

**UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**“DISEÑO DE UN REACTOR INTERMITENTE PARA LA OBTENCIÓN DE  
BIODIESEL”**

**PRESENTADO POR:**

**FREDDY ERMEL GARCÍA DE LOS SANTOS**

**ASESOR:**

**Ing. VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ**

**CIP 48044**

  
**VÍCTOR RAÚL COCA RAMÍREZ**  
**INGENIERO QUÍMICO**  
**Reg. del Colegio de Ingenieros N° 48044**

**HUACHO – PERÚ**

**2021**

**DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres Jesús y Liliana por su incondicional apoyo y cariño en el camino hacia mi carrera profesional, a mis seres queridos que siempre permanecieron junto a mi brindándome su ayuda.

**AGRADECIMIENTO**

A mis Padres por haber confiado en mí y brindarme su apoyo

incondicional durante mi crecimiento Profesional.

A mi Asesor, Víctor Raúl Coca Ramírez por su

apoyo y confianza, para las actividades del trabajo; por el

tiempo, la dedicación y atención que me brindo.

¡Y a todas las personas que me apoyaron y aconsejaron en todo momento,

Gracias!

**ÍNDICE**

**“Diseño de un reactor intermitente para la obtención debiodiesel”**

|  |     |
|--|-----|
| DEDICATORIA.....                                   | II  |
| AGRADECIMIENTO .....                               | III |
| ÍNDICE.....  | III |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                              | VI  |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                            | VII |
| ABSTRACT .....                                     | X   |
| INTRODUCCIÓN.....                                  | 1   |
| CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....        | 2   |
| 1.1. Descripción de la realidad problemática ..... | 2   |
| 1.2. Formulación del Problema .....                | 2   |
| 1.2.1. Problema General .....                      | 2   |
| 1.2.1. Problemas Específicos.....                  | 2   |
| 1.3. Objetivos de Investigación .....              | 3   |
| 1.3.1. Objetivo General.....                       | 3   |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....                 | 3   |
| 1.3. Justificación de la Investigación .....       | 3   |
| 1.5. Delimitación del Estudio .....                | 3   |
| 1.6. Viabilidad del Estudio .....                  | 4   |
| CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....                    | 5   |
| 2.1. Antecedentes de la Investigación .....        | 5   |
| 2.1.1. Antecedentes Internacionales .....          | 5   |
| 2.1.2. Antecedentes Nacionales.....                | 7   |

|  |    |
|--|----|
| 2.2. Bases teóricas .....  | 9  |
| 2.2.1. Producción de Biodiesel .....                               | 9  |
| 2.2.2. Materia prima: triglicéridos .....                          | 10 |
| 2.2.3. Materia prima: alcohol.....                                 | 11 |
| 2.2.4. Catalizadores para la reacción de transesterificación ..... | 12 |
| 2.2.5. Tipos de reactores .....                                    | 18 |
| 2.3. Definiciones conceptuales .....                               | 24 |
| 2.4. Hipótesis de la investigación .....                           | 25 |
| 2.4.1. Hipótesis General .....                                     | 25 |
| 2.4.2. Hipótesis Especifica .....                                  | 25 |
| CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....                | 26 |
| 3.1. Diseño metodológico.....                                      | 26 |
| 3.1.1. Tipo de investigación.....                                  | 26 |
| 3.1.2. Nivel de investigación .....                                | 26 |
| 3.1.3. Diseño .....  | 26 |
| 3.2. Población y muestra.....                                      | 27 |
| 3.3. Operacionalización de variables.....                          | 27 |
| 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos. ....         | 29 |
| 3.4.1 Técnicas a emplear .....                                     | 29 |
| 3.5. Técnicas para el procesamiento de información.....            | 29 |
| CAPITULO IV: RESULTADOS .....                                      | 30 |
| 4.1. Determinación del reactor adecuado. ....                      | 30 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2. Determinación de volumen en cada recipiente.....  | 31 |
| 4.3. Determinación de la potencia de los motores. .... | 45 |
| CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....       | 50 |
| 5.1. Conclusiones.....                                 | 50 |
| 5.2. Recomendaciones .....                             | 50 |
| CAPITULO VI: FUENTES DE INFORMACIÓN .....              | 51 |
| 6.1. Bibliografía.....                                 | 51 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Formas de realizar la reacción de transesterificación..... | 13 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2. Condiciones típicas del proceso de transesterificación con catalizadores básicos homogéneos..... | 14 |
| Tabla 3. Cuadro de Operacionalización .....   | 28 |
| Tabla 4. Determinación del reactor. ....  | 30 |
| Tabla 5. Determinación del motor de impulso .....   | 39 |
| Tabla 6. Datos calculados por el programa de simulación .....   | 47 |
| Tabla 7. Cálculos de potencias determinados.....  | 49 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |   |
|--|---|
| Figura 1. Reacción de transesterificación para la producción de biodiesel. (Triglicérido + Alcohol de cadena corta = Glicerol + Biodiesel) ..... | 9 |
|--|---|

|   |    |
|---|----|
| Figura 2. Pasos de la reacción de transesterificación .....                                       | 10 |
| Figura 3. Reacción de formación de ácidos grasos libres y reacción de formación de jabón<br>..... | 15 |
| Figura 4. Proceso industrial del mecanismo de biodiesel.....                                      | 17 |
| Figura 5. Reactor Batch.....  | 19 |
| Figura 6. Reactor continuo .....  | 21 |
| Figura 7. Reactor de flujo pistón (P.F.R) .....   | 22 |
| Figura 8. Reactor Semi – Batch.....   | 23 |
| Figura 9. Recipiente para la reacción de metóxido. ....   | 35 |
| Figura 10. Reactor Batch o por lote.....  | 36 |
| Figura 11. Tanque de separación.....  | 37 |
| Figura 12. Numero de potencia relacionado con el número de Reynolds.....                          | 46 |

## RESUMEN

En primera instancia, la investigación tiene como objetivo principal brindar un diseño óptimo y adecuado de un reactor Batch, con la finalidad de producir 30 litros de biodiesel empleando como materia prima aceite de cocina reciclado, el sistema en general está compuesto por 3 etapas, cada etapa presenta un recipiente de mediano tamaño y volumen, la primera etapa se le denomina catálisis básica, en la cual se mezclara una proporción adecuada de NAOH con metanol para formar metóxido de sodio, la segunda etapa denominada transesterificación , en donde el metóxido de sodio formado en la primera etapa se añadirá directamente al aceite reciclado encontrado en el reactor a una agitación constante y finalmente la tercera fase denominada separación, en la cual entrara agua pura para limpiar el agua jabonosa de la mezcla para obtener biodiesel purificado separado de la glicerina.

La investigación precisa de manera detallada las dimensiones calculadas del reactor y la selección de accesorios necesarias del sistema de producción de biodiesel. A través de las medidas de diseño y las ecuaciones matemáticas se determinó que la capacidad respecto al volumen es de 9 litros a una potencia de 20 W respecto a la agitación del recipiente de metóxido, en cuanto al reactor este presento una capacidad de 47 litros con una potencia de 20 W , y para el recipiente de separación se determinó que la capacidad es de 70 litros con una potencia de motor de 20 W ; cabe recalcar que el diseño del sistema presenta una agitación constante conformada por 1 pala inclinada en cada fase, esto más que todo con la finalidad de generar mezcla de flujos axiales y radiales.

Palabras claves: Reactor Batch, potencia, agitador, ecuaciones de diseño.

## ABSTRACT

In the first instance, the main objective of the research is to provide an optimal and adequate design of a Batch reactor, in order to produce 30 liters of biodiesel using recycled cooking oil as raw material, the system in general is composed of 3 stages, each stage presents a container of medium size and volume, the first stage is called basic catalysis, in which a suitable proportion of NAOH is mixed with methanol to form sodium methoxide, the second stage called transesterification, where the sodium methoxide formed In the first stage, it will be added directly to the recycled oil found in the reactor at constant agitation and finally the third phase called separation, in which pure water will enter to clean the soapy water from the mixture to obtain purified biodiesel separated from glycerin.

The investigation specifies in detail the calculated dimensions of the reactor and the selection of necessary accessories of the biodiesel production system. Through the design measures and mathematical equations, it was determined that the capacity with respect to the volume is 9 liters at a power of 20 W with respect to the stirring of the methoxide container, as for the reactor this presented a capacity of 47 liters with a power of 20 W, and for the separation vessel it was determined that the capacity is 70 liters with a motor power of 20 W; It should be noted that the design of the system presents a constant agitation made up of 1 inclined blade in each phase, this most of all in order to generate a mixture of axial and radial flows.

Keywords: Batch Reactor, Power, Stirrer, Design Equations.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación se centra en el estudio del diseño de un reactor para obtener biodiesel, un biocombustible líquido, mezcla de ésteres alquílicos derivados de aceites y grasas, y que puede actuar como un sustituto del Diesel. En la actualidad se han empleado diferentes materias primas para la elaboración del biodiesel, desde aceites extraídos de semillas, tales como el girasol, colza, soja, etc. pasando por aceites extraído de las oleaginosas, como por ejemplo la palma, grasas animales, algas hasta el uso de los residuos de aceites de fritura.

El diseño de un reactor para la obtención de biodiesel tiene mucha importancia desde todo punto de vista, ya que su utilización permitirá disminuir el consumo de los combustibles fósiles en los motores de combustión interna, y que representan una de las principales causas en la generación de gases de efecto invernadero. También es importante desde el punto de vista académico porque permite la búsqueda de una tecnología propia en la producción de biocombustibles.

Por lo tanto, para desarrollar el siguiente proyecto se ha recurrido a la búsqueda de información bibliográfica en los sitios especializados, seguidamente se procedió a seleccionar y diseñar el tipo de reactor adecuado para la producción de 30 litros de biodiesel, tomando en consideración el tipo de sistema de agitación, así como su potencia.

Se espera que el presente trabajo de investigación inspire a otras personas en la búsqueda de alternativas para solucionar el problema de contaminación por el uso de combustibles fósiles.

## **CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1.Descripción de la realidad problemática**

En los últimos años la gran mayoría de personas han comenzado a tomar una correcta concientización respecto al cambio de combustibles fósiles. Esto se debe a que la utilización de los derivados de petróleo dentro del parque automotor a nivel global ha originado índices elevados de polución con el tiempo, no obstante, cada vez esto se vuelve más severo y crítico, en especial si no se innova o crea nuevas fuentes de combustibles alternas, teniendo como punto relevante que el petróleo es fuente única y que a través del tiempo se agota, debido a su uso constante.

Los estudios a nivel mundial sobre combustibles como alternativas para su sustitución se basan más que todo en derivados de biomasa, la cual puede provenir de origen vegetal o animal, con el fin de ser reutilizada de manera adecuada y optima, como fuente principal para la obtención de biodiesel.

Por lo que se ve en la necesidad de diseñar una pequeña planta piloto, con el fin de producir biodiesel a partir de residuos de origen vegetal, siendo más específicos a partir de aceite de cocina utilizados, con la finalidad de darle un uso adecuado y viable.

### **1.2.Formulación del Problema**

#### **1.2.1. Problema General**

¿Cómo diseñar un reactor intermitente para la obtención de biodiesel reciclando aceites de cocina?

#### **1.2.1. Problemas Específicos**

- ¿Como determinar el tipo de reactor adecuado y óptimo para el diseño de un reactor de obtención de biodiesel?
- ¿Cómo diseñar un reactor para la producción de biodiesel con una capacidad de 30 litros?

- ¿De qué forma se determinará la potencia requerida de los motores empleados en la producción de biodiesel?

### **1.3. Objetivos de Investigación**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Diseñar un reactor intermitente para la obtención de biodiesel a partir de aceites reciclados de cocina.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar el tipo de reactor adecuado y óptimo para el diseño de un reactor de obtención de biodiesel.
- Diseñar un reactor de producción de biodiesel con una capacidad de 30 litros.
- Determinar la potencia requerida de los motores empleados en la producción de biodiesel.

### **1.3. Justificación de la Investigación**

La finalidad del diseño de reactor para la obtención de biodiesel se justifica más que todo en ayudar a reducir progresivamente la utilización de combustibles fósiles dentro de los vehículos a diésel, lo cual generara una movilización sustentable y del mismo modo reducir considerablemente las emisiones que contaminan al medio ambiente, así mismo también para no ser dependientes en su totalidad del petróleo, generando así una matriz energética pura y saludable en nuestro país.

### **1.5. Delimitación del Estudio**

Respecto a la delimitación, esta se efectuará de manera oportuna desde el mes de julio del presenta año hasta el mes de noviembre.

El lugar donde se efectuará el proceso o desarrollo del diseño del reactor para la producción de biodiesel será en los recintos de la UNJFSC.

### **1.6. Viabilidad del Estudio**

El estudio es viable, debido a que el investigador cuenta con los recursos económicos necesarios para culminar la investigación, así mismo también tiene el tiempo suficiente para llevarlo a cabo.

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la Investigación

#### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

De acuerdo con (Gimeno, 2016) indico de manera precisa las siguientes conclusiones:

- El empleo de combustibles de orígenes biológicos es una opción eficaz a los combustibles fósiles, debido a que presentan cantidades limitadas y son contaminantes para el ambiente, al contrario de un biocombustible que apoya a la disminución del efeto invernaderos y son una gran fuente de energía sustentable y reciclable.
- Dentro de la investigación se ha realizado la obtención de biodiesel separándolo de la glicerina a través del compuesto denominado metanol y oleo proveniente de la semilla del girasol mediante el mecanismo de transesterificación. Se ha brindado una alternativa de obtención a nivel de laboratorio, así mismo también se han realizado diversos análisis en función a su calidad. No obstante, se ha adquirido un mecanismo cinético a partir del método de transesterificación enfocado en la reacción de todo el mecanismo, siendo mas simple el modelo y compuestos que involucra.
- La obtención de biodiesel empleando el mecanismo de catálisis es un sistema simple y no tan laborioso, pero la extracción y purificación del producto final requieren algunas complicaciones en el mecanismo para su obtención. A diferencia del estudio de calidad del bioetanol, debido a que se requieren técnicas eficaces las cual llevan gran tiempo para cada muestra.

- El mecanismo cinético de acuerdo a la transesterificación adquirido mediante el método de ajuste es una excelente aproximación del mecanismo convencional de 3 reacciones a  $T^{\circ}$  mayores a  $60^{\circ}\text{C}$ .
- El costo estimado hallado de acuerdo a la obtención de biodiesel a partir de oleos vegetales no es una alternativa rentable, debido a que el costo de las materias primas y de las operaciones son muy altos, por lo cual el costo de producción supera por creces al costo de venta.

Según (Nogueira, 2016) en su investigación realizada, indico de manera breve las siguientes conclusiones:

- Toda la planta se construyó con tecnología del Grupo de Energías Renovables de la UIT. La planta se instaló en el laboratorio de mecanizado propio de la Institución a un costo total de R \$ 3.500,00 (tres mil quinientos reales), con un volumen de producción promedio de 1 litro de biodiesel por lote. Este costo aún puede reducirse si las tuberías, válvulas y accesorios, actualmente fabricados en acero inoxidable, se cambian por PVC.
- Las pruebas preliminares con aceite de soja refinado, alcohol etílico anhidro y metilato de sodio (30%) mostraron buenos resultados en cuanto a separación de glicerina y producción de ésteres. Aún no se han realizado análisis del biocombustible producido. Se debe hacer una corrección en relación al cambio de posición de los depósitos 6 (separador) y 4 (recuperador) porque la glicerina debe separarse antes de la recuperación del alcohol.
- Si bien el equipamiento construido es relativamente sencillo, el “Know-How” adquirido abre el camino a nuevos proyectos y permitirá, en el mediano plazo, conformar una cultura cooperativa interdisciplinaria que puede permitir un crecimiento efectivo en términos de conocimiento y desarrollo. Además, la

presentación de la metodología empleada para diseñar los equipos, así como los pasos para la construcción física del modelo, son aportes que permitirán a diferentes escuelas construir equipos similares, a bajo costo y adaptados a sus necesidades y potencialidades.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

Referenciando a (Alain, 2016) en su indagación efectuada, recalco de manera explícita las posteriores conclusiones:

- Fue viable realizar el diseño y la implementación a escala de laboratorio una pequeña planta con el fin de obtener biodiesel a partir de aceites reciclados empleando de manera eficiente y eficaz un mecanismo optimo.
- El adecuado control disminuyo de manera optima el periodo de operación dentro del mecanismo de transesterificación en el reactor.
- Se alcanzo la supervisión remota del mecanismo de obtención del biodiesel.
- Se alcanzo la automatización y optimización en el mecanismo de biodiesel.
- No se mostraron inconvenientes dentro del monitoreo y obtención del mecanismo.
- El control y cálculos de las variables del mecanismo se efectuaron de manera óptima en cada fase del mecanismo de obtención.
- Los mecanismos electrónicos empleados en el diseño no demostraron inconvenientes en la comunicación y control del sistema de obtención de biodiesel.
- Se alcanzo la visualización en periodo real del mecanismo de obtención del producto terminado.
- A escala de laboratorio el mecanismo de obtención de biodiesel marchó de manera óptima sin presentar ningún inconveniente en su mecanismo.

- La planta piloto de producción de biodiesel funciono satisfactoriamente sin presentar ningún problema en el proceso.

Indicando a (Colmenares, 2019) , en su investigación estudiada, propuso las posteriores conclusiones:

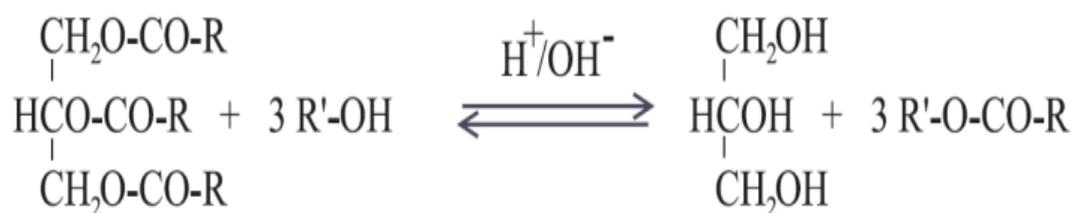
- La materia prima empleada en la utilización de comidas abarcando la Universidad de Piura son de orígenes vegetales, como por ejemplo el aceite de soya y maíz.
- De la gran cantidad de encuestas realizadas al personal del comedor se plasmó la conclusión de que el aceite empleado para el proceso solo se usa una vez, por ende, esto indicaría que presentaría un índice de acidez relativamente bajo.
- Se indico de manera precisa que el mecanismo empleado para la producción de biodiesel se denomina transesterificación, esto mas que todo debido a que el índice de ácidos grasos es menos del 3%.
- La obtención del biocombustible presentaría un gasto económico menor, lo cual no será dependiente de los cambios del precio del Diesel.
- Los gastos económicos en función a la puesta de marcha son relativamente bajos, lo cual es adecuada respecto al modelo de estudio que se lleva a cabo.
- La investigación precisa que las condiciones que indicaron una mejoría en los resultados durante el mecanismo de transesterificación empleando KOH, a una temperatura de 67°C y una agitación constante de 450 rpm, fueron una relación entre aceite y alcohol de 1:10, con un tiempo de reacción de 2 horas, así brindando una eficiencia del 96.89%, lo cual se determinó por el método de cromatografía de gases.

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Producción de Biodiesel

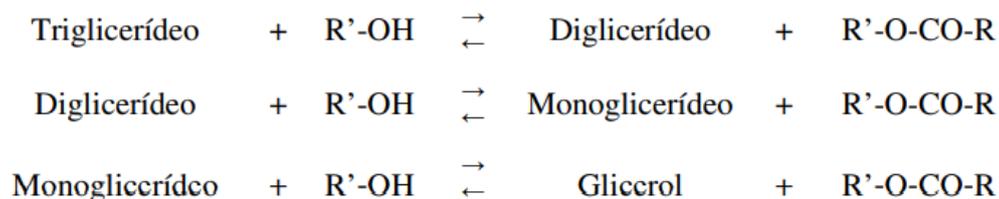
El aceite vegetal fue utilizado como combustible en un motor por primera vez por Rudolf Diesel en 1900, en una feria en París. Actualmente, no se utiliza directamente en motores debido a su alta viscosidad y baja volatilidad, principalmente. La transesterificación se considera el mejor método para adaptar estos parámetros para su uso en motores de combustión interna del ciclo Diesel porque es simple, de bajo costo y fácil de operar, y porque presenta un subproducto atractivo: la glicerina. (Soares, 2015)

El proceso de transesterificación elimina el glicerol de la molécula de triglicérido del aceite o grasa vegetal y lo reemplaza con un alcohol de cadena corta, formando biodiesel, en presencia o no de un catalizador. La reacción correspondiente, llamada transesterificación, se muestra en la Figura 1 (Soares, 2015).



*Figura 1.* Reacción de transesterificación para la producción de biodiesel. (Triglicérido + Alcohol de cadena corta = Glicerol + Biodiesel)

La reacción de transesterificación tiene lugar en tres pasos reversibles: la conversión de triglicérido a diglicérido, la conversión de diglicérido a monoglicérido y, finalmente, la conversión a glicerol (B.L Salvi, 2012)



*Figura 2.* Pasos de la reacción de transesterificación

Las principales variables que inciden en el proceso son (B.L Salvi, 2012)

- ✓ Temperatura;
- ✓ Presión;
- ✓ Tiempo de reacción;
- ✓ Velocidad de agitación;
- ✓ Tipo y cantidad de alcohol;
- ✓ Tipo y cantidad de catalizador, si se usa;
- ✓ Grado de refinado del aceite vegetal, incluido el contenido de ácidos grasos libres (FFA);
- ✓ Cantidad de agua presente;
- ✓ Naturaleza del triglicérido.

### **2.2.2. Materia prima: triglicéridos**

En general, los triglicéridos para la producción de biodiésel se pueden dividir en cuatro categorías (ATABANI et al., 2012):

- Aceites comestibles: soja, maní, girasol, palma, coco, etc.;
- Aceites no comestibles: nabo forrajero, jatropha, ricino, algas, etc.;
- Aceite de relaves, o reciclado: aceite de cocina usado, etc.;
- Grasas animales: grasa de res o pollo, subproductos del aceite de pescado, etc.

En la medida de lo posible, la materia prima debe tener un costo bajo y una gran escala de producción. La disponibilidad de aceites depende del clima, la ubicación geográfica, el tipo de suelo y las prácticas agrícolas de cada país (Atabani, 2012).

En Perú, el biodiesel se produce utilizando como materia prima principalmente aceite de soja (82,43%) y grasa de res (16,01%). (Petroperu, 2020).

### **2.2.3. Materia prima: alcohol**

Como la transesterificación es una reacción de equilibrio, se necesita un exceso de alcohol para lograr mayores conversiones. La proporción molar comúnmente adoptada de metanol es 6: 1, 6 moléculas de alcohol por cada molécula de triglicérido, y el valor estequiométrico es 3: 1 (MOTASEMI y ANI, 2012).

El metanol es el alcohol de cadena corta más comúnmente utilizado en la reacción debido a su bajo costo y ventajas fisicoquímicas: la solubilidad del catalizador en metanol es más rápida; es el alcohol más polar, con la cadena más corta y que reacciona más fácilmente con los triglicéridos, lo que lleva a una mayor velocidad de reacción (KANITKAR et al., 2011). Sin embargo, el metanol es tóxico y tiene un punto de ebullición bajo, 64,7 °C, muy cercano a la temperatura de operación común del proceso, 60 a 65 °C (SHARMA y SINGH, 2009).

El etanol tiene la ventaja significativa de ser renovable y ampliamente disponible en Brasil, además de no ser tóxico y tener un punto de ebullición más alto, 78,4 °C (SHARMA y SINGH, 2009).

La reacción de transesterificación se produce esencialmente con la formación de emulsiones de aceite y alcohol. En el caso de la metanólisis, las emulsiones se descomponen fácilmente para formar glicerol y ésteres. Con el etanol, por otro lado, las emulsiones son más estables y, por lo tanto, interfieren con la separación de los ésteres.

Por lo tanto, el tiempo de separación de fases después de la reacción aumenta con el uso de etanol (KANITKAR et al., 2011).

Según Muley y Boldor (2013), la mezcla de reacción de aceite, catalizador básico homogéneo (NaOH) y metanol absorbe más microondas que la mezcla de reacción con etanol. El metanol, al ser más polar y tener una cadena molecular más pequeña, interactúa mejor con las microondas, ya que tiene un radio de giro más pequeño y una inercia molecular más baja, lo que permite una rotación más rápida e inducción de una mayor velocidad de reacción (KANITKAR et al., 2011).

En el estudio realizado por KANITKAR et al. (2011), en reacciones de transesterificación de aceite de soja y arroz catalizadas por NaOH e irradiadas con microondas, se evaluó la influencia del uso de metanol o etanol. Para obtener conversiones similares, al mismo tiempo, fueron necesarias relaciones molares de 5: 1 de metanol y 9: 1 de etanol, lo que demuestra la menor reactividad del etanol. También se observó mayor dificultad en la separación de fases después de la reacción cuando se usa etanol, debido a la mayor estabilidad de la emulsión. El biodiesel producido usando ambos alcoholes cumplió con las especificaciones ASTM para: glicerol libre y total, estabilidad a la oxidación, viscosidad, punto de enturbiamiento, punto de inflamación e índice de ácido. Los ésteres etílicos tienen una mejor estabilidad a la oxidación, mientras que los ésteres metílicos tienen un punto de enturbiamiento más bajo, mostrando un mejor desempeño a bajas temperaturas.

#### **2.2.4. Catalizadores para la reacción de transesterificación**

Como el alcohol y los triglicéridos son inmiscibles, la baja superficie de contacto entre ellos hace que la transesterificación se produzca de forma relativamente lenta. La adición de catalizador mejora la solubilidad del alcohol, aumentando así la velocidad de reacción. La transesterificación se puede realizar con un catalizador homogéneo o

heterogéneo, o sin catálisis, como se muestra en la siguiente tabla (ABBASZAADEH et al., 2012; ATABANI et al., 2012).

Tabla 1. *Formas de realizar la reacción de transesterificación*

|                     |               |                      |                    |
|---------------------|---------------|----------------------|--------------------|
| Transesterificación | Catalítica    | Homogénea            | Básica             |
|                     |               |                      | Acida              |
|                     |               | Heterogénea          | MgO, SrO, CaO, etc |
|                     |               |                      | Enzimas            |
|                     | No catalítica | Metanol supercrítico |                    |
|                     |               | BIOX                 |                    |

Fuente: Elaboración propia

Actualmente, el principal método industrial de producción de biodiésel es la catálisis básica homogénea en un reactor discontinuo con agitación mecánica. Al final de esta reacción, además del biodiesel, se obtiene una mezcla de ésteres, alcohol, tri, di y monoglicéridos, glicerol y sales (SALVI y PANWAR, 2012). Las ventajas de esta catálisis son condiciones de operación suaves, alta conversión en un tiempo razonable y catalizadores de bajo costo y fácil disponibilidad (ABBASZAADEH et al., 2012). Las condiciones típicas adoptadas en los procesos industriales se enumeran en la Tabla 2.

Tabla 2. *Condiciones típicas del proceso de transesterificación con catalizadores básicos homogéneos*

(Fuente: ABBASZAADEH et al., 2012)

| <b>Materia – prima</b>   | <b>Triglicéridos refinados (FFA &lt; 0,5 %; H<sub>2</sub>O &lt; 0,06 %) y alcohol anhidro de cadena corta</b> |
|--|---|
| Relación molar alcohol: aceite                                   | 6:1   |
| Temperatura  | 60-65 °C  |
| Presión  | 0,14-0,41 MPa   |
| Catalizador  | NaOH o KOH  |
| Concentración de catalizador (en relación con la masa de aceite) | 0,25-2 % m/m  |
| Velocidad de agitación   | 300-600 rpm   |
| Tiempo de reacción   | 1h para una conversión a 98 %   |

Fuente: Elaboración propia

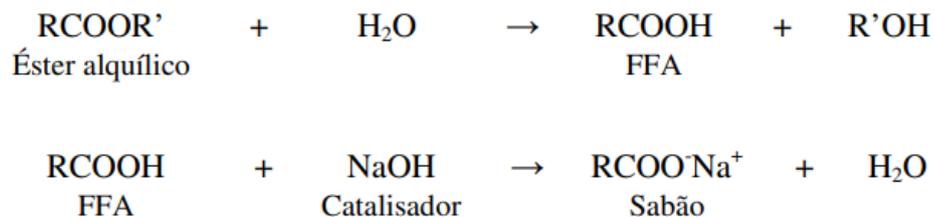
Las principales limitaciones de este proceso son la sensibilidad:

el contenido de ácidos grasos libres (FFA): ácidos monocarboxílicos que se encuentran naturalmente en aceites y grasas y no están unidos al glicerol; y

a la concentración de agua en el medio de reacción: valores del 0,1% ya reducen significativamente la conversión.

La presencia de ácidos grasos libres y agua favorece la formación de jabón, en detrimento de la formación de ésteres.

El éster de alquilo reacciona con agua para formar ácido graso libre. El ácido graso, a su vez, reacciona con el catalizador básico, formando jabón (SHARMA y SINGH, 2009). Ambas reacciones se muestran en la siguiente figura. El jabón aumenta la viscosidad, forma geles que reducen la producción de ésteres y dificulta la separación de biodiesel y glicerol (ABBASZAADEH et al., 2012).



*Figura 3.* Reacción de formación de ácidos grasos libres y reacción de formación de jabón

(Fuente: ABBASZAADEH et al., 2012).

El uso de NaOH o KOH como catalizadores forma agua en el medio de reacción, como resultado de la presolubilización de hidróxidos en alcohol para la producción de alcóxido (metóxido de sodio, en el caso de metanol, o etóxido de sodio, en el caso de etanol), que actúa como el verdadero catalizador de la reacción. La presencia de agua favorece inevitablemente la reacción de saponificación. El uso directo de alcóxidos (de la disolución de sodio metálico en alcohol, por ejemplo) previene la formación de agua, mejorando el rendimiento de la reacción (KUCEK et al., 2007).

Como se mencionó, el mayor componente del costo total del biodiésel es el aceite que se utiliza como materia prima. Una forma de reducir los costos es aprovechar el aceite de cocina usado y la grasa animal, desechos de otras actividades que necesitan una eliminación adecuada. Estas materias primas no compiten con la producción de alimentos ni presentan costos directos de producción y siembra. Sin embargo, este tipo de aceite tiene un alto contenido en ácidos grasos libres, los cuales son perjudiciales para el proceso de producción de biodiésel convencional mediante catálisis básica homogénea. Por tanto, es necesario tratar el aceite antes de someterlo a la reacción -extrayendo los ácidos grasos libres o favoreciendo su esterificación para formar biodiésel-, lo que conlleva un incremento de costes, o buscar otra forma de realizar la conversión en biodiésel. Se han

desarrollado muchos estudios que buscan alternativas al proceso de producción de biodiesel convencional (BORGES y DÍAZ, 2012; ATABANI et al., 2012; YUNUS KHAN et al., 2014; AVHAD y MARCHETTI, 2015).

La reacción con catálisis homogénea ácida no es sensible a la presencia de ácidos grasos libres en la materia prima, pero necesita una relación alcohol: aceite más alta y más tiempo para obtener un rendimiento menor que la catálisis homogénea básica. La reacción es considerablemente sensible al agua, quedando completamente inhibida a una concentración superior al 5%. Además, la corrosión del equipo aumenta en un ambiente ácido (ABBASZAADEH et al., 2012). La aplicación de catálisis ácida se puede utilizar para reducir el contenido de ácidos grasos libres a un valor aceptable para la catálisis básica, mediante una reacción de esterificación, promoviendo la conversión de aceite en biodiesel en dos pasos, en lugar de solo uno (SHARMA y SINGH, 2009).

Como se muestra en la Figura 3-5, los productos de reacciones conducidas con catálisis homogénea, tanto básica como ácida, requieren separación y purificación, pasos que aumentan significativamente el costo total del producto (ABBASZAADEH et al., 2012). Además, en el caso de la catálisis básica homogénea, es difícil eliminar trazas de Na y K del biodiesel, requiriendo el uso de grandes cantidades de agua de lavado, cuyo tratamiento posterior también encarece el proceso (BORGES y DÍAZ, 2012).

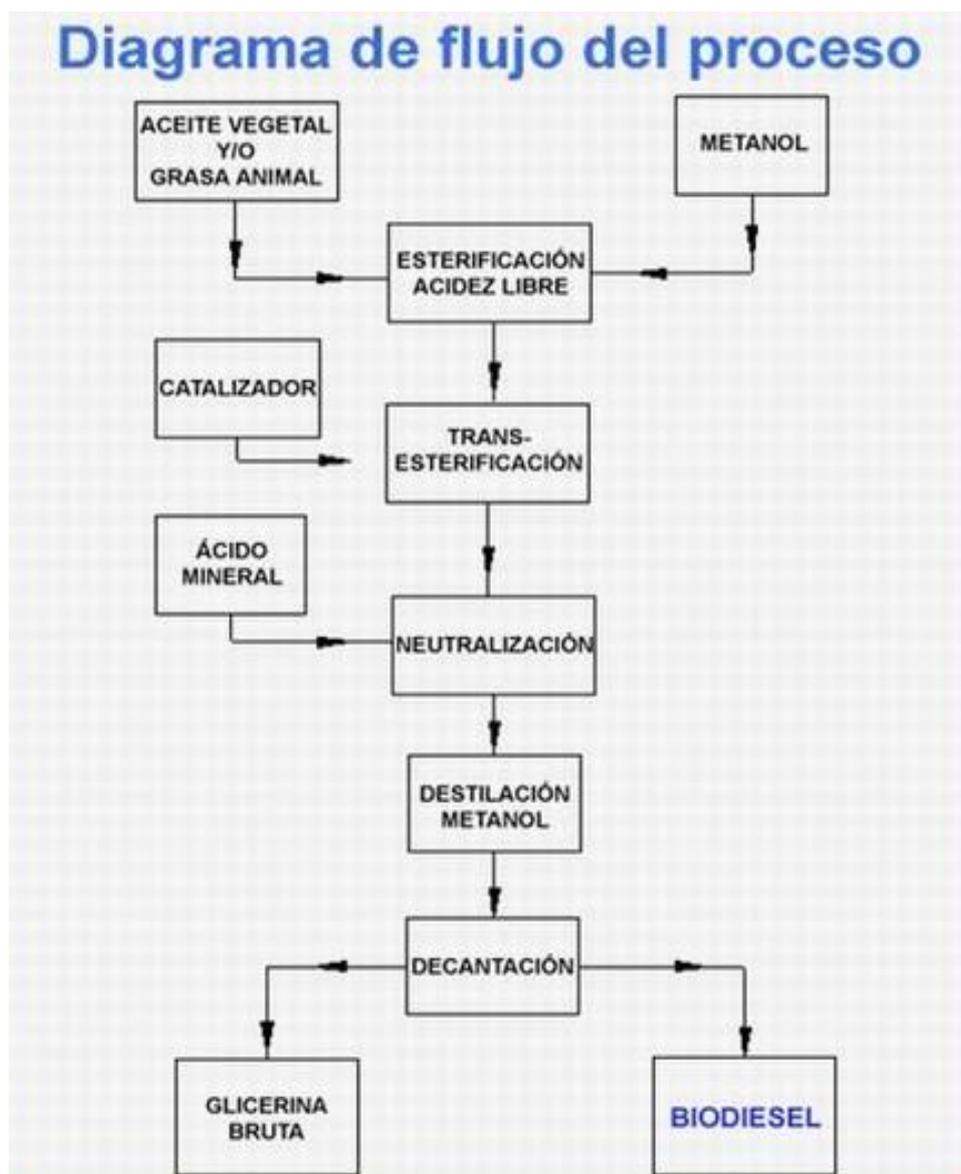


Figura 4. Proceso industrial del mecanismo de biodiesel

Fuente: [Producción de biodiesel \(página 2\) - Monografias.com](#)

Los catalizadores heterogéneos tienen la ventaja de proporcionar una fácil separación de los productos después de la reacción. Pueden reutilizarse e implementarse en un proceso continuo. Los catalizadores heterogéneos pueden ser ácidos o básicos, siendo los básicos más activos. El principal problema con la catálisis heterogénea básica es que, al igual que con la catálisis homogénea, hay formación de jabón en presencia de

ácidos grasos libres y / o agua (ABBASZAADEH et al., 2012; RAMACHANDARAN et al., 2013; BORGES y DÍAZ, 2012).

Los catalizadores ácidos sólidos tienen varias ventajas sobre los básicos: la reacción es insensible a los ácidos grasos libres y es posible llevar a cabo la esterificación de los ácidos grasos libres, ocurriendo la esterificación y la transesterificación simultáneamente. Sobre los catalizadores homogéneos ácidos, existe la ventaja de reducir la corrosión. Sin embargo, las velocidades de reacción son bajas y son posibles reacciones secundarias indeseables.

Los procesos catalizados por catalizadores heterogéneos, tanto ácidos como básicos, aún requieren largos tiempos de reacción y / o altas temperaturas y / o una alta relación alcohol: aceite para lograr conversiones aceptables (ABBASZAADEH et al., 2012; RAMACHANDARAN et al., 2013).

La irradiación con microondas ha demostrado ser un método adecuado para acelerar la reacción de transesterificación catalizada por catalizadores tanto homogéneos como heterogéneos, con posible aumento del rendimiento y reducción del consumo de energía, la cantidad de catalizador y alcohol (MOTASEMI y ANI, 2012). Como se mostró anteriormente, las reacciones con catalizadores heterogéneos, a pesar de tener las ventajas de una fácil separación del producto y la posibilidad de reutilizar los catalizadores, aún tienen tiempos de reacción largos y / o altas temperaturas y / o alta relación alcohol: aceite para alcanzar conversiones aceptables. Por tanto, combinar estos procesos con el uso de microondas es una forma prometedora de hacerlos viables.

#### **2.2.5. Tipos de reactores**

Un reactor químico es un equipo de proceso en el que se alimentan sustancias químicas para hacerlas reaccionar químicamente entre sí con el fin de elaborar un producto deseado. Los reactores químicos están diseñados de tal manera que aumentan el

valor actual neto de una reacción determinada y se logra asegurando la máxima eficiencia para generar el producto deseado. (Engineering, 2012)

### **Reactor Batch**

Un reactor discontinuo es un recipiente cerrado en el que ocurren reacciones y es un tipo de reactor no continuo. Los reactivos se alimentan al reactor todos a la vez inicialmente. El recipiente contiene un agitador. El propósito del agitador es mezclar bien los reactivos para que el contacto los haga reaccionar juntos de manera eficiente y produzcan productos. (Engineering, 2012)

Para manejar reacciones exotérmicas, el reactor discontinuo a menudo está equipado con serpentines de enfriamiento. Para trabajar con reacciones endotérmicas, el reactor discontinuo tiene disposiciones para calentar la mezcla de reacción.



*Figura 5.* Reactor Batch

El reactor discontinuo es un reactor transitorio no estacionario. Significa que el grado de conversión dentro del reactor depende del tiempo. Debido al agitador, el reactor discontinuo es de naturaleza muy uniforme. Significa que el grado de conversión no depende de la ubicación dentro del reactor. En un momento dado, la extensión de la

reacción en cualquier lugar del volumen del reactor será igual entre sí. (Engineering, 2012)

### **Ventajas**

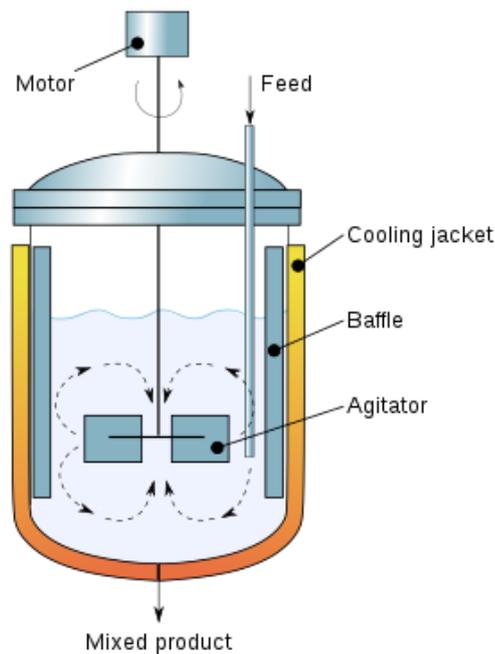
La mayor ventaja de operar un reactor discontinuo es su versatilidad. El mismo reactor por lotes se puede utilizar para reaccionar químicamente una variedad bastante diferente de reactivos. Los reactores discontinuos se utilizan especialmente en los casos en que la reacción produce muchos productos. Los reactores discontinuos se utilizan a menudo en laboratorios para estudiar la cinética de los sistemas de reacción en fase líquida.

### **Desventajas**

La desventaja del reactor por lotes es que requiere mucha mano de obra para cargar constantemente los reactivos, descargar productos y luego limpiar el reactor para el siguiente lote.

### **Reactor de tanque agitado continuo (C.S.T.R)**

Un reactor de tanque agitado continuo (C.S.T.R) también se denomina a menudo reactor de flujo mixto (M.F.R). En este reactor también ocurre la reacción en un tanque cerrado. El tanque también tiene un agitador para mezclar bien los reactivos. Es diferente del reactor discontinuo en el sentido de que el nombre mismo indica que es un tipo de equipo continuo. (Engineering, 2012)



*Figura 6. Reactor continuo*

Los reactivos ingresan al reactor a un cierto caudal másico, reaccionan dentro del recipiente durante un tiempo determinado por el espacio-tiempo del reactor y luego forman productos. Los productos salen del reactor con el mismo caudal másico. Un espacio de tiempo es el tiempo necesario para procesar un volumen de reactor. (Engineering, 2012)

El C.S.T.R es un equipo de estado estable. Significa que el grado de conversión no depende del tiempo. El agitador hace que la concentración sea uniforme en todo el reactor. Significa que el grado de conversión no depende también de la ubicación. El grado de conversión depende del volumen del reactor. (Engineering, 2012)

### **Ventajas**

La mayor ventaja de utilizar un C.S.T.R en las industrias es que puede producir una gran cantidad de productos y, al ser un reactor de estado estacionario continuo, el reactor puede funcionar durante horas y horas.

### Desventajas

La desventaja es que un C.S.T.R no se puede usar para reacciones que tienen una cinética muy lenta porque requerirá un reactor de volumen muy grande. El costo operativo y de fabricación del reactor puede hacer que sea inviable. En este caso se utiliza un reactor discontinuo.

### Reactor de flujo de pistón (P.F.R)

Un reactor de flujo pistón (P.F.R) también se denomina en ocasiones reactor tubular continuo (C.T.R). En un modelo idealizado, se puede considerar que el perfil de la mezcla de reacción está formado por varios tapones y cada tapón tiene una concentración uniforme. (Engineering, 2012)

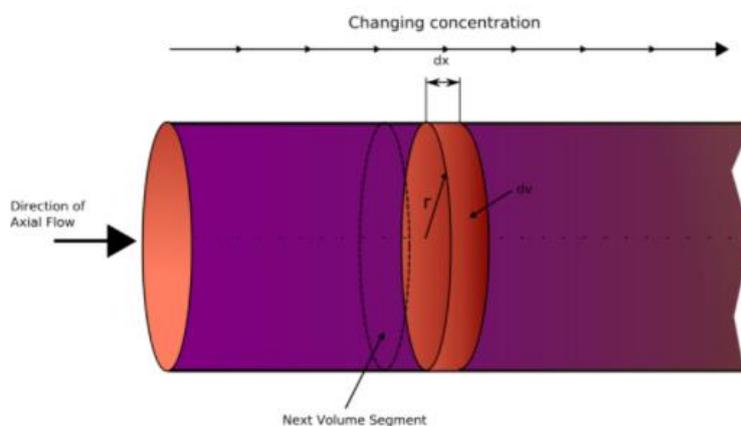


Figura 7. Reactor de flujo pistón (P.F.R)

El modelo idealizado de P.F.R asume que no hay mezcla axial. Significa que no hay mezcla posterior dentro del reactor. (Engineering, 2012)

### Ventajas

La ventaja de PFR sobre CSTR es que, para el mismo espacio de tiempo y el mismo nivel de conversión, el volumen de PFR es relativamente más pequeño que un CSTR, lo que significa que se necesita un espacio más pequeño para el reactor también para el mismo volumen de reactor el nivel de conversión es mayor en PFR que en CSTR

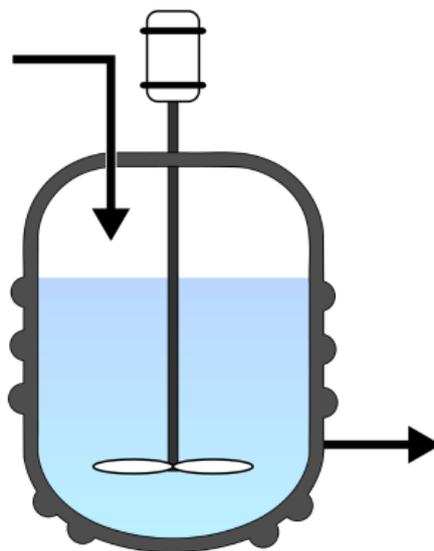
(Engineering, 2012)A menudo, los P.F.R se utilizan para estudiar la cinética de las reacciones catalíticas en fase gaseosa. (Engineering, 2012)

### **Desventajas**

La desventaja es que si realizamos una reacción exotérmica en un P.F.R entonces los gradientes de temperatura son difíciles de controlar. El costo operativo y de mantenimiento de un P.F.R también es mayor que el de un C.S.T.R. (Engineering, 2012)

### **Reactor Semi – Batch**

Un reactor semicontinuo es un reactor de semiflujo. Es una modificación del reactor discontinuo. También es un recipiente cerrado que contiene un agitador con el fin de mezclar bien los reactivos. La diferencia es que uno de los reactivos se carga completamente inicialmente en el reactor y el otro reactivo se carga continuamente en el reactor a medida que avanza el tiempo. (Engineering, 2012)



*Figura 8. Reactor Semi – Batch*

### **Ventajas**

La ventaja de utilizar un reactor semidiscontinuo es que si estamos realizando múltiples reacciones tenemos un mayor control sobre el rendimiento o la selectividad de los productos. Este reactor es extremadamente útil cuando estamos llevando a cabo una

reacción exotérmica ya que el flujo continuo del otro reactivo se puede variar para controlar mejor la reacción exotérmica (Engineering, 2012).

### **Desventajas**

Si queremos escalar el proceso de semi-lotes, entonces la desventaja sobre los reactores de proceso continuo (C.S.T.R y P.F.R) es que los costos de capital por unidad aumentan relativamente mucho. Se requiere más mano de obra para cargar y descargar el contenido del reactor, limpiar las palas, limpiar los reactores, etc. (Engineering, 2012)

## **2.3. Definiciones conceptuales**

### **Biodiesel:**

Biocombustible obtenido a partir de diversos mecanismos o procesos químicos, entre los cuales el mas conocido es el de transesterificación.

### **Densidad:**

Es un parámetro escalar que está en función a la masa sobre el volumen determinado de una sustancia liquida.

### **Ecuaciones de Diseño:**

Son parámetros matemáticos que tienen la finalidad de calcular detalladamente las dimensiones adecuadas de una superficie o tanque con la finalidad de emplearlas para determinar los fluidos dentro del sistema de obtención de biodiesel.

### **Reactor por lotes:**

Un reactor semicontinuo es un reactor de semiflujo. Es una modificación del reactor discontinuo. También es un recipiente cerrado que contiene un agitador con el fin de mezclar bien los reactivos.

### **Transesterificación:**

Mecanismo en el cual se disocian las moléculas del metóxido de sodio y un aceite de origen vegetal o animal, este puede ser aceite de oliva, de soya o grasa animal.

**Viscosidad:**

Es un parámetro que se enfoca en determinar la resistencia producida por tensiones de corte dentro de un fluido.

**2.4. Hipótesis de la investigación****2.4.1. Hipótesis General**

Es posible diseñar un reactor intermitente para la obtención de biodiesel a partir de aceites reciclados de cocina.

**2.4.2. Hipótesis Específica**

- Es posible determinar el tipo de reactor adecuado y óptimo para el diseño de un reactor de obtención de biodiesel.
- Es factible diseñar un reactor de producción de biodiesel con una capacidad de 30 litros.
- Es viable determinar la potencia requerida de los motores empleados en la producción de biodiesel.

## **CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1. Diseño metodológico**

#### **3.1.1. Tipo de investigación**

La investigación es de tipo cualitativo, esto más que todo porque nos permitirá conocer de manera directa las características que debe tener el reactor para producir biodiesel a partir de los aceites de cocina reciclados.

#### **3.1.2. Nivel de investigación**

El nivel presente es de tipo descriptivo y explicativo.

#### **3.1.3. Diseño**

Referente al diseño, lo primero que se debe tener en cuenta para diseñar un reactor en función a la obtención de biodiesel, es analizar los parámetros que se van a redimensionar, así mismo también tener en cuenta la cantidad de biodiesel que se desea producir, posteriormente el volumen, el tipo de agitación que se va a emplear y el tipo de reactor que se va a usar, en breve se muestra el procedimiento que se siguió con la finalidad de tener un diseño optimo y adecuado.

1. En primera instancia se revisó la bibliografía con la finalidad de recolectar toda la información relevante respecto al diseño del reactor desde las ecuaciones de diseño hasta el mecanismo de producción de biodiesel a partir de aceite reciclado.
2. Posteriormente se determinó cuanto de biodiesel se quiere producir, con la finalidad de ajustar las dimensiones de diseño a ese dato, la cantidad exacta a producir era de 30 litros de biodiesel.
3. Seguidamente se determinó el tipo de reactor a emplear, esto es muy importante, debido a que el reactor diseñado, debe cumplir con parámetros óptimos y rentables a largo plazo, entre por ejemplo el factor económico para

la producción y operación, el montaje que va a presentar, el medio de control, la seguridad que va a tener y la vigilancia que se debe de tener en función al reactor.

4. Luego de haber determinado el tipo de reactor se sometió a calcular los volúmenes de cada recipiente, entre los cuales son, el recipiente de metóxido, el recipiente del reactor y finalmente el recipiente de separación, a todos los recipientes se le aumento un margen de seguridad del 20%, esto con la finalidad de evitar algún derrame.
5. Seguidamente se evaluaron de manera objetiva los diferentes tipos de palancas o motores de agitación, para determinar cuál es el más optimo respecto a cada tanque, así mismo también, se determinaron los flujos de cada recipiente y su respectiva velocidad.
6. Finalmente se determinaron la potencia de cada motor o paleta, con la finalidad de saber cuántos kW se gastan en total al poner en ejecución el reactor, así mismo también se diseñó una imagen, con la finalidad de dar a conocer el adecuado prototipo de reactor para la obtención de biodiesel a partir de los aceites de cocina reciclados.

## **3.2. Población y muestra**

### **3.2.1. Población**

La población está conformada más que todo por los 30 litros de biodiesel a obtener en función al prototipo del reactor.

### **3.2.2. Muestra**

La muestra está conformada por los parámetros específicos y puntuales respecto al diseño del reactor.

## **3.3. Operacionalización de variables.**

Tabla 3. Cuadro de Operacionalización

| <b>Variables</b>              | <b>Definición conceptual</b>   | <b>Definición Operacional</b>   | <b>Dimensiones</b>                          | <b>Indicadores</b>   |
|-------------------------------|--|---|---|--|
| <b>Diseño de un reactor</b>   | Es un conjunto de parámetros o ecuación que presentan la finalidad de brindar un prototipo redimensionado, para producir algún compuesto a base de una materia prima, en su interior suceden diversas reacciones con la finalidad de obtener una mezcla terminada. | Las dimensiones del diseño del reactor van a estar en función a las ecuaciones de diseño, en este caso para determinar su volumen, altura, velocidad tangencial del fluido en el interior y el tipo de motor a emplear.   | Tipo de reactor<br><br>Ecuaciones de diseño | Batch<br>Continuo<br>P.F.R<br><br>Altura<br>Volumen<br>Velocidad tangencial<br>Tipo de motor |
| <b>Obtención de biodiesel</b> | Series de procesos en la cual se va a producir biodiesel a partir de materia prima, esta materia prima puede ser de origen animal o vegetal, así mismo también se puede emplear aceites reciclados.  | Se obtiene biodiesel a partir del aceite de cocina utilizado, esto con el fin de poder reutilizarlo para producir un combustible no contaminante y amigable con el medio ambiente, para obtenerlo debe pasar por tres procesos el cual es el de metóxido, la reacción y finalmente la separación. | Parámetros<br><br>Mecanismo                 | Densidad<br>Viscosidad<br>Tipo de fluido<br><br>Metóxido<br>Reactor<br>Separación            |

Fuente: Elaboración propia

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

#### **3.4.1 Técnicas a emplear**

Las técnicas empleadas en la investigación, se basa más que todo en la observación directa e indirecta, revisión bibliográfica respecto a las ecuaciones de diseño en función al reactor Batch y por ende también a los parámetros necesarios para plasmar un diseño o prototipo de un reactor optimo y adecuado con el fin de producir biodiesel de manera oportuna.

### **3.5. Técnicas para el procesamiento de información**

Las técnicas más empleadas en la investigación fueron los programas o paquetes de office 365, los más rescatados son el Microsoft Word, Excel y power point, esto más que todo con el fin de analizar y procesar los datos para que los cálculos sean correctos y verdaderos.

## CAPITULO IV: RESULTADOS

### 4.1. Determinación del reactor adecuado.

Con el fin de desarrollar el diseño adecuado para la producción a escala del biodiesel empleando como materia base aceites reciclados, se efectuó la comparación de dos reactores respecto a la bibliografía, los cuales son los más utilizados en función a la obtención de biodiesel y estos se especifican en la posterior tabla:

Tabla 4. *Determinación del reactor.*

| Parámetros                                 | Reactor por lotes |           | Reactor continuo      |           |
|--|-------------------|-----------|-----------------------|-----------|
|  |                   |           |                       |           |
| <b>Nivel de producción</b>                 | Mínimo            | <b>5</b>  | Máximo                | <b>4</b>  |
| <b>Factor económico para la producción</b> | Mínimo            | <b>5</b>  | Costoso               | <b>3</b>  |
| <b>Montaje</b>                             | Sencillo          | <b>5</b>  | Detallado             | <b>4</b>  |
| <b>Medio de control</b>                    | Sencillo          | <b>5</b>  | Desarrollado          | <b>4</b>  |
| <b>Seguridad</b>                           | Elevada           | <b>3</b>  | Mínima                | <b>5</b>  |
| <b>Vigilancia</b>                          | Individualizada   | <b>5</b>  | Aparatos electrónicos | <b>3</b>  |
| <b>Factor económico para la operación</b>  | Máximo            | <b>4</b>  | Mínimo                | <b>5</b>  |
| <b>Total</b>                               |                   | <b>32</b> |                       | <b>28</b> |

Fuente: Elaboración propia

Posterior al estudio efectuado con el fin de determinar el reactor óptimo para la producción de biodiesel, se indica de manera objetiva que el mejor reactor es el de lote o Batch, debido a que presenta los requisitos necesarios para la obtención de biodiesel.

#### 4.2. Determinación de volumen en cada recipiente.

El cálculo referente a la cantidad adecuada se estableció en función a las mezclas estequiométricas y por ende a la cantidad deseada del producto.

- 4 gr. de Hidróxido de sodio por cada litro de aceite reciclado.
- 0.25 litros de metanol por cada litro de aceite reciclado.

**Calculo para el metanol:**

$$x = \frac{\text{litros de aceite reciclado} * \text{metanol empleado por litro}}{\text{litro de aceite}}$$

$$x = \frac{30 * 0.25}{1} = 7.5 \text{ litros de } CH_4O$$

**Calculo para el Hidróxido de sodio:**

$$x = \frac{\text{litros de aceite reciclado} * \text{Hidroxido empleado por litro}}{\text{litro de aceite}}$$

$$x = \frac{30 * 4 \text{ gr}}{1} = 120 \text{ g } NaOH$$

**Densidad del NAOH**

Con la finalidad de determinar el volumen se debe tomar como dato la densidad de este NAOH empleando la siguiente ecuación:

$$\rho_{NAOH} = 2.1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

Por lo que:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Remplazando y ordenando:

$$V = \frac{120}{2.1} = 57.14 \text{ cm}^3$$

Lo que convirtiéndolo a litros es igual a 0.05714 litros.

#### **Determinación de las dimensiones del recipiente de metóxido:**

Para la determinación del recipiente de metóxido se suma la cantidad del volumen de etanol más la de hidróxido de sodio.

$$V_{\text{metoxido}} = V_{\text{CH}_4\text{O}} + V_{\text{NAOH}}$$

$$V_{\text{metoxido}} = 7.5 \text{ litros} + 0.05714 \text{ litros}$$

$$V_{\text{metoxido}} = 7.55714 \text{ litros}$$

Posteriormente a ese cálculo se le añade un parámetro de seguridad del 20% con el fin de evitar algún derrame no deseado del fluido.

$$V_{\text{metoxido}} = 7.55714 + 20\%$$

$$V_{\text{metoxido}} = 9.068568 \text{ litros}$$

#### **Determinación de las dimensiones del reactor:**

Para determinar el volumen referente al reactor este se determina a través del volumen del recipiente de metóxido y del volumen neto del óleo reciclado, lo cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_{\text{reactor}} = \text{Volumen neto del oleo reciclado} + \text{volumen del metoxido}$$

$$V_{\text{reactor}} = 30 \text{ litros} + 9.068568 \text{ litros}$$

$$V_{\text{reactor}} = 39.069 \text{ litros}$$

Le agregamos el 20 por ciento de seguridad:

$$V_{reactor} = 39.069 \text{ litros} * 20\%$$

$$V_{reactor} = 46.88 \text{ litros}$$

**Determinación del volumen del recipiente de división glicérica, baldeado y desecado.**

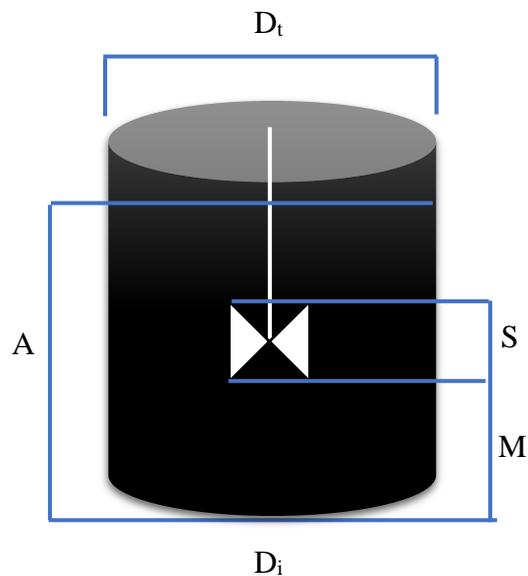
Con la finalidad de determinar el volumen del recipiente mencionado se efectúa la operación del volumen del reactor más el 50 por ciento de H<sub>2</sub>O.

$$V_{separacion} = \text{volumen del reactor} + 50\% \text{ de H}_2\text{O}$$

$$V_{separacion} = 46.88 \text{ litros} + 23.44 \text{ litros}$$

$$V_{separacion} = 70.32 \text{ litros}$$

**Determinación del diámetro y altura de cada tanque.**



Igualades geometrías de acuerdo a, con la finalidad de empezar el diseño del reactor:

$$\frac{A_f}{D_t} = 1 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\frac{S}{D_i} = \frac{1}{5} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\frac{M}{D_i} = 1 \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\frac{D_i}{D_t} = \frac{1}{3} \dots\dots\dots (4.4)$$

En lo cual:

$A_f$  = Altura del Fluido

$D_t$  = Diámetro del tanque

$S$  = Ancho del agitador

$D_i$  = Diámetro del impulsor

$M$  = Altura desde la parte inferior del tanque hasta el agitador

Con el fin de calcular adecuadamente los diámetros y alturas respecto a cada tanque, se van a tomar de referencia como base inicial las igualdades geométricas mencionadas con anterioridad.

#### **Determinación del diámetro y altura del recipiente de metóxido.**

Con el fin de determinar el diámetro y altura del recipiente donde se va a efectuar la reacción de metóxido, se va a emplear la ecuación 4.1, así como se observa a continuación:

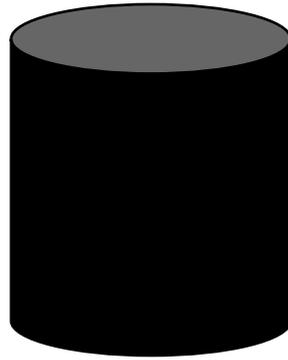


Figura 9. Recipiente para la reacción de metóxido.

$$\frac{A_f}{D_t} = 1$$

$$A_f = D_t$$

$$V = A_b * h$$

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * D_t$$

$$V = \frac{\pi * D^3}{4}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_t}{\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 9000 \text{ cm}^3}{\pi}}$$

$$D = 22.545 \text{ cm} = 226 \text{ mm}$$

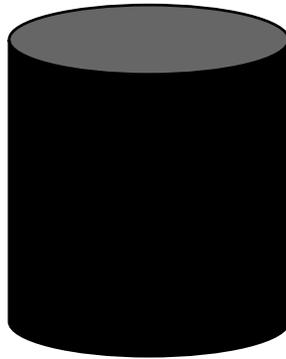
$$H = D_{\text{metoxido}} + 20\%$$

Se le aumenta el 20 por ciento al tanque de metóxido con la finalidad de evitar y no ocasionar derrame alguno, por lo que quedaría de la siguiente manera:

$$H = 226 \text{ mm} + 45.2 \text{ mm}$$

$$H = 271.2 \text{ mm}$$

**Determinación del diámetro y altura del reactor.**



*Figura 10.* Reactor Batch o por lote.

$$\frac{A_f}{D_r} = 1$$

$$A_f = D_r$$

$$V = A_b * h$$

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * D_r$$

$$V = \frac{\pi * D^3}{4}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_r}{\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 47000 \text{ cm}^3}{\pi}}$$

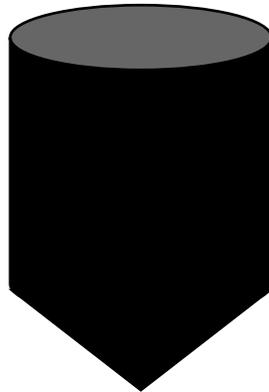
$$D = 39.12 \text{ cm} = 391 \text{ mm}$$

Por lo tanto, también se le suma un 20 por ciento respecto a la cantidad obtenida:

$$H = 391 \text{ mm} + 76.6 \text{ mm}$$

$$H = 469.2 \text{ mm} = 46.92 \text{ cm}$$

**Determinación del diámetro y altura del recipiente de separación.**



*Figura 11.* Tanque de separación

$$\frac{A_f}{D_s} = 1$$

$$A_f = D_s$$

$$V = A_b * h$$

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * D_s$$

$$V = \frac{\pi * D^3}{4}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_s}{\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * 70000 \text{ cm}^3}{\pi}}$$

$$D = 44.67 \text{ cm} = 447 \text{ mm}$$

Por lo tanto, también se le suma un 50 por ciento respecto a la cantidad obtenida:

$$H = 447 \text{ mm} + 223.5 \text{ mm}$$

$$H = 670.5 \text{ mm} = 67.05 \text{ cm}$$

**Determinación de la velocidad tangencial con la finalidad de escoger la paleta.**

La ecuación adecuada para determinar la velocidad tangencial en cada tanque con el fin de seleccionar la paleta adecuada basándonos en los cálculos de radio del impulsor y la velocidad angular, es la siguiente (Gieck & Gieck, 2003):

$$v = \omega * r$$

En donde la v significa velocidad y la letra w significa rapidez angular.

**Determinación de la velocidad tangencial del recipiente de metóxido.**

$$v = \omega * r$$

$$v_{\text{metoxido}} = 20.94 * 0.09$$

$$v_{\text{metoxido}} = 1.8846 \text{ m/s}$$

**Determinación de la velocidad tangencial del reactor.**

$$v = \omega * r$$

$$v_{\text{reactor}} = 20.94 * 0.11$$

$$v_{\text{reactor}} = 2.3034 \text{ m/s}$$

**Determinación de la velocidad tangencial del recipiente de separación.**

$$v = \omega * r$$

$$v_{separador} = 20.94 * 0.13$$

$$v_{separador} = 2.7222 \text{ m/s}$$

### Determinación del motor de impulso:

En breve se observará de manera detallada un cuadro comparativo de los diferentes tipos de impulsores que tienen presencia en el mecanismo de agitación en las diversas etapas de obtención del biodiesel.

Tabla 5. Determinación del motor de impulso

| Parámetros                  | Motor ancla |           | Moto hélice   |           | Motor inclinado    |           | Motor plano de disco |           |
|-----------------------------|-------------|-----------|---------------|-----------|--------------------|-----------|----------------------|-----------|
|                             |             |           |               |           |                    |           |                      |           |
| <b>Régimen</b>              | Laminar     | <b>3</b>  | Turbulento    | <b>4</b>  | Laminar turbulento | <b>5</b>  | Turbulento           | <b>4</b>  |
| <b>Velocidad tangencial</b> | 2 m/s       | <b>3</b>  | 2 m/s a 7 m/s | <b>4</b>  | 2 ms/ a 10 m/s     | <b>5</b>  | 5 m/s a 10 m/s       | <b>2</b>  |
| <b>Viscosidad</b>           | < 1000 Pa*s | <b>5</b>  | <20 Pa*s      | <b>5</b>  | < 100 Pa*s         | <b>5</b>  | < 20 Pa*s            | <b>5</b>  |
| <b>Movimiento</b>           | Tangencial  | <b>3</b>  | Axial         | <b>3</b>  | Axial y Radial     | <b>5</b>  | Radial               | <b>3</b>  |
| <b>Precio</b>               | Elevado     | <b>2</b>  | Elevado       | <b>2</b>  | Mínimo             | <b>5</b>  | Elevado              | <b>2</b>  |
| <b>Montaje</b>              | Complicado  | <b>2</b>  | Complicado    | <b>2</b>  | Sencillo           | <b>5</b>  | Complicado           | <b>2</b>  |
| <b>Total</b>                |             | <b>18</b> |               | <b>20</b> |                    | <b>30</b> |                      | <b>18</b> |

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente efectuada la comparación respecto a los diversos tipos de motor para impulsar las mezclas en los recipientes, se indica de manera objetiva que el tipo de impulsor necesario y adecuado es de pala inclinada para ambos fluidos los cuales son axiales y radiales, esto más que todo con la finalidad de no generar sedimentos dentro del

recipiente. Una característica relevante en función a otros impulsores es la facilidad del diseño y el montaje, así mismo también el factor económico.

### **Determinación de la potencia de las resistencias respecto al reactor y depósito de separación.**

Este punto es importante, debido a que nos permitirá determinar las potencias respecto a las resistencias generadas en cada recipiente, debido a que estos brindaran la energía necesaria para el precalentamiento de aceite usado y del mismo modo mantener una temperatura constante con el fin de llevar a cabo una transesterificación optima y por ende posteriormente un separado adecuado, los cálculos a emplear están en función a las densidades de cada compuesto y el volumen. Empleando la ecuación referenciada por (Cengel & Boles, 2008) indica lo siguiente:

#### **Determinación de la potencia en función a la resistencia del reactor.**

Con la finalidad de dar a conocer la potencia en función a resistencia es de vital importancia calcular la masa del aceite reciclado por ende se empleará la siguiente ecuación:

$$\rho_{aceite\ usado} = \frac{m}{v}$$

$$\rho_{aceite\ usado} = 0.91\ g/cm^3$$

$$m = \rho_{aceite\ usado} * V_{reactor}$$

$$m = 0.91 * 47000$$

$$m = 42770\ g = 42.77\ kg$$

Luego de determinar la masa adecuada, se pasa a remplazar dicho valor en la siguiente ecuación, con la finalidad de hallar el calor requerido para incrementar la temperatura (Cengel & Boles, 2008).

$$Q = c * m * \Delta t$$

En el cual:

Q = Calor necesario con el fin de incrementar la temperatura

C = Calor específico

M = masa del aceite usado

$\Delta t$  = Diferencial de temperatura

Por ende:

$$T_{\text{inicial}} = 25^{\circ}\text{C} = 298.15 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_{\text{final}} = 62^{\circ}\text{C} = 335.15 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

Los resultados obtenidos en función al cambio de temperatura se determinaron de acuerdo a la temperatura ambiente, la cual preferimos considerar a 25°C y la temperatura final la cual fue de 62°C, esto más que todo porque el punto de evaporación del metanol es a los 65°C (Textos científicos, 2005).

$$Q = \left(1.8 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg } ^{\circ}\text{K}}\right) * (42.77 \text{ kg}) * (40^{\circ}\text{K})$$

$$Q = 3079.44 \text{ KJ}$$

Posteriormente se calcula la potencia necesaria la cual se realiza a través de la siguiente ecuación (Cengel & Boles, 2008).

$$P = \frac{E}{T}$$

$$P = \frac{3079.44 \text{ KJ}}{1800 \text{ s}}$$

$$P = 1.71 \text{ KW}$$

### **Determinación de la potencia respecto a la resistencia del depósito de separación.**

Para determinar la potencia de resistencia dentro del recipiente de separación, lavado y secado, se asumirá respectivamente la densidad promedio del biodiesel de acuerdo a (NTE INEN 2482, 2009). Así mismo también se utilizó la densidad del agua, esto más que todo porque ambos fluidos se mezclan en este depósito.

#### **Biodiesel**

Parámetros obtenidos:

$$\rho = 870 \text{ kg/ m}^3$$

$$c = 1966.48 \text{ j/kg } ^\circ\text{C}$$

$$t_i = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_f = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Se determinó la masa a través de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V_{reactor}}$$

$$m = \rho * V_{reactor}$$

$$m = \left(870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (0.047\text{m}^3)$$

$$m = 40.89 \text{ kg}$$

Con la masa obtenida se reemplaza en la siguiente ecuación, con el fin de calcular el calor que se necesita para incrementar la temperatura y por ende hallar el valor de la potencia de resistencia.

$$Q = c * m * \Delta t$$

Por lo que quedaría:

$$Q = \left(1966.48 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right) * (40.89 kg) * (75^\circ C)$$

$$Q = 6030.79 kJ$$

Seguidamente se reemplaza en la ecuación:

$$P = \frac{E}{T}$$

$$P = \frac{6030.79 kJ}{3600 s}$$

$$P = 1.68 kW$$

De igual forma que se efectuó el valor de la potencia de la resistencia del biodiesel se pasa a determinar la del agua.

Parámetros obtenidos:

$$\rho = 1000 \text{ kg/ m}^3$$

$$c = 4.186 \text{ J/g } ^\circ C$$

$$t_i = 25 \text{ } ^\circ C$$

$$t_f = 100 \text{ } ^\circ C$$

Determinar el valor de la masa del agua basándose en la posterior ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V_{agua}}$$

$$m = \rho * V_{agua}$$

$$m = \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) * (0.02344 m^3)$$

$$m = 23.44 \text{ kg} = 23400 \text{ gr}$$

Con la masa obtenida se reemplaza en la siguiente ecuación, con el fin de calcular el calor que se necesita para incrementar la temperatura y por ende hallar el valor de la potencia de resistencia.

$$Q = c * m * \Delta t$$

$$Q = \left( 4.186 \frac{J}{g * ^\circ C} \right) * (23400 \text{ gr}) * (75^\circ C)$$

$$Q = 7346.43 \text{ kJ}$$

Seguidamente se reemplaza en la ecuación:

$$P = \frac{E}{T}$$

$$P = \frac{7346.43 \text{ kJ}}{3600 \text{ s}}$$

$$P = 2 \text{ kW}$$

Posteriormente calculada las potencias tanto del agua y del biodiesel se procede a sumar ambas cantidades con la finalidad de obtener una potencia global.

$$P_T = P_{biodiesel} + P_{agua}$$

$$P_T = 1.68 \text{ kW} + 2 \text{ kW}$$

$$P_T = 3.68 \text{ kW}$$

### 4.3. Determinación de la potencia de los motores.

Para determinar la potencia de los motores lo primero que se debe calcular el número de Reynolds, esto con la finalidad de saber qué tipo de flujo se presenta en los depósitos.

#### Determinación de Reynolds para el recipiente de metóxido.

Se determinará el número de Reynolds con la siguiente formula:

$$R_e = \frac{Nd^2\rho}{\mu}$$

Indicando lo siguiente:

N = velocidad de rotación (rpm)

d = diámetro del agitador (m)

$\rho$  = densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = viscosidad (Pa. s)

$$R_e = \frac{210 \frac{rev}{60 s} * (0.18m)^2 * 2980 \frac{kg}{m^3}}{5.40 * 10^{-4}}$$

$$R_e = 625.8 * 10^3$$

A través del cálculo de numero de Reynolds se determinó que el flujo es de tipo turbulento dentro del recipiente de metóxido, el cual se halló partir de la siguiente figura, el número de potencia equivale a 0.92 por lo que para seguir calculando se emplea la ecuación posterior.

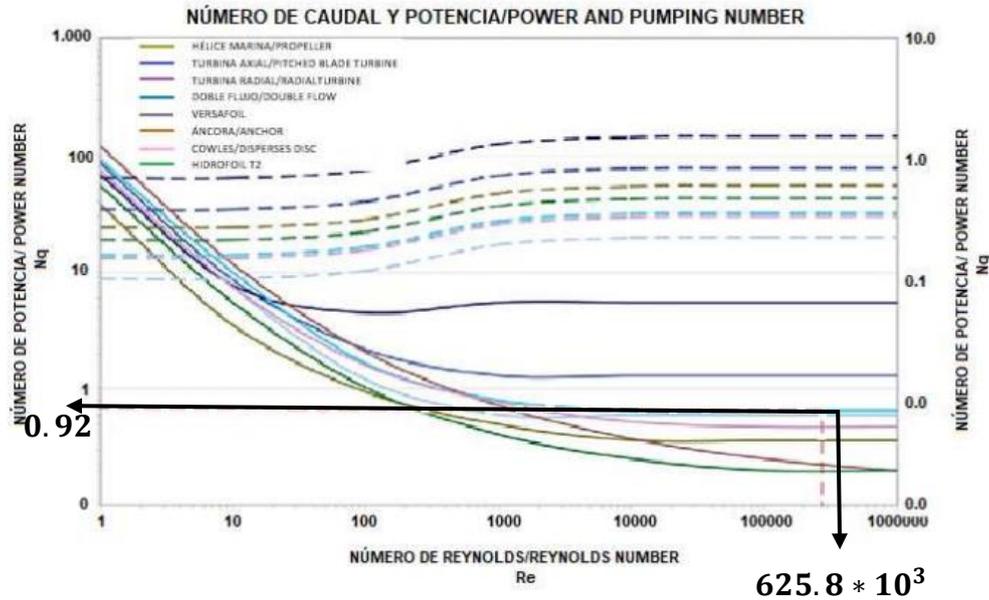


Figura 12. Numero de potencia relacionado con el número de Reynolds

$$N_p = \frac{P}{n^3 d^5 \rho}$$

$$N_p = 0.92$$

$$P = N_p * n^3 d^5 \rho$$

$$P = 0.92 * \left(210 \frac{rev}{60s}\right)^3 * (0.18m)^5 * 2890 \text{ kg/m}^3$$

$$P = 21.54 \text{ W}$$

### Determinación de la potencia de la paleta

Para determinar la potencia de la paleta se halla primero el torque, el cual puede ser calculado a través de la multiplicación de la inercia obtenida, esto más que todo se calculó en un software de simulación obteniendo los siguientes datos respecto a sus coordenadas:

Momentos de inercia = gramos\*milímetros cuadrados

Tabla 6. Datos calculados por el programa de simulación

| Coordenada | Inercia     |
|------------|-------------|
| xx         | 12016002.93 |
| yx         | -14.22      |
| zx         | 716.12      |
| xy         | -14.22      |
| yy         | 12016013.15 |
| zy         | 713.21      |
| xz         | -716.12     |
| yz         | 713.21      |
| zz         | 164539.24   |

Fuente: Elaboración propia

Por lo que entonces:

$$T = I * a$$

Siendo este:

T = torque

I = inercia

a = aceleración angular

P = potencia

 $\omega$  = velocidad angular

$$T = 164539.24 \text{ gmm}^2 * 41.88 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$T = 6.89 * 10^{-3} \text{ N} * \text{m}$$

$$P_{pala} = T * w$$

$$P_{pala} = 6.89 * 10^{-3} N * m * 20.94 \text{ rad/s}$$

$$P_{pala} = 0.144 \frac{N * m}{s}$$

Porque al final sumamos ambas potencias:

$$P_{global} = 0.144 W + 21.54 W$$

$$P_{global} = 21.684 W$$

Finalmente:

$$P_{nominal} = \frac{\text{Potencia global}}{\text{rendimiento}}$$

$$P_{nominal} = \frac{21.684 W}{0.7}$$

$$P_{nominal} = 30.98 W$$

Del mismo modo realizamos los cálculos para el tanque del reactor y el de separación, porque en forma simplificada quedaría:

Tabla 7. Cálculos de potencias determinados.

|                            | <b>Tanques en el proceso</b>              |   |   |
|----------------------------|---|---|---|
|                            | <b>Metóxido</b>                           | <b>Reactor</b>                            | <b>Separación</b>                         |
| <b>Potencia del fluido</b> | <b>21.54 W</b>                            | <b>57.67 W</b>                            | <b>173.25 W</b>                           |
| <b>Potencia de la pala</b> | <b>0.144 <math>\frac{N * m}{s}</math></b> | <b>0.272 <math>\frac{N * m}{s}</math></b> | <b>0.393 <math>\frac{N * m}{s}</math></b> |
| <b>Potencia Global</b>     | <b>21.684 W</b>                           | <b>57.942 W</b>                           | <b>173.643 W</b>                          |
| <b>Potencia nominal</b>    | <b>30.98 W</b>                            | <b>82.77 W</b>                            | <b>248.06 W</b>                           |

Fuente: Elaboración propia

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- El tipo de reactor óptimo para la utilización de la obtención de biodiesel a partir de aceites de cocina utilizados es el reactor Batch o por lotes, esto más que todo porque presenta un bajo nivel económico respecto a la producción y operación, el montaje es sencillo, no es tan complejo como los otros reactores, el medio de control es fácil, la seguridad es elevada y la supervisión es constante.
- El reactor de biodiesel diseñado es para obtener 30 litros de biodiesel, con ese cálculo se efectuaron las ecuaciones de diseño con la finalidad de determinar las dimensiones del prototipo las cuales se dividieron en 3 recipientes, el primero presenta un volumen de 9 litros, el segundo presenta una capacidad de 47 litros y el ultimo tanque que es el de separación presenta una capacidad de 70 litros.
- Finalmente, las potencias obtenidas en cada tanque varían respecto a la composición de la mezcla, siendo la potencia nominal de tanque de metóxido de 30.98 W, la potencia nominal del reactor de 82.77 W y la del tanque de separación 248.06 W.

### 5.2. Recomendaciones

- Es recomendable trabajar en el mecanismo de transesterificación a una temperatura menor a  $62^{\circ}$ , esto más que todo con la finalidad de evitar algún tipo de evaporación dentro del tanque.
- Es vital implementar programas informáticos que brinden una fácil automatización, dentro del mismo diseño, esto más que todo con la finalidad de mejorar a gran escala la eficiencia y productividad del trabajo.

## CAPITULO VI: FUENTES DE INFORMACIÓN

### 6.1. Bibliografía

Alain, S. N. (2016). *Diseño de un prototipo para la producción de biodiesel y glicerina utilizando aceites residuales aplicando un control moderno optimo*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/198131613.pdf>

Atabani. (2012). *A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112000044>

B.L Salvi, N. P. (2012). *Biodiesel resources and production technologies – A review*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211200233X>

Colmenares, Y. J. (2019). *Propuesta técnica para la producción de biodiesel a pequeña escala a partir de aceites usados dentro del campus de la Universidad Nacional de Piura*. Piura. Obtenido de <https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/UNP/2067/MIN-MOS-COL-19.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Delgado, V. C. (2011). *Parametros de diseño para la construcción de un reactor discontinuo y su elevación en la producción de biodiesel*. Obtenido de <http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2171/23357.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Diaz, A. F. (2010). *Diseño y construcción de un reactor piloto para la producción de biodiesel a base de aceite de Higuierilla*. Ibarra. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/7868/2/ART%C3%8DCULO.pdf>

- Engineering, C. (2012). *Chemical Engineering*. Obtenido de <https://chemicalengineeringworld.com/types-of-reactors/>
- Gimeno, D. M. (2016). *Diseño de un reactor de transesterificación para la obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales*. Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73470/MARSET%20-%20Dise%c3%b1o%20de%20un%20reactor%20de%20transesterificaci%c3%b3n%20para%20la%20obtenci%c3%b3n%20de%20biodiesel%20a%20partir%20de%20a....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guerrero, A. J. (2009). *Diseño y construcción de un reactor Batch para la obtención por transesterificación de biodiesel a partir de aceite de cocina*. RioBamba. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/248/1/96T00115.pdf>
- Nogueira, A. (2016). *Diseño y Construcción de una Planta Didáctica para la Producción de Biodiesel*. Obtenido de [http://alexbrasil.com.br/\\_upload/54ef095f31944d93c07c071bb0e0e0b6.pdf](http://alexbrasil.com.br/_upload/54ef095f31944d93c07c071bb0e0e0b6.pdf)
- Petroperu. (2020). *Biodiesel*. Obtenido de <https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/biodiesel/>
- Soares, L. R. (2015). *Produção de biodiesel em reator contínuo irradiado com micro-ondas via transesterificação com catalisador homogêneo*. Obtenido de [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A7NGFB/1/disserta\\_\\_o\\_laura\\_rodrigues\\_alves\\_soares.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A7NGFB/1/disserta__o_laura_rodrigues_alves_soares.pdf)