fenolftaleína (C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub>)
- Isopropanol
- Disolución 0,05 M de hidróxido de potasio (KOH) en etanol

### 3.14 Materiales/Equipos empleados

- Reactor (Matraz de 2 bocas).
- Condensador
- Calentador con agitador magnético.
- Bomba de vacío.
- Matraz kitasato.

- Embudo buchner.
- Adaptador de goma.
- Trampa de líquido.
- Ampolla de separación.
- Termómetro.
- Vasos de precipitado de 250ml.
- Vasos de precipitado de 100 ml.
- Soporte universal.
- Pinza doble nuez.
- Embudo.
- Probetas de 100 ml.
- Pipeta
- Varilla de agitación.
- Estufa.
- Viscosímetro.
- Picnómetro.
- Balanza analítica
- Espátula
- Vidrio reloj
- pH-metro

### **3.15 Métodos empleados**

- Filtración: Adecuación de la materia prima
- Transesterificación
- Separación por decantación y purificación del biodiesel
- Humedad y volátiles
- Determinación de la densidad por el método del densímetro de inmersión
- Determinación de la viscosidad
- Indicé de acidez del aceite vegetal usado mediante la Norma Boliviana NB 34004

- Índice de acidez del biodiesel.

### 3.16 Diseño Experimental

El diseño de experimentos es una técnica estadística que nos ayuda a identificar qué factores o variables afectan el comportamiento de un proceso productivo y de esta manera poder mejorarlo.

El diseño factorial completo  $2^k$  describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen  $k$  factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian).

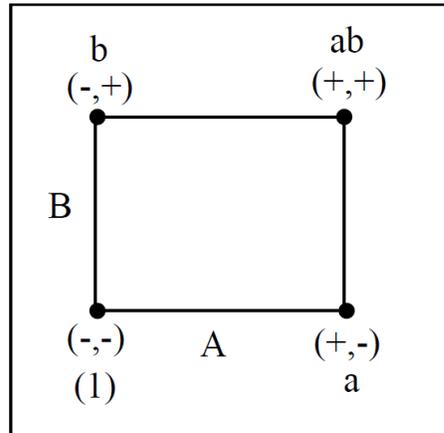
El número de corridas a realizarse en el experimento es  $2^k \times \#$  réplicas. Además, también es importante que el orden en que se realizan las corridas sea aleatorio, es por esto que el experimento es un experimento completamente aleatorio.

Muchas veces resulta conveniente escribir los datos en orden descendente de las combinaciones de los tratamientos. Esta forma de tabular se le conoce como el orden estándar y es como sigue:

A	B	Combinación de Tratamientos	Nomenclatura de Tratamientos
-	-	A bajo, B bajo	$\begin{matrix} 0 & 0 \\ a & b \end{matrix} = (1)$
+	-	A alto, B bajo	$\begin{matrix} 1 & 0 \\ a & b \end{matrix} = a$
-	+	A bajo, B alto	$\begin{matrix} 0 & 1 \\ a & b \end{matrix} = b$
+	+	A alto, B alto	$\begin{matrix} 1 & 1 \\ a & b \end{matrix} = ab$

Cuando el factor está en su nivel bajo su exponente es 0 y cuando el factor está en su nivel alto su exponente es 1. Gráficamente esta nomenclatura es representada de la siguiente manera:

Figura 3- 10 Representación gráfica DOE



En un diseño factorial  $2^k$  es fácil expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión, la ecuación para un modelo de regresión sería:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (3- 24)$$

### 3.16.1 Pasos para determinar el diseño factorial

El diseño factorial comprende los siguientes pasos:

- Elección de la respuesta a medir
- Elección de las variables objeto de estudio
- Elección del intervalo de dichas variables
- Planificación de experimentos
- Realización de los experimentos y recolección de datos
- Análisis de los datos experimentales

### 3.16.2 Elección de la variable a medir (variable respuesta)

Para esta investigación se estableció como variable de respuesta el rendimiento obtenido en el proceso de producción. Esta respuesta es la relación entre la masa de

biodiesel producida (Refinado) y la masa de aceite usado de fritura empleado para su producción.

### 3.16.3 Elección de las variables de operación (Factores)

Como se mencionó anteriormente, la reacción de transesterificación depende de la naturaleza de la materia prima, concentración del catalizador, relación molar alcohol aceite, temperatura, velocidad de agitación, presión, tiempo de reacción, contenido de humedad y ácidos grasos libres.

Entre los factores que pueden influir potencialmente en el rendimiento de la reacción de obtención de biodiesel (transesterificación) están: la temperatura, tiempo de reacción y relación molar aceite: alcohol.

### 3.16.4 Planificación de experimentos

Para estudiar cuantitativamente el efecto de estos factores sobre el rendimiento y sus interacciones se utilizará el diseño factorial completo a 2 niveles y tres factores ( $2^3$ ) elegidos anteriormente por que son los que pueden influir significativamente en el rendimiento de la reacción, como cada factor en el experimento tiene 2 niveles los llamaremos nivel bajo (-) y nivel alto (+).

Basándonos en experiencias previa obtenidas en bibliografías (Pereira Bulla E., 2014; Martínez, Ponce y Reyes, 2007), en la tabla se muestra los factores que se van a estudiar y los valores que estos pudieran tomar.

Tabla III-12 Factores y dominio experimental.

Factor	Dominio experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
X1: Tiempo de reacción (min)	30	90
X2: Temperatura (°C)	45	60
X3: relación molar (aceite: alcohol)	1:5	1:7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-13 Matriz de experimentos, plan de experimentación y respuesta medida.

	Matriz de experimentos			Plan de Experimentación			% Rendimiento
	X1	X2	X3	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Relación molar (aceite: alcohol)	
1	-	-	-	30	45	1:5	Y1
2	+	-	-	90	45	1:5	Y2
3	-	+	-	30	60	1:5	Y3
4	+	+	-	90	60	1:5	Y4
5	-	-	+	30	45	1:7	Y5
6	+	-	+	90	45	1:7	Y6
7	-	+	+	30	60	1:7	Y7
8	+	+	+	90	60	1:7	Y8

Fuente: Elaboración propia.

## CAPITULO IV

### DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 4.1 Análisis del rendimiento

Este análisis está sustentado en el análisis del DOE, donde se mencionan los rangos y niveles de cada uno de los factores del diseño de experimentos, seguidamente con estos factores se plantea la matriz de combinación de tratamiento. Ya obtenidos la producción y evaluada la calidad de cada uno de los 16 experimentos, es necesario evaluar la respuesta del estudio (Rendimiento de biodiesel) del experimento y establecer algunas condiciones de la variabilidad en el rendimiento del proceso. Para obtener el porcentaje del rendimiento de cada una de los ensayos realizados en el laboratorio, se estableció mediante la relación entre el peso del biodiesel y el peso del aceite usado de fritura de soja.

El rendimiento para cada ensayo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Masa biodiesel}}{\text{Masa AVU}} \times 100 \quad (4-1)$$

Tabla IV-1 Datos de rendimiento de la producción de biodiesel.

Ensayo	Peso del AUV (g)	Peso del biodiesel (g)	Rendimiento (%)
B1	671.764	621.477	92.514
B2	671.764	661.461	98.466
B3	671.764	646.355	96.217
B4	671.764	646.479	96.236
B5	636.408	561.379	88.211
B6	636.408	596.463	93.723
B7	636.408	584.521	91.847
B8	636.408	596.410	93.715
R1	671.764	604.371	92.432
R2	327.043	299.915	98.123
R3	671.764	606.408	96.205
R4	337.145	323.143	96.847
R5	636.408	526.485	88.753
R6	291.689	269.846	93.512

R7	636.408	594.575	91.427
R8	291.687	271.236	93.988

B.- Primer replica

R.- Segunda replica

Fuente: Elaboración propia, (2019)

#### 4.2 Resultados del diseño factorial

El diseño factorial realizado nos ayuda a encontrar las variables más significativas para llevar a cabo el proceso de obtención de biodiesel, y también nos muestra el tratamiento que dio mejores resultados. Para realizar el diseño experimental se tomó en cuenta el rendimiento obtenido ( $\eta$ , relación entre la masa de aceite usado y la masa de biodiesel obtenido) el cual fue la variable respuesta de cada combinación (t, T, R-M).

A continuación se muestra la matriz de resultados de las variables del proceso de obtención de biodiesel, tomando en cuenta como variable respuesta el rendimiento.

Tabla IV-2 Datos experimentales de Tiempo, Temperatura, Relación molar, Rendimiento.

Tratamiento	Factores			Replicas	
	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Relación molar (aceite: alcohol)	% Rendimiento 1	% Rendimiento 2
1	30	45	1:5	92.514	92.432
2	90	45	1:5	98.466	98.123
3	30	60	1:5	96.217	96.205
4	90	60	1:5	96.236	96.847
5	30	45	1:7	88.211	88.753
6	90	45	1:7	93.723	93.512
7	30	60	1:7	91.847	91.427
8	90	60	1:7	93.715	93.988

Fuente: Elaboración propia, (2019)

El análisis de varianza realizado, nos muestra las variables principales, la interacción de las variables, como así también la significancia de las mismas.

En la Tabla IV-3 se muestra los datos con los cuales se ha realizado el cálculo del análisis de varianza (ANVA) de un diseño factorial  $2^3$ .

Tabla IV-3 Datos para el cálculo del análisis de varianza.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Relación molar (aceite: alcohol)	% Rendimiento	Tiempo-temperatura
-1	-1	-1	92.514	1
1	-1	-1	98.466	-1
-1	1	-1	96.217	-1
1	1	-1	96.236	1
-1	-1	1	88.211	1
1	-1	1	93.723	-1
-1	1	1	91.847	-1
1	1	1	93.715	1
-1	-1	-1	92.432	1
1	-1	-1	98.123	-1
-1	1	-1	96.205	-1
1	1	-1	96.847	1
-1	-1	1	88.753	1
1	-1	1	93.512	-1
-1	1	1	91.427	-1
1	1	1	93.988	1

Fuente: Elaboración propia, (2019).

Tabla IV-4 Factores inter-sujetos.

	N
Tiempo	8
1.00	8
1.00	8
Temperatura	8
1.00	8
1.00	8
RelacionMolar	8
1.00	8
1.00	8

Fuente: Elaboración propia, (2019).

En la tabla siguiente se muestran los resultados del análisis de varianza:

Tabla IV-5 Análisis de varianza (ANVA) para el proceso de obtención de biodiesel

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	134.795 <sup>a</sup>	6	22.466	92.126	0.000
t	45.576	1	45.576	186.893	0.000
T	7.220	1	7.220	29.607	0.000
R-M	63.457	1	63.467	260.218	0.000
t*T	17.690	1	17.690	72.543	0.000
t*R-M	0.359	1	0.359	1.471	0.256
T*R-M	0.493	1	0.493	2.021	0.189
Error	2.195	9			
Total	141177.797	16			
Total corregida	136.990	15			

a. R cuadrado=0.984(R cuadrado corregida=0.973).

Fuente: Elaboración propia, (2019).

En la Tabla IV-5 se puede ver que la variable Tiempo, Temperatura, Relación Molar y la interacción Tiempo\*Temperatura, son significativas para el proceso de obtención de biodiesel.

Tabla IV-6 Resumen del modelo<sup>b</sup>.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error tip. De la estimación
1	0.989 <sup>a</sup>	0.978	0.970	0.52625

a. Variables predictorias: (constante), T\*T,R-M, T, t

b. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: Elaboración propia, (2019).

Tabla IV-7 ANOVA<sup>b</sup>.

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Significación
1 Regresión	133.944	4	33.846	120.913	0.000 <sup>a</sup>

Residual	3.046	11	0.277		
Total	136.990	15			

a. Variables predictorias: (constante), T\*T, R-M, T, t

b. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: Elaboración propia, (2019).

En la Tabla IV-7 se puede ver que el modelo es significativo de acuerdo a las colas de significación de acuerdo al 95% de confianza.

Tabla IV-8 Coeficientes<sup>a</sup>.

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	T	Sig.	Intervalo de confianza de 95.0% para B	
	B	Error tip.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1 (Constante)	93.889	0.132		713.639	0.000	93.599	94.178
Tiempo	1.688	0.132	0.577	12.828	0.000	1.398	1.977
Temperatura	0.672	0.132	0.230	5.106	0.000	0.382	0.961
RelacionMolar	-1.991	0.132	-0.681	-15.137	0.000	-2.281	-1.702
TiempTemp	-1.051	0.132	-0.359	-7.992	0.000	-1.341	-0.762

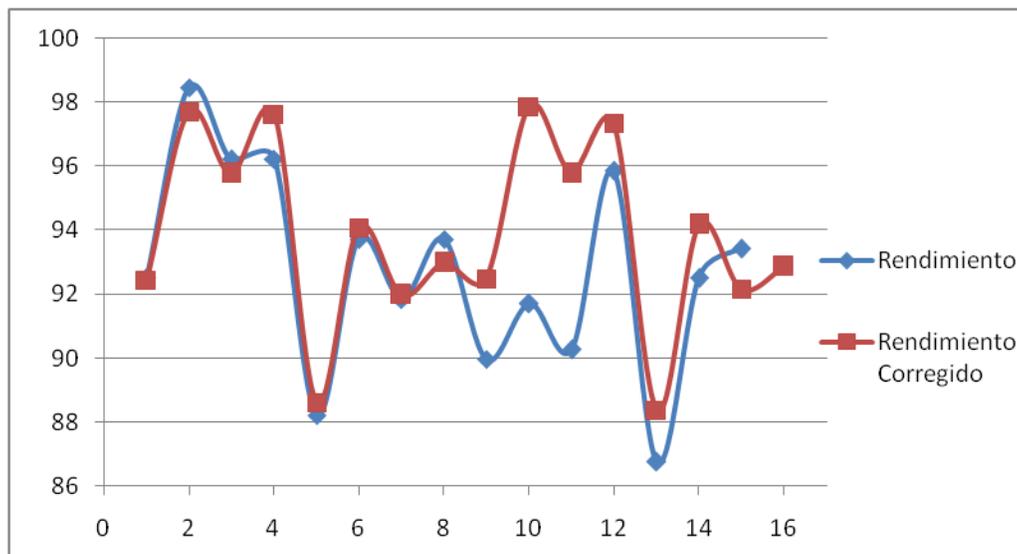
a. Variable dependiente: Rendimiento

Fuente: Elaboración Propia, (2019).

La ecuación que se obtiene a partir del modelo de regresión lineal es la siguiente:

$$\eta = 93.8879 + 1.688t + 0.672T - 1.991RM - 1.051tT \quad (4- 2)$$

Figura 4- 1 Comparación de valores corregidos con valores experimentales

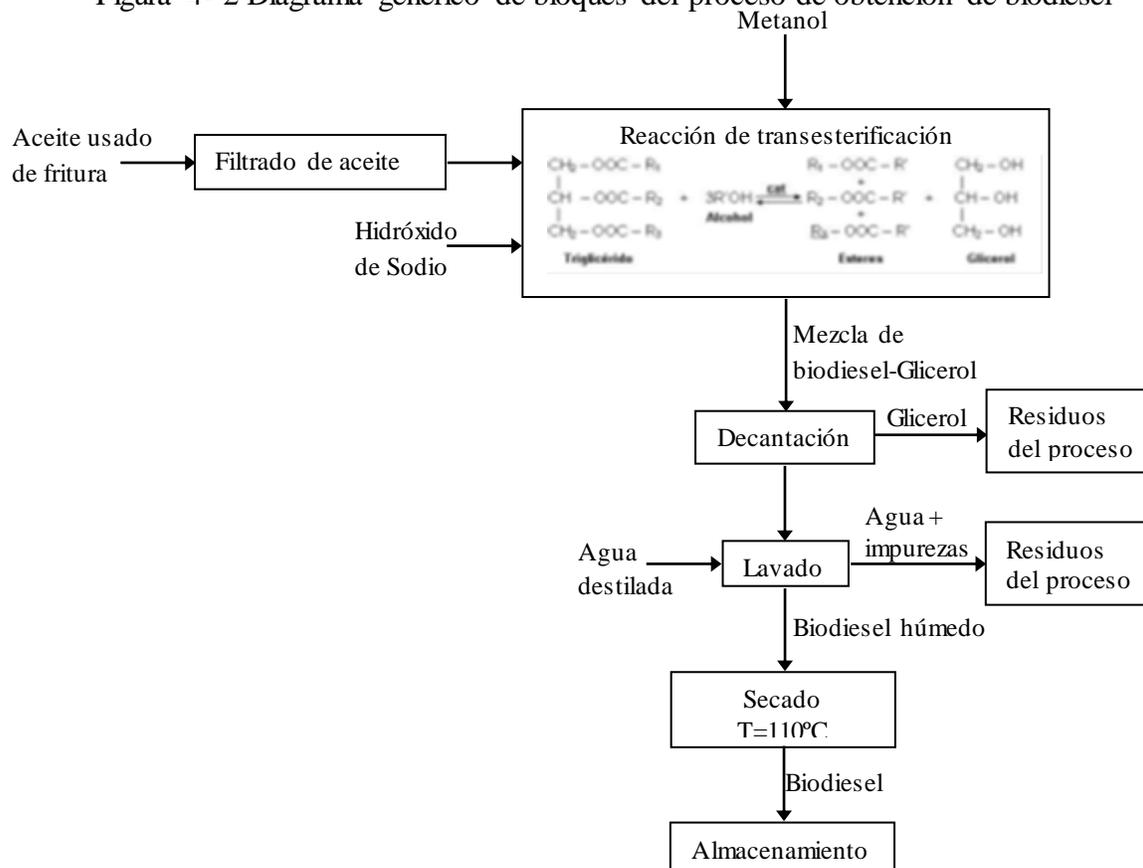


Fuente: Elaboración propia (2019).

En el gráfico anterior se puede observar que los valores obtenidos por el modelo coinciden aproximadamente con los valores observados experimentalmente, con una confianza del 95%.

### 4.3 Balance de materia y energía

Figura 4- 2 Diagrama genérico de bloques del proceso de obtención de biodiesel



### 4.3.1 Balance de materia

Para el desarrollo de este capítulo se tomarán los datos obtenidos en el capítulo 3.1, para las mejores condiciones obtenidas en el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de fritura y metanol a nivel de laboratorio, las cuales corresponden al ensayo número 2 (B2). La producción de este ensayo obtuvo un rendimiento del 98.466 % de biodiesel, las mejores condiciones obtenidas en el proceso de producción son:

- Relación molar aceite: alcohol de 1:5
- %p/p catalizador de 0,5
- Temperatura de 45 °C
- Tiempo de reacción de 90 min

El balance global del proceso de obtención de biodiesel, se lo realiza tomando como base de cálculo 636.408 g de aceite usado.

#### Cálculo de la masa de metanol:

En el subtítulo 2.5 se determinó que para un volumen de 760 ml de AVU y una relación molecular de 1 mol de aceite y 5 moles de metanol se requiere un volumen de 155.918 ml de metanol para obtener una reacción de transesterificación completa.

$$m_{metanol} = \rho_{metanol} \times V_{metanol} \quad (4-3)$$

$$m_{metanol} = 0.7918 \frac{g}{ml} \times 155.918 ml$$

$$m_{metanol} = 123.455 g$$

La reacción estequiométrica de transesterificación establece que 1 mol de aceite reacciona con 3 moles de metanol, se determinara la cantidad de etanol que reacciona con 760 l de AVU:

$$V_{\text{aceite definido}} \times \frac{1 \text{ mol}_{\text{aceite}}}{V_{\text{aceite}}} \times \frac{3 \text{ mol}_{\text{Metanol}}}{1 \text{ mol}_{\text{aceite}}} \times \frac{V_{\text{Metanol}}}{1 \text{ mol}_{\text{Metanol}}} \quad (4-4)$$

$$760 \text{ ml} \times \frac{1 \text{ mol}_{\text{aceite}}}{986.197 \text{ ml}} \times \frac{3 \text{ mol}_{\text{Metanol}}}{1 \text{ mol}_{\text{aceite}}} \times \frac{40.4647 \text{ ml}}{1 \text{ mol}_{\text{Metanol}}} = 93.551 \text{ ml}$$

$$m_{\text{metanol}} = \rho_{\text{metanol}} \times V_{\text{metanol}}$$

$$m_{\text{metanol}} = 0.7918 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \times 93.551 \text{ ml}$$

$$m_{\text{metanol}} = 74.074 \text{ g}$$

La masa de metanol en exceso es:

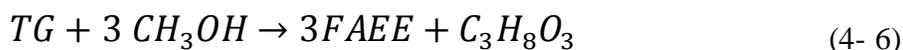
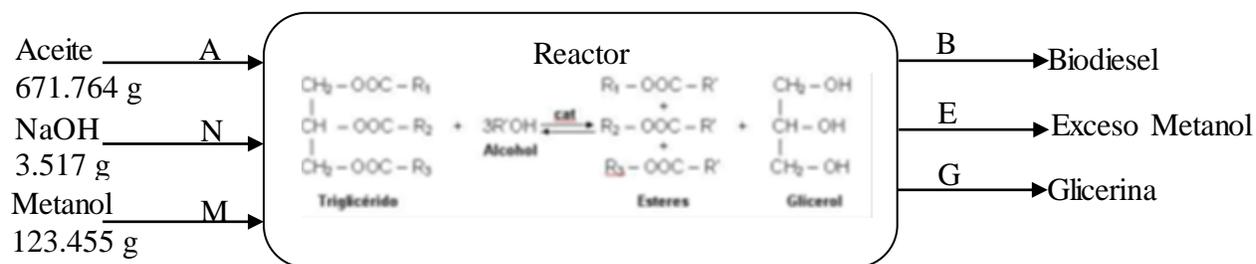
$$m_{\text{metanol}}(\text{total}) - m_{\text{metanol}}(\text{reacción}) = m_{\text{metanol}}(\text{exceso}) \quad (4-5)$$

$$m_{\text{metanol}}(\text{exceso}) = 123.455 \text{ g} - 74.074 \text{ g}$$

$$m_{\text{metanol}}(\text{exceso}) = 49.381 \text{ g}$$

### Catalizador (NaOH):

La cantidad de catalizador total para la reacción de 760 ml de AVU se determinó en el subtítulo 2.5, la cual es de 3.517 g.



$$\begin{array}{cccc} 1 \text{ mol} & 3 \text{ mol} & 3 \text{ mol} & 1 \text{ mol} \\ 871.7 \text{ g} & 3(32.04 \text{ g}) & 3(292.20 \text{ g}) & 92.09 \text{ g} \end{array}$$

En esta reacción estequiométrica por un mol de TG con 3 moles de metanol produce 3 moles de FAEE y 1 mol de Glicerina, este mol de glicerina tiene trazas de alcohol, catalizador y jabones. En esta reacción se aplicó una agitación mecánica, temperatura de 45°C y una presión atmosférica.

De la reacción estequiométrica se determina la cantidad de biodiesel formado (FAEE):

$$m_{biodiesel} = 671.764 \text{ g de aceite} \times \frac{1 \text{ mol de aceite}}{871.7 \text{ g de aceite}} \times \frac{3 \text{ mol de biodiesel}}{1 \text{ mol de aceite}} \times \frac{292.20 \text{ g de biodiesel}}{1 \text{ mol de biodiesel}}$$

$$m_{biodiesel} = 675.540 \text{ g de biodiesel}$$

También de la reacción estequiométrica se determina la cantidad de glicerina formada:

$$m_{glicerina} = 671.764 \text{ g de aceite} \times \frac{1 \text{ mol de aceite}}{871.7 \text{ g de aceite}} \times \frac{1 \text{ mol de glicerina}}{1 \text{ mol de aceite}} \times \frac{92.09 \text{ g de glicerina}}{1 \text{ mol de glicerina}}$$

$$m_{glicerina} = 70.967 \text{ g de biodiesel}$$

Tabla IV-9 Resultado del balance materia.

Sustancia	M(g/mol)	Cantidad (g)	Moles
<b>Entradas</b>			
AVU	871.70	671.764	0.771
$CH_3OH$	32.04	123.455	3.853
NaOH	39.997	3.517	0.088
<b>Total</b>		<b>798.736</b>	
<b>Salidas</b>			
Biodiesel*	292.20	675.540	2.312
$C_3H_8O_3$	92.09	70.967	0.771
$CH_3OH$ (exceso)	32.04	49.381	1.541
NaOH	39.997	3.517	0.088
<b>Total</b>		<b>799.405</b>	

Biodiesel\*.-Biodiesel sin purificar

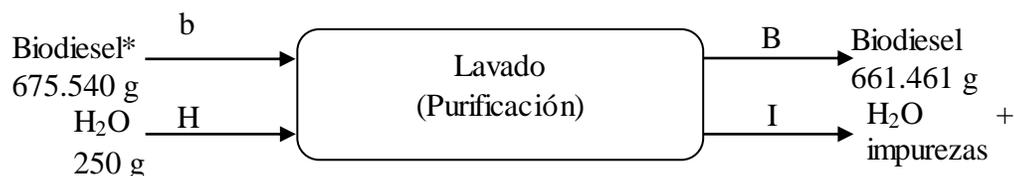
Fuente: Elaboración propia, (2019).

La diferencia de 0.669 g entre la masa total de entradas y salidas del balance global de materia se debe a que la cantidad de biodiesel y glicerina formada son calculadas

por estequiometria utilizando un peso molecular del biodiesel y aceite que no es exacto.

### Balance en el proceso de lavado

En esta etapa no se produce ninguna reacción química, solamente se emplea para purificar el biodiesel, para esta etapa se utilizó agua destilada calentada a 45°C aproximadamente, presión atmosférica y una agitación mecánica.



Ecuación del balance global:

$$b + H = B + I \quad (4-7)$$

$$I = b + H - B$$

$$I = 675.540 \text{ g} + 250 \text{ g} - 661.461 \text{ g}$$

$$I = 263.989 \text{ g}$$

Tabla IV-10 Balance en el proceso de lavado.

Sustancia	M(g/mol)	Cantidad (g)	Moles
<b>Entradas</b>			
Biodiesel*	292.20	675.450	2.19
H <sub>2</sub> O	18.015	250	13.877
<b>Total</b>		<b>925.45</b>	
<b>Salidas</b>			
Biodiesel	296.478	661.461	2.231
Agua + impurezas	-	263.989	
<b>Total</b>		<b>925.45</b>	

Biodiesel\*- Biodiesel sin purificar

Fuente: Elaboración propia, (2019).

Tabla IV-11 Resumen del balance de materia.

Entrada		Proceso	Salida	
Sustancia	Cantidad		Sustancia	Cantidad (g)

	(g)			
AVU	671.764	Transesterificación	Biodiesel	675.540
$CH_3OH$	123.455		$C_3H_8O_3$	70.967
NaOH	3.517		$CH_3OH$ (exceso)	49.381
			NaOH	3.517
Biodiesel*	675.450	Lavado	Biodiesel	661.461
$H_2O$	250		$H_2O$ + impurezas	263.989

Biodiesel\*- Biodiesel sin purificar

Fuente: Elaboración propia, (2019).

#### 4.3.2 Balance de energía

Para calcular el requerimiento de calor que se necesita para el baño María como medio calefaccionante en el proceso de transesterificación en el reactor, se realiza el siguiente balance de energía:

De manera experimental se obtienen las temperaturas:

$$T_{alimentación} = 20^{\circ}C$$

$$T_{transesterificación} = 45^{\circ}C$$

De las tablas de Capacidad Calorífica se tiene:

$$Cp_{aceite} = 0.47 \text{ kcal/kg}^{\circ}C$$

$$Cp_{biodiesel} = 0.532 \text{ kcal/kg}^{\circ}C$$

$$Cp_{NaOH} = 0.992 \text{ kcal/kg}^{\circ}C$$

$$Cp_{metanol} = 0.609 \text{ kcal/kg}^{\circ}C$$

$$Cp_{glicerina} = 0.554 \text{ kcal/kg}^{\circ}C$$

Los resultados de las masas del balance de materia son los siguientes:

$$m_{aceite} = 671.764 \text{ g}$$

$$m_{metanol} = 123.445 \text{ g}$$

$$m_{biodiesel} = 675.540 \text{ g}$$

$$m_{glicerina} = 70.967 \text{ g}$$

$$m_{NaOH} = 3.517 \text{ g}$$

$$m_{Total} = 1545.233 \text{ g}$$

La capacidad calorífica media es:

$$\bar{C}_p = \sum C_{p_i} \times X_i \quad (4- 8)$$

$$\bar{C}_p = C_{p_{aceite}} \times X_{aceite} + C_{p_{metanol}} \times X_{metanol} + C_{p_{NaOH}} \times X_{NaOH} + C_{p_{biodiesel}} \times X_{biodiesel} + C_{p_{glicerina}} \times X_{glicerina}$$

$$\bar{C}_p = 0.47 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times \frac{671.764 \text{ g}}{1545.233 \text{ g}} + 0.609 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times \frac{123.445 \text{ g}}{1545.233 \text{ g}} + 0.992 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times \frac{3.517 \text{ g}}{1545.233 \text{ g}} + 0.532 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times \frac{675.540 \text{ g}}{1545.233 \text{ g}} + 0.554 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times \frac{70.967 \text{ g}}{1545.233 \text{ g}}$$

$$\bar{C}_p = 0.513 \frac{kcal}{kg^{\circ}C}$$

La ecuación para calcular la cantidad de calor requerido para la transesterificación es:

$$Q = m_{Total} \times \bar{C}_p \times \Delta T \quad (4- 9)$$

$$Q = 1.545 \text{ kg} \times 0.513 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \times (45 - 20)^{\circ}C$$

$$Q = 19.814 \text{ kcal}$$

#### 4.4 Costo del estudio propuesto

El costo de la investigación de obtención de biodiesel se detalla en la tabla siguiente:

Tabla IV-12 Estimación de costos del proyecto.

ACTIVIDAD O MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (Bs.)	COSTO TOTAL (Bs.)
Aceite vegetal usado	L	10	0.5	5
Bidón para almacenar el AVU	Pza.	2	10	20
Metanol	L	2.5	580	580
Etanol	L	2	18	36
i-propanol	L	1	33	33
Hidróxido de sodio	G	200	70	70
Hidróxido de potasio	G	100	30	30
Agua destilada	L	6	5	30

Transporte	Día	110	10	1100
Anillados	Pza.	4	8	32
Empastado	Pza.	4	160	640
Material de escritorio.	Global	-	480	480
Adquisición de información digital y/o impresa.	Global	-	500	500
Adquisición de norma NB 34010	Pza.	1	46	46
Adquisición de norma NB 34004	Pza.	1	49	49
Vaso de precipitado 100 ml	Pza.	3	21	63
Vaso de precipitado 50 ml	Pza.	2	16	32
Ampollas de Separación 250 ml	Pza.	2	100	200
Balón de 2 bocas	Pza.	1	250	250
Picnómetro 25 ml	Pza.	1	84	84
Investigador	T	50	140	7000
<b>Total</b>	-	-	-	<b>11280</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5 Costo del producto obtenido

El costo aproximado del producto obtenido se calculará para el ensayo que se alcanzó un mejor rendimiento de 98.46 % y se obtuvo un volumen de biodiesel refinado de 725 ml, para dicho ensayo se utilizó:

760 ml de AVU

156 ml de Metanol

3.517 g de NaOH

500 ml H<sub>2</sub>O destilada

Se calculará el precio en bolivianos para cada una de estas cantidades en base a la tabla IV-12

$$760 \text{ ml AVU} \times \frac{0.5 \text{ Bs}}{1000 \text{ ml}} = 0.38 \text{ Bs}$$

$$156 \text{ ml Metanol} \times \frac{580 \text{ bs}}{2500 \text{ ml}} = 36.19 \text{ Bs}$$

$$3.517 \text{ g NaOH} \times \frac{70 \text{ Bs}}{200 \text{ g}} = 1.23 \text{ Bs}$$

$$500 \text{ ml} \times \frac{5 \text{ bs}}{1000 \text{ ml}} = 2.5 \text{ bs}$$

$$\text{Costo para producir 725 ml de biodiesel} = 40.3 \text{ Bs}$$

El costo de producir 1 litros de biodiesel seria:

$$1 \text{ l} \times \frac{40.3 \text{ bs}}{0.725 \text{ l}} = 53.6 \text{ Bs/l}$$

Se debe considerar que el metanol utilizado es de pureza analítica y su precio es más elevado debido al costo de su producción, es por esto que el costo de producir un litro de biodiesel resulta alto.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

El estudio de investigación permitió generar información para la obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado, siendo este un producto que contribuiría a disminuir la contaminación en la ciudad de Tarija.

De acuerdo a los objetivos planteados inicialmente en esta investigación se concluye:

1. La caracterización del aceite vegetal usado dio como resultados:

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad	0.8839	g/ml
Viscosidad	185	mPas
Índice de acidez	0.1629	%

Porcentaje de humedad	de	0.235	%
-----------------------	----	-------	---

Fuente: Elaboración propia, (2019).

Estos parámetros presentados por el aceite vegetal usado se encuentran dentro de los valores establecidos por norma para dicho aceite, por lo que la materia prima es adecuada para la obtención de biodiesel.

2. De acuerdo a lo analizado en los capítulos anteriores se determinó que la catálisis básica es el método más adecuado para obtener biodiesel por transesterificación, ya que las ventajas de este catalizador son:

- Velocidad de reacción alta.
- Condiciones moderadas de presión y temperatura.
- Menor costo.
- Menor volumen de alcohol.
- Menos corrosivos para los equipos industriales.
- Mejores rendimientos.
- El biodiesel presenta mejor calidad final.

3. La obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado se realizó por el método de transesterificación básica utilizando metanol e hidróxido de sodio como catalizador, se obtuvo rendimientos desde 88.21 % el más bajo hasta 98.46 % el más alto.

4. Los índices de acidez del biodiesel obtenido que van desde 0.121 mg KOH/g muestra hasta 0.542 mg KOH/g muestra y porcentaje de humedad de 0.012 % el más bajo y 0.049 % el más alto, se encuentran dentro de los requerimientos de la norma europea EN 14214.

5. Del diseño factorial realizado se concluye que los parámetros que dan mejores resultados en la obtención de biodiesel a partir de AVU son los siguientes:

Tiempo= 90 min

Temperatura = 45 °C

Relación molar alcohol aceite = 1:5

## 5.2 Recomendaciones

A las autoridades o inversión privada:

1. Al gobierno municipal de la ciudad de Tarija, gestionar la creación de una micro planta para la elaboración de biodiesel a partir de aceite desechado por los mercados y locales de comida rápida en la ciudad de Tarija, y de este modo contribuir a disminuir la contaminación que estos ocasionan en quebradas y ríos.

Para futuras investigaciones:

1. A los estudiantes de la carrera de ingeniería química, realizar un trabajo de investigación para poder utilizar la glicerina que se obtiene como principal subproducto del proceso de obtención de biodiesel y en una cantidad considerable.
2. A los estudiantes de la carrera de ingeniería química, se sugiere realizar la investigación de obtención de biodiesel utilizando catalizadores heterogéneos, dadas las ventajas de este método.
3. A la carrera de ingeniería química, gestionar la creación de una planta piloto que utilice como materia prima aceite vegetal usado por los kioscos y comedor de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, a objeto de ajustar algunos parámetros para que puedan ser utilizados a escala industrial y la misma contribuir a la formación de los estudiantes.