



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIEROS EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR PILOTO
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A BASE DE ACEITE DE
HIGUERILLA”**

AUTORES: DÍAZ CASTILLO ALEX FERNANDO

VACA ANDRADE JENNIFER ALEXANDRA

DIRECTOR: ING. CARLOS MAFLA Msc.

IBARRA – ECUADOR

2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD	1721158622		
APELLIDOS NOMBRES	DÍAZ CASTILLO ALEX FERNANDO		
DIRECCIÓN	Av. Dr. Luis Tobar Subia y Lcdo. Nelson		
EMAIL	afdiazc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO	022010220	TELÉFONO MÓVIL	0967946286

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD	1716482458		
APELLIDOS NOMBRES	VACA ANDRADE JENNIFER ALEXANDRA		
DIRECCIÓN	Av. Dr. Luis Tobar Subia y Lcdo. Nelson		
EMAIL	javacaa@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO	022483598	TELÉFONO MÓVIL	0994287020

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	Diseño y construcción de un reactor piloto para la producción de biodiésel a base de aceite de higuera.
AUTORES	DÍAZ CASTILLO ALEX FERNANDO VACA ANDRADE JENNIFER ALEXANDRA
FECHA	
PROGRAMA	<input checked="" type="checkbox"/> PRE GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA	INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ
ASESOR DIRECTOR	ING. CARLOS MAFLA

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

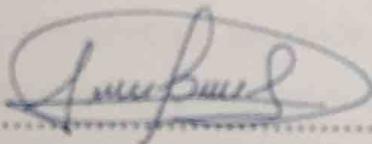
Yo, Alex Fernando Díaz Castillo con cédula de identidad Nro. 1721158622, y yo Jennifer Alexandra Vaca Andrade con cédula de identidad Nro. 1716482458 en calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros. Ibarra, a los 12 días del mes de enero del 2018.

LOS AUTORES:

Firma:



Nombres: Alex Fernando Díaz Castillo

Cedula: 1721158622

Firma:



Nombres: Jennifer Alexandra Vaca Andrade

Cedula: 1716482458

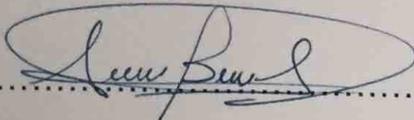


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

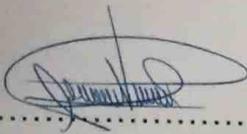
Yo, **ALEX FERNANDO DÍAZ CASTILLO**, con cedula de identidad Nro. 1721158622, y **JENNIFER ALEXANDRA VACA ANDRADE**, manifestamos nuestra voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, articulo 4, 5 y 6 en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A BASE DE ACEITE DE HIGUERILLA”**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 12 días del mes de enero del 2018.

Firma: 

Nombres: Alex Fernando Díaz Castillo

Cedula: 1721158622

Firma: 

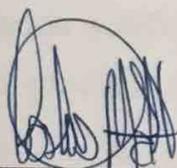
Nombres: Jennifer Alexandra Vaca Andrade

Cedula: 1716482458

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto fue realizado en su totalidad por el señor y señorita: Díaz Castillo Alex Fernando, Vaca Andrade Jennifer Alexandra, como requisito para la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz.

Atentamente,



Ing. Carlos Mafla

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por haberme dado la vida y por permitir que cumpla una meta muy importante en mi formación profesional es mi deseo como sencillo gesto de agradecimiento, dedicarle mi trabajo de grado a mis padres, por ser los pilares más importantes y por demostrarme su apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado. A mi hermana Estefania a quien amo mucho, le agradezco por estar siempre a mi lado y brindarme su apoyo.

Jennifer Vaca.

Este logro está dedicado a mis padres Luis y Lucinda, quienes, con mucho amor, lucharon y realizaron muchos sacrificios para que yo pueda salir adelante y así lograr uno de mis más anhelados sueños. A mis hermanos Edwin y Karen los cuales admiro y quiero mucho, gracias por su apoyo fraterno e incondicional.

Alex Díaz.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte que nos abrió sus puertas y en sus aulas recibimos las más gratas enseñanzas para ser mejores personas y buenos profesionales.

A nuestros profesores de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, cuya personalidad y enseñanza contribuyeron al desarrollo de nuestros estudios, al Ingeniero Carlos Mafla director de tesis por su valiosa guía y asesoramiento para la elaboración de la presente tesis.

El agradecimiento especial a nuestras familias, por brindarnos su apoyo incondicional durante la formación como profesionales.

Jennifer Vaca.

Alex Díaz.

ÍNDICE

DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTO	VIII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE FIGURAS.	XIV
ÍNDICE TABLAS.	XIV
ÍNDICE ECUACIONES.	XVII
RESUMEN	XX
ABSTRACT	XXI
INTRODUCCIÓN	XXII
CAPÍTULO I.	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	1
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Planteamiento del problema.	2
1.3 Formulación del problema.	2
1.4 Delimitación.	2
1.4.1 Temporal.	2
1.4.2 Espacial.	3
1.5 Objetivos.	3
1.5.1 Objetivo general.	3
1.5.2 Objetivos específicos.	3
1.6 Justificación.	3
CAPÍTULO II	5
2. MARCO TEÓRICO.	5
2.1 Fundamentación tecnológica del problema.	5
2.2 Investigación del proceso de elaboración del biodiésel.	5
2.3 Materia prima.	6
2.3.1 Higuera.	6
2.3.2 Hidróxido de Sodio (NaOH).	7
2.3.3 Metanol.	8
2.4 Tipos de reactores.	9

2.4.1 Reactor de tanque con agitación continua (RTAC).	10
2.4.2 Reactor discontinuo o tipo Batch.	10
2.4.2.1 Mezcla.	11
2.4.2.2 Agitación.	11
2.5 Tipos de agitación.	11
2.5.1 Homogeneización de un fluido.	11
2.5.2 Suspensión de un sólido en un líquido.	12
2.5.3 Intercambio térmico entre un fluido y superficie de enfriamiento.	12
2.6 Impulsadores (agitadores).	13
2.6.1 Agitadores flujo axial.	13
2.6.2 Agitadores de flujo radial.	14
2.6.3 Impulsores de pala.	14
2.6.3.1 Pala tipo Ancla.	14
2.6.3.2 Pala tipo Hélice.	15
2.6.3.3 Pala tipo hojas inclinadas.	16
2.6.3.4 Turbina plana de disco.	17
2.6.3.5 Ventajas y desventajas de los tipos de impulsores.	18
2.7 Tipos de flujos generados en los tanques de agitación.	19
2.8 Números adimensionales.	19
2.8.1 Número de Reynolds (Re).	19
2.8.1.1 Flujo Laminar.	20
2.8.1.2 Flujo turbulento.	21
2.8.2 Número de potencia (Np).	21
CAPÍTULO III.	22
3. PROPUESTA.	22
3.1 Selección del reactor.	22
3.2 Cálculo de volúmenes para cada tanque.	23
3.2.1 Proporciones de hidróxido de sodio y metanol para el tanque de metóxido	23
3.2.1.1 Densidad del Hidróxido de Sodio	23

3.2.2 Cálculo del volumen del tanque de metóxido.	24
3.2.3 Cálculo del volumen del reactor.	24
3.2.4 Cálculo del volumen del tanque de separación glicérica, lavado y secado.	24
3.3 Cálculo para la obtención del diámetro y alturas para cada tanque.	25
3.3.1 Cálculo del diámetro y altura en el tanque de metóxido.	26
3.3.2 Cálculo del diámetro y altura del reactor.	27
3.3.3 Cálculo de la altura y diámetro en el tanque de separación glicérica lavado y secado.	28
3.4 Cálculo de la velocidad tangencial para la selección de la paleta.	28
3.4.1 velocidad tangencial tanque metóxido.	28
3.4.2 velocidad tangencial reactor.	29
3.4.3 velocidad tangencial tanque de separación glicérica, lavado y secado	29
3.5 Selección del impulsor.	29
3.6 Cálculos para la obtención de la potencia de las resistencias para el reactor y tanque de separación glicérica, lavado y secado.	30
3.6.1 Cálculo de la potencia de la resistencia para el reactor.	30
3.6.2 Cálculo de la potencia de la resistencia para el tanque de separación glicérica, lavado y secado.	31
3.6.2.1 Biodiésel.	31
3.6.2.2 Agua.	32
3.7 Cálculo de la potencia de los motores.	33
3.7.1 Cálculo de Reynolds para el tanque de metóxido.	34
3.7.1.1 Potencia de la paleta.	35
3.7.2 Cálculo de Reynolds para el reactor.	36
3.7.2.1 Potencia de la paleta.	37
3.7.3 Cálculo de Reynolds para el tanque de separación glicérica, lavado y secado	38
3.7.3.1 Potencia de la paleta.	39
3.8 Simulación.	40

3.8.1 Simulación del tanque de metóxido.	41
3.8.2 Simulación del reactor.	41
3.8.3 Simulación del tanque de separación glicérica, lavado y secado.	41
3.9 Construcción.	42
3.9.1 Construcción de la estructura metálica.	43
3.9.2 Construcción de tanques agitados.	44
3.9.3 Corte de la lámina de acero inoxidable.	47
3.9.4 Rolado de los tanques.	47
3.9.5 Soldadura.	47
3.9.6 Construcción de bridas.	49
3.9.7 Construcción de impulsores.	49
3.9.8 Construcción de las resistencias.	49
3.10 Capacidad y características del tanque de metóxido, reacto y tanque separador glicérico, lavado y secado.	50
3.11 Tablero de control.	50
3.11.1 Descripción del tablero de control.	50
3.12 Proceso de producción de biodiésel.	52
3.12.1 El proceso de producción de biodiésel da inicio en el tanque de metóxido, como se describe a continuación:	52
3.12.2 Etapa de separación glicérica:	56
3.12.3 Etapa del lavado y secado del biodiésel.	57
CAPÍTULO IV.	60
4. RESULTADOS.	60
4.1 Simulación y construcción de la máquina.	60
4.1.2 Simulación del fluido y comparación de la agitación real en el tanque de metóxido.	61
4.1.3 Simulación del fluido y comparación de la agitación real en el reactor.	63
4.1.4 Simulación del fluido y comparación de la agitación real en el tanque de separación glicérica de lavado y secado.	64
4.2 Volumen obtenido de biodiésel.	66

CAPÍTULO V.	68
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
5.1 Conclusiones.	68
5.2 Recomendaciones.	69
Bibliografía.	70

ÍNDICE FIGURAS.

FIGURA NUM.	DESCRIPCIÓN	PAG.
2.1.	Planta de higuera	7
2.2.	Sosa cáustica (NaOH)	8
2.3.	Metanol	9
2.4.	Reactor con agitación continua.	10
2.5.	Reactor discontinuo o batch	11
2.6.	Homogeneización de dos fluidos.	12
2.7.	La agitación permite mantener los sólidos en suspensión	12
2.8.	Temperaturas homogéneas en todo el estanque.	13
2.9.	Tipos de flujos	19
2.10.	Número de potencia en función del número de reynolds para distintos rodets.	20
2.11.	Flujo laminar.	21
2.12.	Flujo turbulento.	21
3.1.	Proporciones geométricas.	25
3.2.	Tanque de metóxido	26
3.3.	Reactor.	27
3.4.	Tanque separación glicérica.	28
3.5.	Número de reynolds y potencia.	34
3.6.	Inercia paleta tanque de metóxido.	35
3.7.	Número de reynolds y potencia.	36
3.8.	Inercia paleta reactor.	37
3.9.	Número de reynolds y potencia.	38
3.10.	Inercia del tanque de separación glicérica.	39
3.11.	Simulación tanque metóxido.	41
3.12.	Simulación del reactor.	41
3.13.	Simulación tanque de separación glicérica.	42
3.14.	Diseño de máquina.	42
3.15.	Estructura metálica.	43
3.16.	Resistencia química de los metales.	44
3.17.	Selección de materiales.	46
3.18.	Corte de lámina de acero inoxidable.	47
3.19.	Tanques.	47
3.20.	Características del electrodo utp.	48
3.21.	Tanque soldado	48

3.22. Construcción de las bridas.	49
3.23. Construcción de los impulsores.	49
3.24. Construcción resistencias.	50
3.25. Tablero de control.	51
3.26. Hidróxido de sodio.	52
3.27. Ubicación temporizador tanque metóxido.	53
3.28. Metanol e hidróxido de sodio.	53
3.29. Ubicación temporizador reactor.	54
3.30. Ubicación llave de paso.	55
3.31. Temporizador segundo tanque calentamiento.	55
3.32. Transesterificación.	56
3.33. Ubicación llave de paso, tanque cónico.	56
3.34. Separación glicérica.	57
3.35. Glicerina.	57
3.36. Ubicación temporizador tercer tanque.	58
3.37. Indicador de selección de frecuencia.	58
3.38. Mezcla de agua y biodiésel.	59
3.39. Ubicación resistencia eléctrica.	59
4.1. Diseño	60
4.2. Construcción de la máquina.	61
4.3. Simulación del fluido.	62
4.4. Mezcla tanque de metóxido.	62
4.5. Simulación reactor.	63
4.6. Transesterificación reactor.	64
4.7. Tanque doble impulsor.	64
4.8. Simulación tanque cónico.	65
4.9. Lavado del biodiésel.	66
4.10. volumen de biodiésel.	67
4.11.volumen glicerina.	67
1. Resultados aceite de higuera	73
2. Resultados metanol	74
3. Propiedades biodiésel	75
4. Resistencia de los metales	76
5. Tabla de productos químicos	77
6. Denominaciones paletas	78
7. Tabla de viscosidad dinámica	79
8. Número de caudal y potencia	80

9. Plano conjunto diseño máquina	81
10.Plano conjunto elementos tanque metóxido	82
11. Diseño brida	83
12. Diseño paleta	84
13. Diseño eje	85
14. Diseño tanque metóxido	86
15. Plano conjunto elementos reactor	87
16. Diseño brida	88
17. Diseño paleta	89
18. Diseño eje	90
19.Diseño tanque reactor	91
20. Plano conjunto elementos tanque cónico	92
21. Diseño brida	93
22. Diseño paleta	94
23. Diseño eje	95
24. Diseño tanque cónico	96

ÍNDICE TABLAS.

TABLA NUM.	DESCRIPCIÓN	PAG.
2.1.	Especificaciones pala tipo ancla.	15
2.2.	Especificaciones impulsor de hélice.	16
2.3.	Pala tipo hojas inclinadas.	17
2.4.	Turbina plana de disco.	18
2.5.	Ventajas y desventajas de los impulsores.	18
3.1.	Selección del reactor.	22
3.2.	Selección del impulsor.	29
3.3.	Parámetros de los materiales a mezclar.	40
3.4.	Capacidad y características de los tanques.	50
4.1.	Elementos que intervienen en la mezcla.	61
4.2.	Elementos que intervienen en la transesterificación.	63
4.3.	Elementos que intervienen en el lavado del biodiésel.	65
4.4.	Materia prima.	66

ÍNDICE ECUACIONES.

ECUACIÓN NUM.	DESCRIPCIÓN	PAG.
[2.1]	Número de reynolds	19
[2.2]	Número de potencia	21
[3.1]	Densidad	23
[3.2]	Calculo altura y diámetro	25
[3.3]	Calculo paleta	25
[3.4]	Altura de paleta	25
[3.5]	Diámetro tanque y diametro paleta	25
[3.6]	Velocidad tangencial	28
[3.7]	Calculo del calor	30
[3.8]	Calculo potencia resistencia	31
[3.9]	Calculo torque	35

ÍNDICE ANEXOS

ANEXO NUM.	DESCRIPCIÓN	PÁG.
1.	Resultados aceite de higuera	73
2.	Resultados metanol	74
3.	Propiedades biodiésel	75
4.	Resistencia de los metales	76
5.	Tabla de productos químicos	77
6.	Denominaciones paletas	78
7.	Tabla de viscosidad dinámica	79
8.	Número de caudal y potencia	80
9.	Plano conjunto diseño máquina	81
10.	Plano conjunto elementos tanque metóxido	82
11.	Diseño brida	83
12.	Diseño paleta	84
13.	Diseño eje	85
14.	Diseño tanque metóxido	86
15.	Plano conjunto elementos reactor	87
16.	Diseño brida	88
17.	Diseño paleta	89
18.	Diseño eje	90
19.	Diseño tanque reactor	91
20.	Plano conjunto elementos tanque cónico	92
21.	Diseño brida	93
22.	Diseño paleta	94
23.	Diseño eje	95
24.	Diseño tanque cónico	96

RESUMEN

La presente investigación propone el diseño y construcción de un reactor para la producción de 25 litros de biodiésel a base de aceite de higuera, este reactor está equipado con tres tanques agitados de diferente volumen con la finalidad de llevar a cabo las tres etapas: Metóxido, transesterificación y separación de glicerina por separado. Este trabajo tiene como objetivo dimensionar los diferentes elementos y seleccionar los accesorios de los que está compuesta la máquina. Mediante los parámetros de diseño y cálculos matemáticos se determinó una capacidad volumétrica de 5 litros y una potencia del motor de 25 W para la agitación en el tanque de metóxido, para el reactor una capacidad de 31 litros con un motor de 60 W y para el tanque separación de glicerina una capacidad de 46 litros y equipado con un motor de 373 W cabe recalcar que se utilizó el acero AISI 304 para la construcción de los tres tanques que están equipados con un sistema de agitación mecánica constituido por un impulsor de 3 palas inclinadas debido a que generan en la mezcla flujos axiales y radiales. Finalmente, con el reactor tipo Batch se obtuvo un volumen de producción de 13 litros de biodiésel y una cantidad de 0.9 litros de glicerina obtenido mediante el proceso químico de transesterificación como sub producto de grasas vegetales, es decir, se aprovecha un 72% de la materia prima que interviene en el proceso de obtención de biodiésel a base de aceite de higuera.

ABSTRACT

The present investigation proposes the design and construction of a reactor for the production of 25 liters of biodiesel made from castor oil, the reactor is equipped with three agitated tanks of different volume in order to carry out the three staged: methoxide, transesterification and separation of glycerin separately. This work has the objective of sizing the different elements and selecting the accesses of which the machine is composed by means of the design parameters and mathematical calculations, a volumetric capacity of 5 liters and a power of the motor of 25 watts was determined for the agitation in the tank of methoxide, for the reactor a capacity of 31 liters with motor of 60 watts and for the tank separation of glycerin a capacity of 46 liters and equipped with a motor of 373 watts, it should be emphasized that the AISI 304 steel was used for the are equipped with a mechanical agitation system consisting of an impeller with 3 inclined blades due to the fact that they generate axial and radial flows in the mixture. Finally, with the batch reactor a production volume of 13 liters of biodiesel was obtained and an amount of 0.9 liters of glycerin obtained through the chemical process of transesterification as a by product of vegetable fats, is 72% of the raw material used in the process of obtaining biodiesel based on castor oil in used.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación es el inicio para la ejecución y utilización de combustibles alternativos mediante el diseño y construcción de una máquina que facilite la obtención de biodiésel. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) establece que en el Ecuador hay un total de 1.717.885 vehículos de los cuales el 10.90% utilizan diésel como fuente de energía dejando como consecuencia un alto nivel de contaminación. La biomasa es la materia prima que se está adoptando como alternativa de combustible para vehículos diésel debido a su biodegradabilidad lo cual conlleva a reducir el impacto ambiental que generan los derivados del petróleo.

En la fundamentación teórica se hace referencia a la materia prima que interviene en la producción del biodiésel, así como sus características y propiedades, además se detalla los tipos de reactores más utilizados para dicho proceso y los diferentes tipos de agitación que se pueden generar en el tanque de metóxido, reactor y tanque de separación de glicerina, para determinada acción se realiza una selección del tipo de impulsor más adecuado basado en las propiedades de los fluidos a mezclarse.

Una vez establecido el tipo de reactor a utilizar por medio de una tabla de selección, se procede a la ejecución de los cálculos matemáticos mediante los cuales se puede determinar: volumen, altura y diámetro de los tanques agitados, así como la selección de motores y resistencias calefactables implementadas en el reactor y tanque de separación de glicerina, posteriormente con el estudio del comportamiento tanto de la mezcla como de la agitación del fluido en el interior de los tanques de agitación, finalmente se realiza la construcción de la máquina previo al diseño establecido. Dicha máquina está equipada con un tablero de control el cual ayuda a la monitorización de variables como: Temperatura, velocidad y tiempo de agitación que intervienen en cada uno de los tanques.

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento, se obtiene como resultado que la simulación de los fluidos en el interior de los diferentes tanques que componen la máquina se considera semejantes a la agitación obtenida en la

realidad, además de verificar que, durante el proceso de agitación, el fluido no se derrama por la parte superior del tanque cuando éste trabaja a su máxima capacidad además de comprobar que no existen fugas en las uniones soldadas de dichos tanques.

Como parte final se redactan las conclusiones y recomendaciones de todo el trabajo de agitación y mezcla de fluidos. En los anexos se muestra información técnica relacionada a las características de la materia prima, así como información relevante del cálculo y selección de los elementos que forman la máquina y sus respectivos planos tanto del conjunto como de partes.

CAPÍTULO I.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

1.1 Antecedentes.

La población mundial cada vez toma mayor conciencia sobre la necesidad de reemplazar los combustibles fósiles (Palomino & etal, 2013). La utilización generalizada de los derivados del petróleo en el parque automotor a nivel mundial ha generado altos índices de contaminación con el pasar de los años, y esto se vuelve cada vez más crítico, especialmente si no se genera combustibles alternativos, tomando en cuenta que el petróleo es una fuente principal que permanentemente se agota debido a su excesiva utilización.

La investigación mundial sobre combustibles alternativos se basa especialmente en derivados de la biomasa, que es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal susceptible de ser aprovechada energéticamente la cual se está proyectando de manera principal.

La producción de biodiésel se inició en los años 90 y alcanzó 7.5 millones de toneladas en el año 2006 (Hackenberg, 2011) desde este tiempo se ha venido desarrollando nuevas alternativas para reducir el uso paulatino de combustibles fósiles con la visión de disminuir las emisiones contaminantes.

La higuera actualmente en nuestro país es considerada como maleza ya que esta semilla se desarrolla en campos que no afectan la producción de cultivos, con lo cual su costo de adquisición es relativamente bajo y de fácil obtención, sin necesidad de invertir recursos económicos en dicha materia prima, cabe recalcar que la extracción del aceite de dicha planta en su procesamiento si tendrá un costo ya que será sometido a procesos mecánicos y químicos para obtener su derivado.

Actualmente los biocombustibles constituyen una opción altamente competitiva contra el petróleo y sus derivados en el área del transporte, por la variedad de alternativas con las cuales se puede producir biodiésel usando las distintas tecnologías para conseguir biocombustible las cuales son bien desarrolladas y disponibles en muchos países.

Colombia: Realizó un estudio en el año 2011 sobre la transesterificación convencional e *in situ* de la semilla de higuierilla para la producción de biodiésel obteniendo como resultado la producción de biodiésel a partir de la semilla de higuierilla, es factible por medios convencionales y en los procesos *in situ*. Sin embargo, las conversiones obtenidas por el método convencional son considerablemente más altas que por el proceso *in situ* (Sánchez & Huertas, 2012)

Ecuador: Realizó su estudio en el año 2011 sobre la obtención de biodiésel a partir del aceite de semillas oleaginosas de la provincia de Chimborazo, las semillas que mejor se proporcionaron fueron las de colza y la de higuierilla al determinar las características físico químicas de los biodiésel elaborados (B100) con lo cual se demostró que los valores obtenidos en la investigación se encuentran dentro de los límites establecidos en la norma ASTM D 6751 (Sánchez & Huertas, 2012)

Irán: Realizó su estudio en el año 2010 sobre un estudio cinético y la optimización de parámetros en la reacción de transesterificación del aceite de ricino obteniendo como resultado el mejor rendimiento, en la reacción se obtuvo con metilato de potasio como catalizador su principal problema fue el número de cetano de biodiésel producido, no está dentro del rango de la norma ASTM correspondiente (Sánchez & Huertas, 2012).

1.2 Planteamiento del problema.

Debido al uso indiscriminado de combustible en motores diésel a lo largo de su evolución deja como consecuencia un alto porcentaje de contaminación debido a las emisiones de: dióxido de nitrógeno (NO₂), hidrocarburos, monóxido de carbono en el medio ambiente afectando directamente a la salud de las personas.

1.3 Formulación del problema.

¿Cómo diseñar y construir un reactor para producir biodiésel a base de aceite de higuierilla?

1.4 Delimitación.

1.4.1 Temporal.

Este proyecto se llevará a cabo desde el mes de febrero a noviembre 2017.

1.4.2 Espacial.

Este proyecto será implementado en los talleres de la Universidad Técnica del Norte de la ciudad de Ibarra.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

Diseñar y construir un reactor piloto para la producción de biodiésel a base de aceite de higuera.

1.5.2 Objetivos específicos.

1. Investigar sobre el proceso de fabricación de biodiésel.
2. Seleccionar el reactor óptimo para la producción de biodiésel.
3. Construir el reactor con una capacidad de 25 litros.
4. Producir biodiésel a base de higuera.

1.6 Justificación.

Con la construcción de un reactor piloto se espera una producción de biodiésel la cual ayude a reducir gradualmente el uso de combustibles fósiles en vehículos a diésel, fomentando la movilidad sustentable y reduciendo las emisiones contaminantes, para no depender al cien por ciento de los derivados del petróleo reformando así la matriz energética de nuestro país.

Los combustibles diésel tienen la función esencial en la economía industrial de un país en desarrollo, provocando problemas de contaminación debido al uso generalizado de combustibles fósiles, por lo tanto, una energía alternativa debe ser un combustible amigable con el medio ambiente (Mourad & etal, 2014).

La contaminación del aire representa un importante riesgo medio ambiental para la salud. En 2014, el 92% de la población vivía en lugares donde no se respetaba la calidad del aire, según la organización mundial de la salud para el 2012 la contaminación atmosférica en zonas rurales de todo el mundo provoca cada año tres millones de defunciones prematuras, mediante la disminución de los niveles de contaminación del aire los países pueden reducir la mortalidad a causa de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y asma. Con la utilización de combustibles derivados de la biomasa

se podrá mejorar significativamente la calidad de aire (Organización mundial de la Salud, 2006).

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Fundamentación tecnológica del problema.

El diésel tiene un rol importante en la economía industrial de cualquier país, la alta demanda de energía en el mundo industrializado y el uso generalizado de combustibles fósiles están llevando a un rápido agotamiento de los recursos fósiles, y paralelamente a la degradación ambiental. El deterioro de la calidad del aire debido a las emisiones, es el principal efecto adverso a los combustibles a base de petróleo, dichos factores requieren la búsqueda continua y el desarrollo sostenible de las fuentes de energía renovable, con la finalidad de ser respetuosos con el medio ambiente (Ahmad & etal, 2013)

El consumo de diésel en el Ecuador sobrepasa su producción anual, por lo tanto, se requiere de su importación en un 52.8% del mercado interno (Senplades, 2013) por dicho consumo de combustible se obtiene un alto índice de contaminación y la dependencia de los subproductos del petróleo, con mencionado reactor se apunta a la reducción y uso de combustibles fósiles tomando en cuenta que el sector de la transportación es la de mayor consumo energético debido al crecimiento del parque automotor comercial.

La biomasa es la materia prima que más se está proyectando como fuente alternativa de energía renovable (Palomino & etal, 2013) de la cual se consigue biodiésel, se obtiene por la transesterificación de aceites vegetales que reaccionan fácilmente con el alcohol y con la ayuda de un catalizador (hidróxido de sodio).

Para la elaboración de biodiésel, los materiales de construcción para el reactor deben ser de acero inoxidable para evitar la corrosión que provoca la mezcla para la obtención del producto final (Toledo, 2001).

2.2 Investigación del proceso de elaboración del biodiésel.

El proceso se da inicio en el tanque de metóxido, en el cual se agrega metanol e hidróxido de sodio como catalizador, se enciende el motor del agitador y se controla la velocidad a 200 rpm, el proceso de mezclado finaliza cuando el

hidróxido de sodio esté completamente solubilizado, este proceso tiene un tiempo de reacción de 10 minutos de iniciada la mezcla (Lombeida, 2015).

Antes de realizar la reacción de transesterificación el aceite de ricino se debe precalentar hasta los 30°C, durante el precalentamiento se enciende el motor de agitador y se fija una velocidad de 100 rpm, con la finalidad que la temperatura del aceite se homogenice (Lombeida, 2015).

El tanque del metóxido se encuentra a un nivel superior que el reactor con el fin de transportar el metóxido al reactor por gravedad, el tanque de metóxido al igual que el reactor están fijados sobre una estructura metálica. Se abre la válvula de paso del tanque de metóxido hacia el reactor, dicha mezcla se adiciona gradualmente al aceite de ricino, la mezcla se calienta hasta una temperatura de 50°C y se eleva la velocidad del agitador hasta 200 rpm, el proceso se mantiene constante en dichas condiciones durante 2 horas. Luego de terminada esta reacción los productos son enviados al tanque agitado de sedimentación, lavado y secado. El producto en este tanque se deja reposar por 24 horas para luego retirar la glicerina del biodiésel como subproducto (Lombeida, 2015).

Una vez retirada la glicerina se procede a lavar el biodiésel con una cantidad de agua igual al 50% del producto presente en el tanque, esta operación se realiza 5 veces a una velocidad de agitación de 100 rpm durante 5 minutos con el objetivo de eliminar residuos de alcohol y glicerina presentes en el biodiésel. Como proceso siguiente para eliminar residuos de agua presentes en el biodiésel se realiza el proceso de secado a 100°C durante 1 hora, en el mismo tanque y se utiliza como medio calefactor una resistencia eléctrica (Lombeida, 2015).

2.3 Materia prima.

2.3.1 Higuerilla.

La higuerilla es un árbol que se desarrolla y crece en tierras marginales bajo condiciones de humedad y semiáridas, hoy en día el aceite de higuerilla es utilizado en más de 700 aplicaciones (Vega, 2010). Dentro de sus características se puede resaltar que llega a crecer a una altura promedio de hasta 17m esta planta es fácil de conocer debido a sus frutos de forma circular.

Las propiedades de esta planta no son conocidas en muchos países, pero se puede decir que se emplea en diferentes áreas como; medicina, transporte, cosmética. En el mundo botánico es conocido como *Ricinus Cummnis*, pero en Ecuador se conoce como: Palma Cristi, castor, higuera infernal, tártago, higuiereta y ricino (Proaño, 2010).

El aceite de higuierilla se obtiene de las semillas de la higuierilla y está clasificado como un aceite vegetal. Es un líquido incoloro o con una ligera tonalidad amarilla muy pálida, inodoro o de olor y sabor suave. Tiene un punto de ebullición de 313°C y una densidad 961 Kg por metro cúbico (Aceites10, 2016).

Las aplicaciones del aceite de higuierilla junto con sus derivados sirven para hacer jabones, tinta y tintes, lubricantes, plásticos con resistencias al frío, ceras, nilón. A su vez el aceite de ricino fue utilizado en los primeros tiempos de la aviación como un lubricante en motores rotativos (Aceites10, 2016).

Este aceite de higuierilla es el mejor para producir biodiésel por ser el único soluble en alcohol (Vega, 2010).



Figura 2.1. Planta de higuierilla
Fuente: (Panorama Agrario, 2015)

2.3.2 Hidróxido de Sodio (NaOH).

El hidróxido de sodio es conocido también como sosa caustica, que es una sustancia química compuesta por; sodio, hidrógeno y oxígeno (NaOH), dicha sustancia a temperatura ambiente es un sólido de color blanco, sin olor y tiene la característica especial de ser higroscópico, dicho compuesto es una sal que reacciona violentamente con el agua, las reacciones del hidróxido de sodio se

deben controlar en tanques agitados y ser de un material inoxidable ya que es altamente corrosivo y desprende una gran cantidad de calor pudiendo llegar el agua a hervir (Torres & Nelson, 2010).

Este producto se debe mantener en recipientes cerrados y sellados, además de tener precauciones especiales ya que el hidróxido de sodio ataca a algunas clases de plásticos, cauchos y revestimientos. El hidróxido de sodio tiene varias aplicaciones y se utiliza para fabricar jabones, crayón, papel, explosivos, pinturas y productos derivados del petróleo, también se usa para el procesamiento de textiles de algodón, lavandería y blanqueado, se utiliza comúnmente en desagües y hornos, además este producto se usa como destapador de cañerías (Ecured, 2017).



Figura 2.2. Sosa Cáustica (NaOH)
Fuente: (Químicos, 2016)

2.3.3 Metanol.

El metanol es un compuesto químico del grupo de los alcoholes también conocido bajo el nombre del alcohol metílico, su fórmula es CH_3OH . Su composición es de: C=37.48%; H=12.58%; O=49.93% (Textos científicos, 2005).

Cuando el metanol está a temperatura ambiente, en condiciones normales, se presenta en estado líquido e incoloro siendo este bastante tóxico dentro de sus características tiene poca viscosidad, su punto de ebullición es de 65°C , su densidad de 0.79 Kg/l , viscosidad $5.44 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ y tiene un olor repulsivo además se puede describir que se trata de un líquido volátil. Durante mucho

tiempo se obtuvo el metanol por destilación destructiva de madera a altas temperaturas (Beyer, 1987).

El metanol debe almacenarse en aceros al carbón cuando se trata de grandes cantidades, en el caso de cantidades pequeñas puede manejarse en recipientes de vidrio totalmente sellados, en todos los casos debe mantenerse alejado de fuente de ignición y protegido de la luz directa del sol. El metanol se puede aplicar como aditivo para los carburantes, disolventes, colorantes de anilinas y pegamento (Beyer, 1987).



Figura 2.3. Metanol
Fuente: (Químicos, 2016)

2.4 Tipos de reactores.

Los reactores químicos se clasifican típicamente según la dinámica del flujo, de acuerdo con este criterio los sistemas pueden ser continuos o discontinuos, según el proceso que realicen por cargas o por flujo ininterrumpido (Altair, 2016).

Existen en la industria dos modelos o tipos de reactores químicos los cuales son diseñados en base a una necesidad en particular, entre los más importantes y utilizados para la producción de biodiésel son los siguientes:

- ✓ Reactor de tanque con agitación continua (RTAC).
- ✓ Reactor discontinuo o tipo Batch.

2.4.1 Reactor de tanque con agitación continua (RTAC).

Este tipo de reactor consiste en un tanque con buena agitación en el que hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado parcialmente la agitación del contenido, es esencial la forma de estos recipientes, por ejemplo, cilindros cuyo diámetro es igual a la altura; si no fuera así se crearía una corriente directa de fluido entre la entrada y salida del recipiente. En un reactor de tanque con agitación continua no es difícil alcanzar con bastante aproximación una mezcla perfecta, siempre y cuando la fase fluida no sea demasiado viscosa (Denbigh & James, 1990).

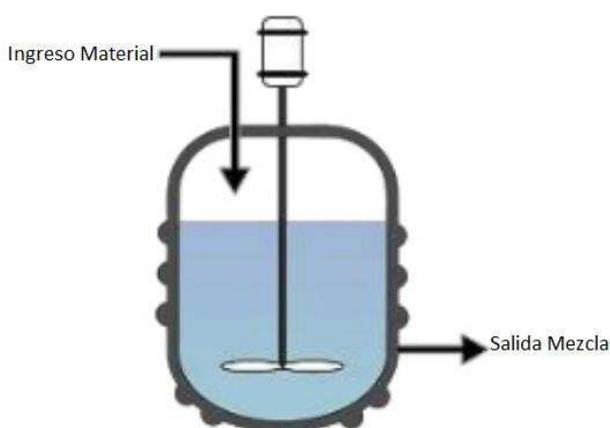


Figura 2.4. Reactor con agitación continua.
Fuente: (Omaira, 2015)

2.4.2 Reactor discontinuo o tipo Batch.

El reactor discontinuo o Batch, es un tipo de reactor que se caracteriza por tener un proceso en el cual no se puede añadir ni retirar material durante la reacción química, es decir, toda la materia prima se introduce al inicio del proceso, en este reactor se puede controlar las variantes de presión y temperatura y dejar reaccionar por el tiempo establecido del proceso posteriormente se descargan los productos de la reacción por medio de una llave de paso ubicada en la parte inferior del reactor

Este reactor suele usarse en pequeñas producciones o pruebas piloto, el volumen en este tipo de reactor siempre se mantiene constante (Medina, 2016).

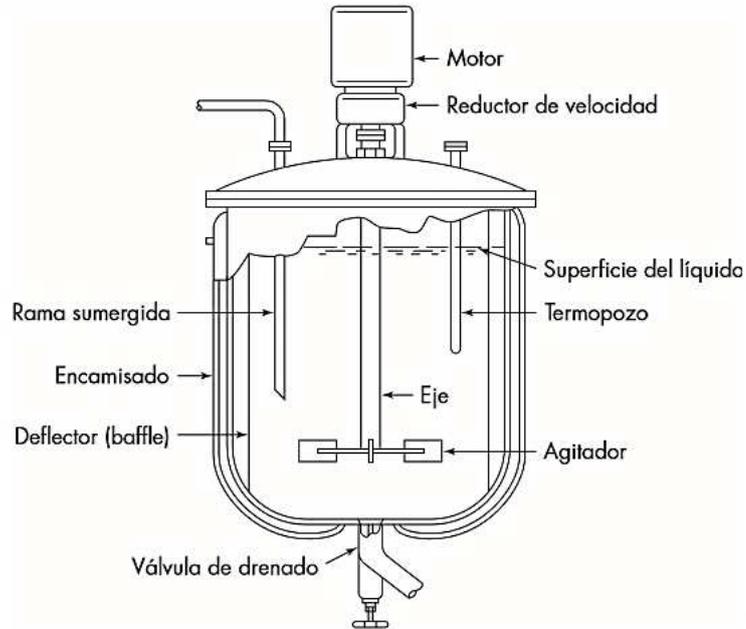


Figura 2.5. Reactor discontinuo o Batch
Fuente: (McCabe & etal, 2007)

2.4.2.1 Mezcla.

El mezclado es una operación importante en un reactor, debido a que esta se encarga de poner en contacto los reactivos y catalizadores de dicha reacción, ya sean estos en la misma fase (líquido-líquido), o en fases diferentes (líquido-sólido) (Coronel, 2014).

2.4.2.2 Agitación.

Este término hace referencia a mover un fluido por medios electromecánicos con la finalidad de adquirir un movimiento circular en el interior del recipiente. Se obtiene varios objetivos en la agitación y pueden ser mencionadas las siguientes:

2.5 Tipos de agitación.

2.5.1 Homogeneización de un fluido.

Se define como la mezcla de fluidos solubles como se observa en la figura 2.6, cuyos objetivos principales son lograr el equilibrio de gradiente de temperatura y de gradiente de concentración. Se utiliza entre otras cosas para la neutralización de ácidos/base, diluir soluciones de alta concentración, mezcla de fluidos con temperaturas distintas y distribución de polímeros en suspensión para floculación (Castillo, 2013).

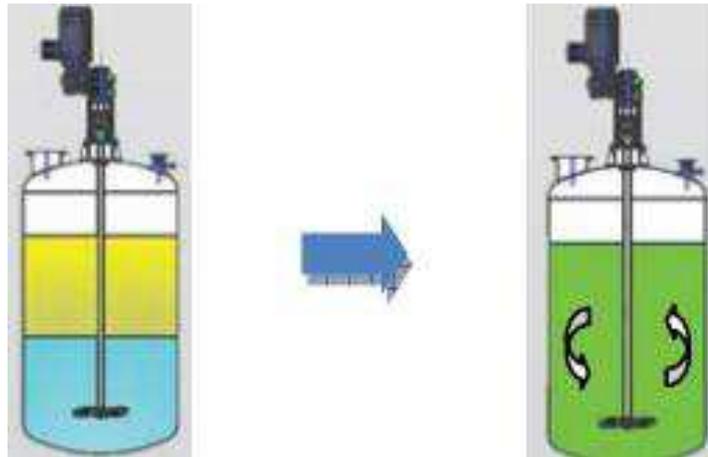


Figura 2.6. Homogeneización de dos fluidos.
Fuente: (Castillo, 2013)

2.5.2 Suspensión de un sólido en un líquido.

Consiste en la distribución de un sólido disperso en un fluido cuyo objetivo es mantener los sólidos en suspensión, conseguir una distribución homogénea y disolver sólidos. El agitador permite mantener en suspensión partículas sólidas en totalidad del líquido figura 2.7, la capacidad de suspensión de un agitador varía en función de la densidad y viscosidad del fluido, concentración y tamaño de las partículas del sólido. Se utiliza en procesos para obtener reacciones entre un líquido y un sólido con catalizador (Castillo, 2013).

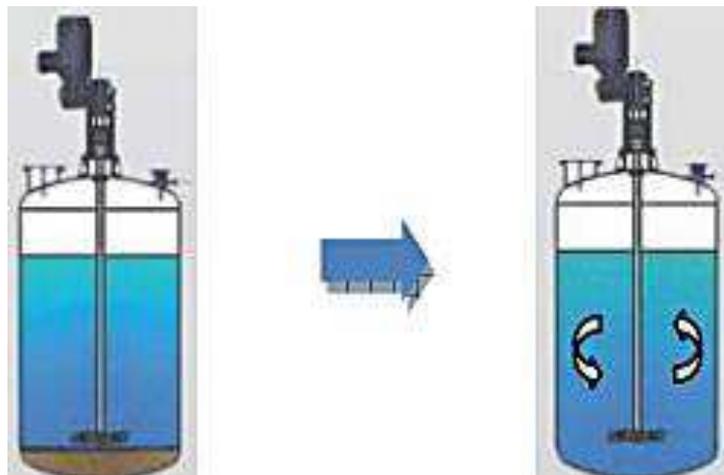


Figura 2.7. La agitación permite mantener los sólidos en suspensión
Fuente: (Castillo, 2013)

2.5.3 Intercambio térmico entre un fluido y superficie de enfriamiento.

Consiste en el intercambio de calor entre fluido y superficie de fluidos a distinta temperatura figura 2.8, permite eliminar el calor de reacción y es posible lograr

la disminución de la viscosidad de un fluido gracias a la temperatura. Su finalidad es permitir lograr que la temperatura sea homogénea en todo el producto (Castillo, 2013).

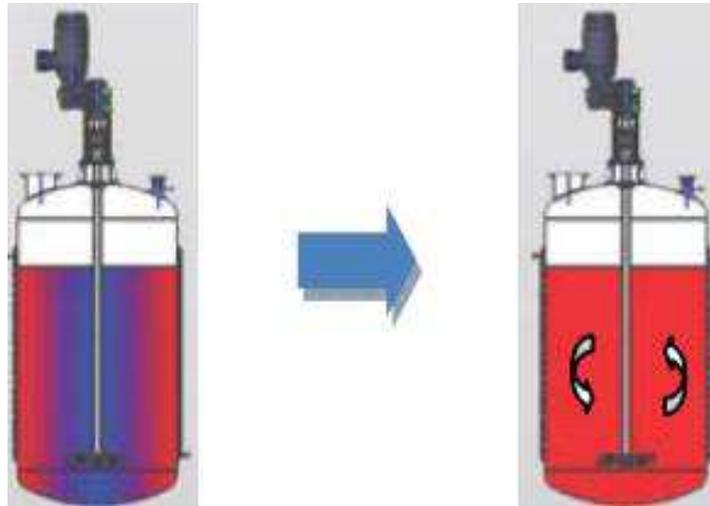


Figura 2.8. Temperaturas homogéneas en todo el estanque.
Fuente: (Castillo, 2013)

2.6 Impulsadores (agitadores).

Los agitadores de impulsor o rodete se dividen en dos clases. Los que generan corrientes paralelas al eje del impulsor se llaman *impulsadores de flujo axial* y aquellos que generan corrientes en dirección radial o tangencial se llaman *impulsadores de flujo radial* los tres principales tipos de impulsores para líquidos de baja a moderada viscosidad son las hélices, turbinas e impulsores de alta eficiencia. Para líquidos muy viscosos los impulsores más adecuados son los de hélice y agitadores de anclaje (Castillo, 2013).

2.6.1 Agitadores flujo axial.

Estos agitadores permiten un flujo que se desprende de las palas del impulsor aproximadamente a 45° de inclinación por lo que representa recirculación, luego retorna hasta la zona central de las palas, creando un campo de flujo de ida y vuelta paralelo al eje de giro. Este tipo de flujo tiene un número de Reynolds de 200 a 600 y se transforma en flujo radial cuando este número disminuye (Castillo, 2013).

2.6.2 Agitadores de flujo radial.

En representación de este flujo los agitadores más utilizados son los de palas planas, estos tipos de agitadores están constituidos por palas o aspas paralelas al eje del motor, generan un flujo radial para cualquier número de Reynolds y proporcionan alta velocidad tangencial, aunque baja capacidad de impulsión (Castillo, 2013).

2.6.3 Impulsores de pala.

Para los problemas más sencillos, un agitador muy eficaz consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical. A veces las palas están inclinadas pero lo más frecuente es que sean verticales, las palas giran a bajas y moderadas velocidades en el centro del tanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente, las corrientes que generan se desplazan hacia afuera hasta la pared del tanque y después hacia arriba o hacia abajo.

En tanques profundos se instalan varias palas unas sobre otras, en un mismo eje. Una pala de este tipo recibe el nombre de agitador de áncora. Dichos diseños de paleta resultan útiles para prevenir que se depositen sólidos sobre una superficie de transmisión de calor. Los agitadores industriales de palas giran a velocidades comprendidas entre el 20 rpm y 150 rpm, velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave en tanque sin placas deflectoras, las cuales son necesarias para velocidades muy elevadas, pues de lo contrario el líquido se desplaza en bloque alrededor del tanque con velocidad alta, pero con poca mezcla (Denbigh & James, 1990).

2.6.3.1 Pala tipo Ancla.

Este tipo de impulsor se ajusta a los contornos interiores de las paredes del estanque, girando por esta superficie con una pequeña holgura en relación al tanque. Previene la adhesión de materiales sólido, pegajosos sobre su superficie y origina una buena transferencia de calor con las paredes (Castillo, 2013). En la tabla 2.1 se especifica las características de empleo de este impulsor tipo ancla.

Tabla 2.1. Especificaciones pala tipo ancla.

<p>Pala tipo ancla</p>	
<p>Detalle</p>	<p>Forma adaptada al fondo y a las paredes del tanque.</p>
<p>Régimen obtenido</p>	<p>Laminar.</p>
<p>Velocidad tangencial</p>	<p>Hasta $2m/s$</p>
<p>Viscosidad de trabajo</p>	<p>Hasta $1000 Pa \cdot s$</p>
<p>Aplicaciones</p>	<p>Para agitación cerca de la pared, fondo del tanque y para transferencia térmica.</p>
<p>Flujo generado (tangencial)</p>	

Fuente: (Castillo, 2013)

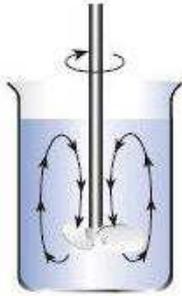
2.6.3.2 Pala tipo Hélice.

Una hélice es un rodete de flujo axial y alta velocidad, generalmente compuesta por tres hélices que se utiliza para líquidos de baja viscosidad, las hélices pequeñas giran a una velocidad entre 1150 rpm y 1750 rpm. Las grandes giran entre 400 rpm y 800 rpm. Las corrientes del fluido que salen del impulsor continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta chocar con el tanque o con las paredes del mismo. El campo de flujo generado es axial y alcanza un régimen turbulento generando remolinos del líquido

Son utilizados generalmente para homogenizar, suspender fluidos y favorecer el intercambio de calor, son eficaces en tanques muy grandes (Castillo, 2013).

En la tabla 2.2 se especifica las características de empleo de este impulsor tipo hélice.

Tabla 2.2. Especificaciones impulsor de hélice.

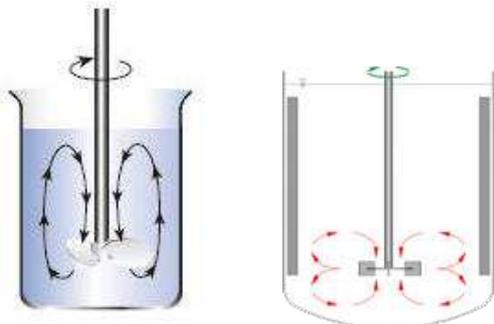
<p>Pala tipo de Hélice</p>	
<p>Detalle</p>	<p>Utiliza 3 alabes o paletas</p>
<p>Régimen obtenido</p>	<p>Turbulento</p>
<p>Velocidad tangencial</p>	<p>De 3 <i>m/s</i> a 15 <i>m/s</i></p>
<p>Viscosidad de trabajo</p>	<p>< 20 Pa · s</p>
<p>Aplicaciones</p>	<p>En tanques pequeños tiene baja agitación. Tanques grandes para baja viscosidad.</p>
<p>Flujo generado (axial)</p>	

Fuente: (Link Industrial, 2011)

2.6.3.3 Pala tipo hojas inclinadas.

Este tipo de impulsor combinan flujo axial y flujo radial, son frecuentemente los agitadores de 2 y 4 palas como característica general giran a bajas velocidades y se encuentran en el rango entre 20 rpm y 150 rpm, siendo estas ubicadas en el centro del tanque, a velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave pero buena mezcla, siendo estos los óptimos para la disolución de productos sólidos (Denbigh & James, 1990). En la tabla 2.3 se especifica las características de empleo de este impulsor de hojas inclinadas.

Tabla 2.3. Pala tipo hojas inclinadas.

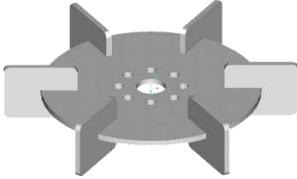
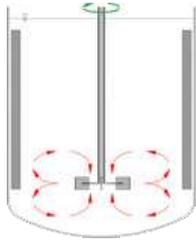
<p>Pala tipo hojas inclinadas</p>	
<p>Detalle</p>	<p>3 palas inclinadas ubicadas en dirección al movimiento del flujo.</p>
<p>Régimen obtenido</p>	<p>Laminar - Turbulento</p>
<p>Velocidad tangencial</p>	<p>De 2 <i>m/s</i> a 6 <i>m/s</i></p>
<p>Viscosidad de trabajo</p>	<p>Hasta 100 Pa · s</p>
<p>Aplicaciones</p>	<p>En tanques pequeños a bajas velocidades generan agitación suave.</p>
<p>Flujo generado (axial, radial)</p>	

Fuente: (Castillo, 2013)

2.6.3.4 Turbina plana de disco.

La mayoría de ellos giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el tanque las placas pueden ser rectas, curvas o inclinadas, las turbinas son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque. Las corrientes principales son radiales y tangenciales (Castillo, 2013). En la tabla 2.4 se especifica las características de empleo de este impulsor plana de disco.

Tabla 2.4. Turbina plana de disco.

Turbina plana de disco	
Detalle	6 palas rectas.
Régimen obtenido	Turbulento
Velocidad tangencial	De 4 m/s a 10 m/s
Viscosidad de trabajo	$< 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Aplicaciones	Indicada para dispersión de gases y transferencia térmica.
Flujo generado (radial)	

Fuente: (Link Industrial, 2011)

2.6.3.5 Ventajas y desventajas de los tipos de impulsores.

Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de los impulsores.

Tipo de impulsor.	Ventaja.	Desventaja.
Paleta	Buen flujo radial y axial. Coste económico.	Riesgo de formación de vórtices a velocidades elevadas.
Hélice	Buen flujo radial, axial y tangencial.	Costo de fabricación elevado.
Turbina	Buena mezcladora.	Costo elevado de fabricación. Riesgo de atascos.

2.7 Tipos de flujos generados en los tanques de agitación.

Los tipos de flujos que se generan en un tanque de agitación, son de tres tipos, los cuales son: Radial, axial y tangencial, estos tipos de flujos van a depender de condiciones específicas entre las cuales se puede mencionar el impulsor, características del fluido, proporciones del tanque, tipo de agitador y si tiene instalado o no placas deflectoras utilizadas en tanque de gran tamaño para reducir los remolinos. La velocidad del fluido en un punto del tanque va a tener tres componentes (Denbigh & James, 1990).

- A. El primer componente de velocidad es radial y actúa perpendicular al eje del rodete.
- B. El segundo es axial y actúa en dirección paralela del impulsor.
- C. El tercero es tangencial y actual en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el rodete.

Los componentes radial y axial son útiles por cuanto dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla (Denbigh & James, 1990).

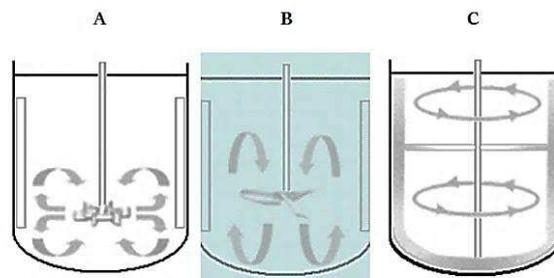


Figura 2.9. Tipos de flujos A) Flujo radial, B) Flujo axial, C) Flujo tangencial
Fuente: (Castillo, 2013)

2.8 Números adimensionales.

2.8.1 Número de Reynolds (Re).

Reynolds es un término adimensional, el cual permitirá determinar la presencia o no de turbulencia en un fluido en movimiento. Este número adimensional relaciona las variables de la velocidad de rotación del motor, la viscosidad y densidad a la cual está sometido un fluido, según (Mott, 2006).

Su ecuación:

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu} \quad [2. 1]$$

Donde:

N : velocidad de rotación (rpm)

d : diámetro del agitador (m).

ρ : densidad del fluido (Kg/m^3).

μ : viscosidad ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

Reynolds tiene como finalidad determinar si el fluido es turbulento o laminar, como se observa en la figura 2.10. Además, se debe tomar en cuenta que el cambio de régimen laminar a turbulento no es inmediato ya que este tiene una etapa de transición y tiene los siguientes valores (Castillo, 2013).

Régimen laminar: $Re < 10$

Régimen transitorio: $300 < Re < 10000$

Régimen turbulento: $Re > 10000$

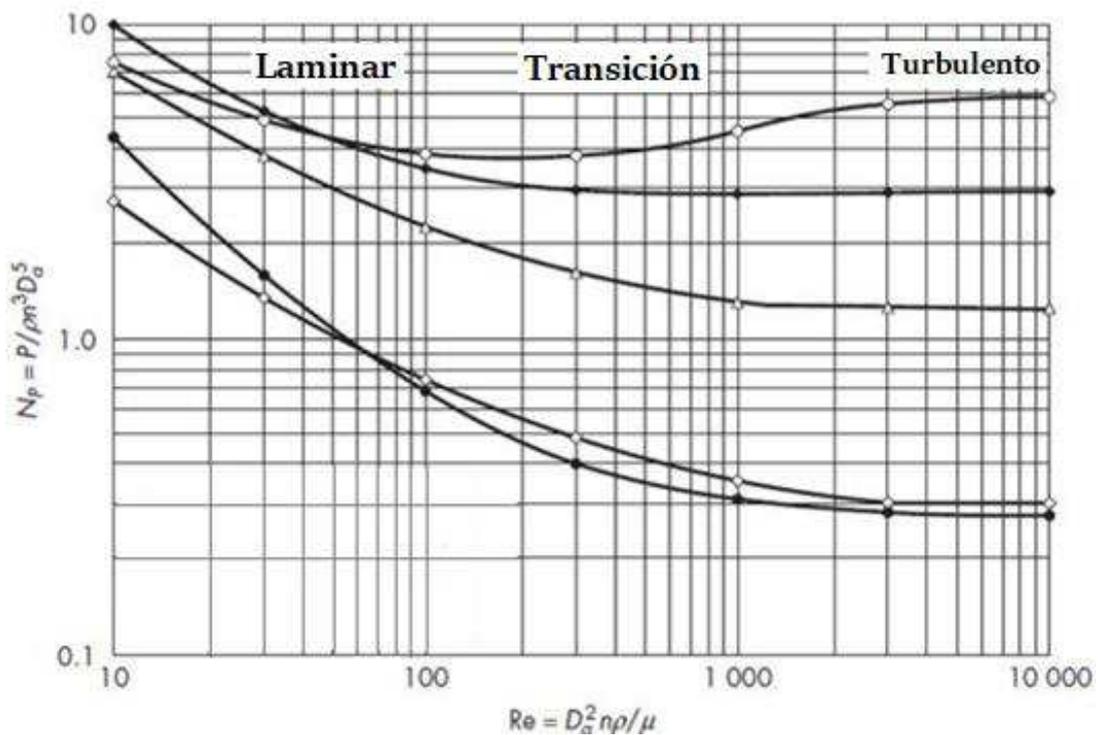


Figura 2.10. Número de potencia en función del número de Reynolds para distintos rodets.

Fuente: (Muñoz, 2014)

2.8.1.1 Flujo Laminar.

Los fluidos a velocidades bajas tienden a moverse sin mezcla lateral y las capas adyacentes se desplazan una sobre otras, como las cartas de una

baraja. Al no existir corrientes transversales ni remolinos este tipo de régimen se llama flujo laminar (McCabe & etal, 2007).

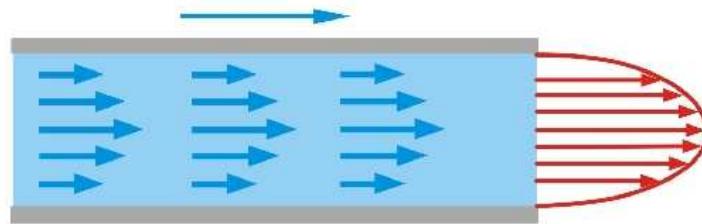


Figura 2.11. Flujo laminar.
Fuente: (Gunt , 2017)

2.8.1.2 Flujo turbulento.

Los fluidos a velocidades superiores se desplazan de manera al azar dando lugar a corrientes transversales y remolinos, este tipo de régimen se llama flujo turbulento (McCabe & etal, 2007).

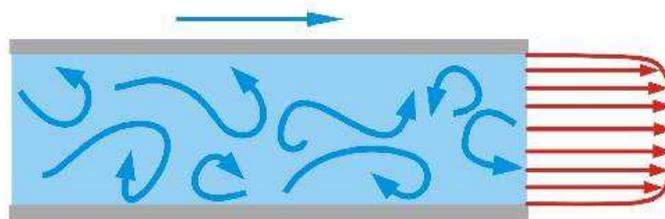


Figura 2.12. Flujo turbulento.
Fuente: (Gunt , 2017)

2.8.2 Número de potencia (Np).

El número de potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia. Cuando el tanque tiene placas deflectoras, el número de potencia tiene una buena similitud con el número de Reynolds. Cuando existe régimen turbulento, el número de potencia tiene valor constante (Castillo, 2013).

Su ecuación según (Denbigh & James, 1990):

$$N_p = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} \quad [2. 2]$$

Donde:

P: potencia de agitación del impulsor (Watts).

n: velocidad de rotación (rpm).

d: diámetro del agitador (m).

ρ: densidad del fluido (Kg/m³).

μ: viscosidad (Pa. s).

CAPÍTULO III.

3. PROPUESTA.

3.1 Selección del reactor.

Para realizar el proceso de producción de biodiésel a base de aceite de higuera se realizó la comparación de dos tipos de reactores los cuales son los más utilizados para dicho proceso y se detallan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Selección del reactor.

Variables	Reactor discontinuo o Batch		Reactor continuo	
Volumen de producción	Bajo	4	Alto	3
Costo de producción	Bajo	4	Alto	2
Construcción	Simple	4	Específico	2
Sistema de control	Sencillo	4	Avanzado	3
Supervisión	Personalizada	2	Elementos electrónicos	4
Seguridad	Alta	4	Baja	2
Operaciones multiproducto	Diferentes productos en el mismo equipo	4	Producto específico	2
Costo de operación	Alto	3	Bajo	4
Total		29		22

Después de realizar el estudio de alternativas que presentan los dos reactores que muestra la tabla 3.1, se selecciona como mejor alternativa diseñar y construir el reactor tipo discontinuo o Batch el cual cumple con los requerimientos necesarios para la producción de biodiésel.

3.2 Cálculo de volúmenes para cada tanque.

3.2.1 Proporciones de hidróxido de sodio y metanol para el tanque de metóxido.

El volumen para el tanque de metóxido se estableció mediante mezclas estequiométricas y a la cantidad deseada de producto, siendo estas:

- 5 g de NaOH por cada litro de aceite de higuera.
- 0.2 litros de metanol por cada litro de aceite de higuera.

<i>aceite higuera (l)</i>		<i>metanol (l)</i>
1	→	0,2
25	→	x

$$x = 25 \text{ l} \times 0,2 \text{ l}$$

$$x = 5 \text{ litros de metanol} \rightarrow 5000 \text{ ml}$$

Hidróxido de Sodio (NaOH)

<i>aceite de higuera (l)</i>		<i>hidróxido de sodio (g)</i>
1	→	5
25	→	x

$$x = \frac{25 \text{ l} \times 5 \text{ g}}{1 \text{ l}}$$

$$x = 125 \text{ gNaOH}$$

3.2.1.1 Densidad del Hidróxido de Sodio

Se toma como dato la densidad del hidróxido de sodio con la finalidad de determinar el volumen que ocupa este reaccionante en el tanque de metóxido.

$$\rho_{\text{NaOH}} = 2.1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [3.1]$$

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

$$V = \frac{125 \text{ g}}{2.1 \text{ g/cm}^3}$$

$$V = 59.52 \text{ cm}^3 \rightarrow 0.0595 \text{ l.}$$

3.2.2 Cálculo del volumen del tanque de metóxido.

$$V_{T1} = V_{\text{metanol}} + V_{\text{NaOH}}$$

$$V_{T1} = 5 \text{ l} + 0.0595 \text{ l}$$

$$V_{T1} = 5.059 \text{ l.}$$

Se aumenta un factor de seguridad de un 20% con la finalidad de evitar el derrame del fluido.

$$V_{T1} = 5.059 \text{ l} \times 20\%$$

$$V_{T1} = 6.07 \text{ l.}$$

3.2.3 Cálculo del volumen del reactor.

Para el volumen del reactor corresponde el volumen del tanque de metóxido y un volumen neto de aceite de higuera de 25 litros.

$$V_{T2} = \text{volumen aceite de higuera} + \text{volumen tanque de metóxido } (V_{T1})$$

$$V_{T2} = 25 \text{ l} + 6 \text{ l}$$

$$V_{T2} = 31 \text{ l}$$

$$V_{T2} = 31 \text{ l} \times 20\%$$

$$V_{T2} = 37.2 \text{ l}$$

3.2.4 Cálculo del volumen del tanque de separación glicérica, lavado y secado.

Para determinar el volumen de dicho tanque se realiza la operación de suma del volumen del reactor con el 50% de agua.

$$V_{T3} = \text{volumen del reactor} + 50\% \text{ de agua}$$

$$V_{T3} = 31 \text{ l} + 15.5 \text{ l}$$

$$V_{T3} = 46.5 \text{ l}$$

$$V_{T3} = 46.5 \text{ l} \times 20\%$$

$$V_{T3} = 55.8 \text{ l}$$

3.3 Cálculo para la obtención del diámetro y alturas para cada tanque.

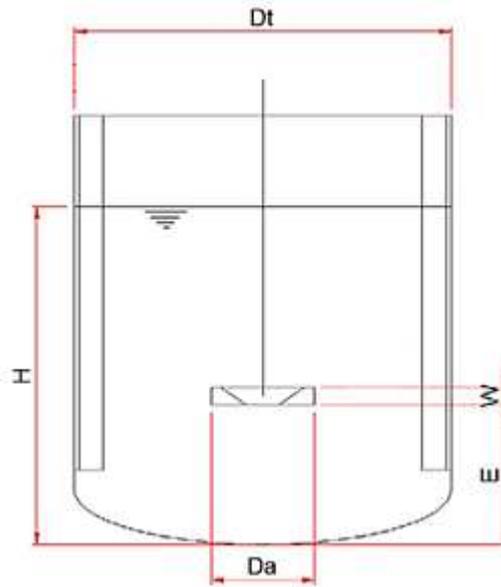


Figura 3.1. Proporciones geométricas.
Fuente: (Denbigh & James, 1990)

Proporciones geométricas según (Denbigh & James, 1990) para el inicio del diseño del reactor.

$$\frac{H_f}{D_t} = 1 \quad [3.2]$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad [3.3]$$

$$\frac{E}{D_a} = 1 \quad [3.4]$$

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad [3.5]$$

Donde:

H_f : Altura del fluido.

D_t : Diámetro del tanque.

W : Ancho del impulsor.

D_a : Diámetro del impulsor.

E : Altura desde el fondo del tanque hasta el impulsor.

Para el inicio de los cálculos de los diámetros y alturas se basa las proporciones geométricas para tanques agitados.

3.3.1 Cálculo del diámetro y altura en el tanque de metóxido.

Para calcular el diámetro y altura del tanque de metóxido se utiliza la ecuación 3.2 como se indica a continuación.



Figura 3. 2. Tanque de metóxido

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

$$H_f = D_t$$

$$V = A \times h \rightarrow h = D_t$$

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

$$V = \frac{\pi \times D_t^3}{4}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \times V_{t1}}{\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \times 6000 \text{ cm}^3}{\pi}}$$

$$D_1 = 19.69 \text{ cm} \rightarrow 197 \text{ mm}$$

$$H = D_1 + 20\%$$

Se suma un 20% en la altura del tanque de metóxido para evitar derrame del líquido.

$$H = 197 \text{ mm} + 39.4$$

$$H = 236.4 \text{ mm} \approx 237 \text{ mm}$$

3.3.2 Cálculo del diámetro y altura del reactor.



Figura 3.3. Reactor.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \times V_{t2}}{\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \times 37000 \text{ cm}^3}{\pi}}$$

$$D_2 = 36.11 \text{ cm} \rightarrow 361.1 \text{ mm}$$

$$H = D_2 + 20\%$$

Se suma un 20% en la altura del reactor para evitar derrame del líquido.

$$H = 361.1 \text{ mm} + 72.22$$

$$H_2 = 433.32 \text{ mm} \rightarrow 43.33 \text{ cm}$$

3.3.3 Cálculo de la altura y diámetro en el tanque de separación glicérica lavado y secado.



Figura 3.4. Tanque separación glicérica.

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \times V_{t3}}{\pi}}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \times 66000 \text{ cm}^3}{\pi}}$$

$$D_2 = 43.80 \text{ cm} \rightarrow 438 \text{ mm}$$

$$H = D_3 + 20\%$$

Se suma un 20% en la altura del tanque de separación glicérica lavado y secado para evitar derrame del líquido

$$H = 43.80 \text{ mm} + 8.76$$

$$H_2 = 52.56 \text{ cm} \rightarrow 525.6 \text{ mm}$$

3.4 Cálculo de la velocidad tangencial para la selección de la paleta.

Para calcular la velocidad tangencial se usa la ecuación 3.6 según (Gieck & Gieck, 2003) la cual involucra la velocidad angular y el radio del impulsor, con la finalidad de elegir la paleta en base a este parámetro.

3.4.1 velocidad tangencial tanque metóxido.

$$v = \omega \times r$$

[3. 6]

Donde:

v : velocidad.

ω : velocidad angular.

r : radio.

$$v_{t1} = 20.94 \times 0.08$$

$$v_{t1} = 1.6752 \text{ m/s}$$

3.4.2 velocidad tangencial reactor.

$$v_{t2} = 20.94 \times 0.1$$

$$v_{t2} = 2.094 \text{ m/s}$$

3.4.3 velocidad tangencial tanque de separación glicérica, lavado y secado.

$$v_{t3} = 20.94 \times 0.12$$

$$v_{t3} = 2.5128 \text{ m/s}$$

3.5 Selección del impulsor.

A continuación, se detalla una tabla comparativa de los tipos de impulsores que intervienen en el proceso de agitación y mezcla en las etapas de producción de biodiésel.

Tabla 3 2. Selección del impulsor.

Variables	Impulsor tipo ancla		Impulsor tipo hélice		Impulsor pala inclinada		Impulsor tipo plano de disco	
Régimen	Laminar	2	Turbulento	3	Laminar turbulento	4	Turbulento	3
Velocidad tangencial	2 m/s	2	3 m/s a 9 m/s	3	2 m/s a 10 m/s	4	4 m/s a 10 m/s	1
Viscosidad	< 1000 Pa · s	4	< 20 Pa · s	4	< 100 Pa · s	4	< 20 Pa · s	4
Flujo	Tangencial	2	Axial	2	Axial, Radial	4	Radial	2
Costo	Alto	1	Alto	1	Bajo	4	Alto	1
Construcción	Complejo	1	Complejo	1	Fácil	4	Complejo	1
Total		12		14		24		12

Una vez realizada la comparación de los diferentes tipos de impulsores que hace referencia la tabla 3.2, se muestra que el impulsor tipo pala inclinada es el apropiado para efectuar la mezcla debido a que genera dos tipos de flujos, axiales y radiales logrando de esta manera evitar sedimentos en el fondo del tanque. La gran diferencia del impulsor seleccionado y los demás tipos de impulsores radica en la factibilidad de diseño, construcción y costo reducido.

3.6 Cálculos para la obtención de la potencia de las resistencias para el reactor y tanque de separación glicérica, lavado y secado.

Para realizar el cálculo de las potencias de las resistencias las mismas que generarán la energía suficiente para el precalentamiento del aceite de ricino, y mantener la temperatura en la etapa de transesterificación necesarias en el reactor y en el tanque de separación glicérica, lavado y secado se basa en las densidades de cada material y el volumen. Utilizando la fórmula según (Cengel & Boles, 2008) que se muestra a continuación.

3.6.1 Cálculo de la potencia de la resistencia para el reactor.

Para obtener la potencia de la resistencia se debe realizar como primer paso el cálculo de la masa del aceite de higuierilla, para ello es necesario utilizar la ecuación 3.1.

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

$$\rho_{aceite} = 0.9615 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{Químicos, 2016})$$

$$m = \rho_{aceite} \times V_{T2}$$

$$m = 0.9615 \text{ g/cm}^3 \times 37000 \text{ cm}^3$$

$$m = 35575.5 \text{ g} \rightarrow 35.5755 \text{ kg}$$

Una vez conseguida la masa se procede a reemplazar dicho valor en la ecuación 3.7 según (Cengel & Boles, 2008) para obtener el calor necesario para aumentar la temperatura.

$$Q = c \times m \times \Delta t \quad [3. 7]$$

Donde:

Q: Calor necesario para aumentar la temperatura.

c: calor específico

m: masa

Δt: variación de la temperatura ($t_f - t_i$)

$$t_i = 20^\circ C \rightarrow 293.15^\circ K$$

$$t_f = 60^\circ C \rightarrow 333.15^\circ K$$

Los datos de variación de temperatura se tomaron como inicial temperatura ambiente 20°C y temperatura final 60°C ya que el Metanol se evapora a los 65°C (Textos científicos, 2005).

$$Q = \left(1.8 \frac{KJ}{kg^\circ K} \right) \times (35.5755 \text{ kg}) \times (40^\circ K)$$

$$Q = 2561.436 \text{ KJ}$$

Para calcular la potencia requerida de la resistencia se realiza mediante la ecuación 3.8 según (Cengel & Boles, 2008).

$$P = \frac{E}{t} \quad [3.8]$$

$$P = \frac{2561.436 \text{ KJ}}{1800 \text{ s}}$$

$$P = 1.42 \text{ kW}$$

3.6.2 Cálculo de la potencia de la resistencia para el tanque de separación glicérica, lavado y secado.

Para calcular la potencia de la resistencia en el tanque de separación glicérica, lavado y secado se tomará en consideración la densidad media del biodiésel según (NTE INEN 2482, 2009). Y la densidad del agua ya que en este tanque se mezclan los dos fluidos.

3.6.2.1 Biodiésel.

Datos:

$$\rho = 880 \text{ kg/m}^3$$

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

$$t_i = 20^\circ C$$

$$t_f = 100^\circ C$$

Se calcula el valor de la masa del biodiésel basándose en la ecuación 3.1 tomando los datos anteriormente detallados.

$$\rho = \frac{m}{V_{t2}}$$

$$m = \rho \times V_{t2}$$

$$m = (880 \text{ kg/m}^3) \times (0.037 \text{ m}^3)$$

$$\mathbf{m = 32.56 \text{ kg}}$$

Se reemplaza el valor de la masa en la siguiente ecuación para determinar el valor del calor necesario para aumentar la temperatura y así poder calcular el valor de la potencia en la resistencia

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

$$Q = \left(1966.48 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right) \times (32.56 \text{ kg}) \times (80^\circ \text{C})$$

$$\mathbf{Q = 5122.28 \text{ Kj}}$$

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

$$P = \frac{5122.28 \text{ KJ}}{3600 \text{ s}}$$

$$\mathbf{P_{diesel} = 1.42 \text{ kW}}$$

De la misma manera que se realizó el cálculo de la potencia de la resistencia en el biodiésel se procede a efectuar en el agua dicho cálculo.

3.6.2.2 Agua.

Datos:

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

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

$$t_i = 20^\circ \text{C}$$

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

Cálculo para obtener el valor de la masa del agua basándose en la ecuación 3.1.

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

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

$$m = (1000 \text{ kg/m}^3) \times (0.0185 \text{ m}^3)$$

$$m = 18.5 \text{ kg} \rightarrow 18500 \text{ g}$$

Con el valor de la masa se procede a calcular el calor necesario para el aumento de la temperatura.

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

$$Q = \left(4.186 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right) \times (18500 \text{ g}) \times (80^\circ \text{C})$$

$$Q = 6195,28 \text{ KJ}$$

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

$$P = \frac{6195.28 \text{ KJ}}{3600 \text{ s}}$$

$$P_{agua} = 1.72 \text{ kW}$$

Una vez que se obtuvo las dos potencias del agua y del biodiésel se procede a sumar dichos resultados para obtener una potencia total.

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

$$P_T = 1.42 \text{ kW} + 1.72 \text{ kW}$$

$$P_T = 3.14 \text{ kW}$$

3.7 Cálculo de la potencia de los motores.

Para el siguiente cálculo se empezará por determinar el número de Reynolds con el cual se sabrá si el flujo es laminar o turbulento del fluido.

3.7.1 Cálculo de Reynolds para el tanque de metóxido.

Para el cálculo del número de Reynolds se utiliza la ecuación 2.1 previamente descrita.

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

$$R_e = \frac{200 \frac{rev}{60s} \times (0.16m)^2 \times 2890 \frac{kg}{m^3}}{5.44 \times 10^{-4} kg/ms}$$

$$R_e = 453.33 \times 10^3$$

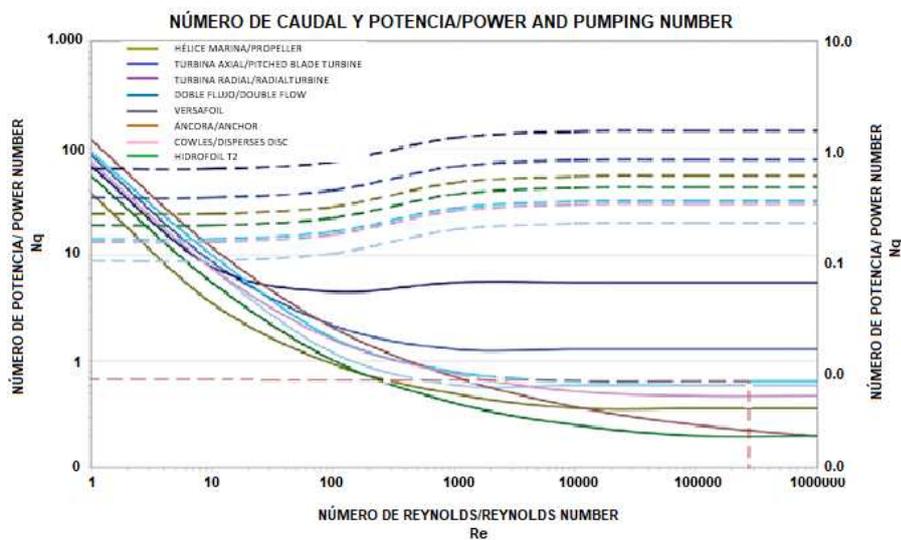


Figura 3.5. Número de Reynolds y potencia.
Fuente: (Link Industrial, 2011).

Mediante el número de Reynolds obtenido se determinó que el flujo es turbulento como se muestra en la Figura 2.10, para el tanque de metóxido y se encontró mediante la Figura 3.5, el número de potencia (N_p) correspondiente a 0.9 para la obtención del valor de la potencia se utiliza la ecuación 2.2.

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

$$N_p = 0.9$$

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

$$P = 0.9 \times (200 \text{ rev}/60\text{s})^3 \times (0.16\text{m})^5 \times 2890 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$P_{\text{fluido}} = 10.10 \text{ W}$$

3.7.1.1 Potencia de la paleta.

Para obtener la potencia de la paleta se calcula el torque que se obtiene como resultado de la multiplicación de la inercia obtenida mediante el software SolidWorks por la aceleración angular como se muestra en la ecuación 3.9.



Momentos de inercia: (gramos*milímetros cuadrados)
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$$I_{xx}=12016002.93$$

$$I_{yx}= -14.22$$

$$I_{zx}= - 716.12$$

$$I_{xy}= -14.22$$

$$I_{yy}= 12016013.15$$

$$I_{zy}= 713.21$$

$$I_{xz}= - 716.12$$

$$I_{yz}= 713.21$$

$$I_{zz}= 178892.45$$

Figura 3.6. Inercia paleta tanque de metóxido.

$$T = I \times \alpha$$

[3. 9]

Donde:

T: Torque

I: Inercia

α : aceleración angular

P: Potencia

ω : velocidad angular

$$T = 178892.45 \text{ gmm}^2 \times 41.88 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$T = 7.4920 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

$$P_{paleta} = T \times \omega$$

$$P_{paleta} = 7.4920 \times 10^{-3} N.m \times 20.94 \text{ rad/s}$$

$$P_{paleta} = 0.1568 \frac{N.m}{s} \rightarrow W$$

$$Potencia\ de\ consumo = P_{paleta} + P_{fluido}$$

$$P_{consumo} = 0.1568 W + 10.10 W$$

$$P_{consumo} = 10.2568 W$$

$$Potencia\ nominal = \frac{Potencia\ de\ consumo}{Rendimiento}$$

$$P_{nominal} = \frac{10.2568 W}{0.6}$$

$$P_{nominal} = 17.09 W$$

3.7.2 Cálculo de Reynolds para el reactor.

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

$$Re = \frac{200 \frac{rev}{60s} \times (0.2m)^2 \times 900 \frac{kg}{m^3}}{1.1 \text{ kg/ms}}$$

$$Re = 109.09$$

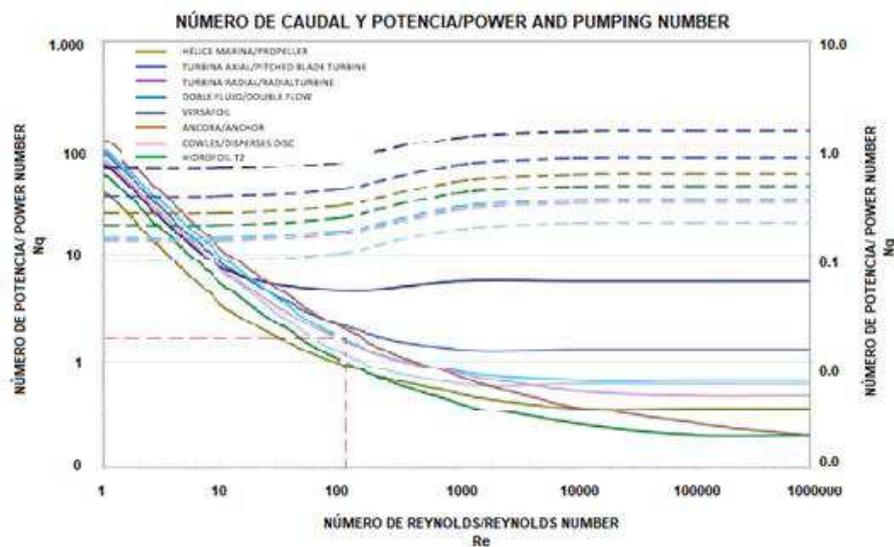


Figura 3.7. Número de Reynolds y potencia.

Fuente: (Link Industrial, 2011).

Mediante el número de Reynolds obtenido se determinó que el flujo es transitorio como se muestra en la Figura 2.10, para el reactor y se encontró mediante la Figura 3.7, el número de potencia (N_p) correspondiente a 2.8.

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

$$N_p = 2.8$$

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

$$P = 2.8 \times \left(200 \frac{rev}{60s}\right)^3 \times (0.2m)^5 \times 900 \frac{kg}{m^3}$$

$$P_{fluido} = 29.86 W$$

3.7.2.1 Potencia de la paleta.

Para obtener la potencia de la paleta se calcula el torque que se obtiene como resultado de la multiplicación de la inercia obtenida mediante el software SolidWorks por la aceleración angular.



Momentos de inercia: (gramos*milímetros cuadrados)
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$I_{xx} = 21543612.60$	$I_{xy} = -5.07$	$I_{xz} = -2371.78$
$I_{yx} = -5.07$	$I_{yy} = 21543624.76$	$I_{yz} = -3207.50$
$I_{zx} = -2371.78$	$I_{zy} = -3207.50$	$I_{zz} = 310249.55$

Figura 3.8. Inercia paleta reactor.

$$T = I \times \alpha$$

$$T = 310249.55 gmm^2 \times 41.88 \frac{rad}{s^2}$$

$$T = 0.012 N.m$$

$$P_{paleta} = T \times \omega$$

$$P_{paleta} = 0.012 N.m \times 20.94 rad/s$$

$$P_{paleta} = 0.2512 \frac{N \cdot m}{s} \rightarrow W$$

$$Potencia\ de\ consumo = P_{paleta} + P_{fluido}$$

$$P_{consumo} = 0.2512 W + 29.86 W$$

$$P_{consumo} = 30.11 W$$

$$Potencia\ nominal = \frac{Potencia\ de\ consumo}{Rendimiento}$$

$$P_{nominal} = \frac{30.11 W}{0.6}$$

$$P_{nominal} = 50.18 W$$

3.7.3 Cálculo de Reynolds para el tanque de separación glicérica, lavado y secado.

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

$$Re = \frac{200 \frac{rev}{60s} \times (0.24m)^2 \times 1900 \frac{kg}{m^3}}{1.756 kg/ms}$$

$$Re = 207.74$$

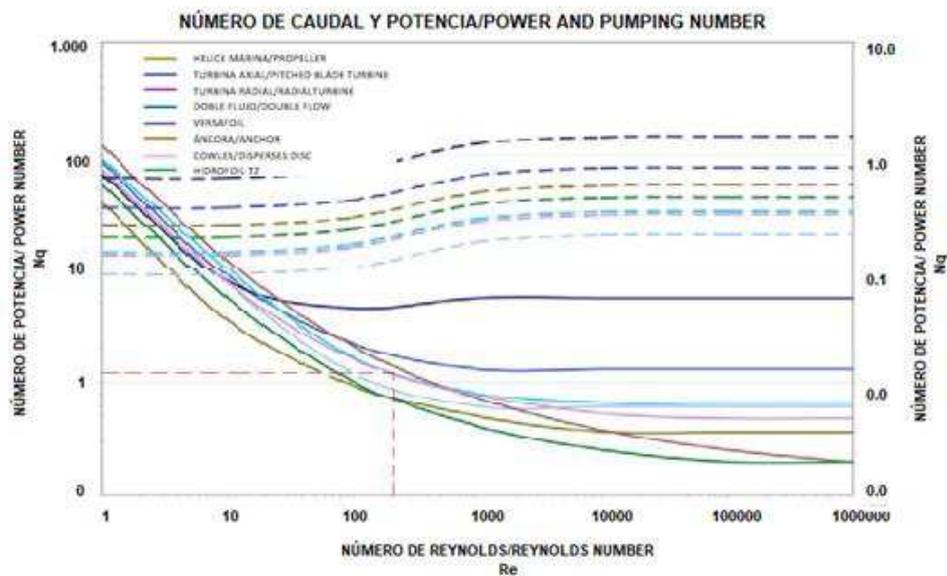


Figura 3 9. Número de Reynolds y potencia.
 Fuente: (Link Industrial, 2011).

Mediante el número de Reynolds obtenido se determinó que el flujo es transitorio como se muestra en la Figura 2.10, para el tanque de separación glicérica,

lavado y secado, se encontró mediante la Figura 3.9, el número de potencia (N_p) correspondiente a 2.

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

$$N_p = 2$$

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

$$P = 2 \times (200 \text{ rev}/60\text{s})^3 \times (0.24\text{m})^5 \times 1900 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$P_{\text{fluido}} = 112.06 \text{ W}$$

3.7.3.1 Potencia de la paleta.

Para obtener la potencia de la paleta se calcula el torque que se obtiene como resultado de la multiplicación de la inercia obtenida mediante el software SolidWorks por la aceleración angular.



Momentos de inercia: (gramos*milímetros cuadrados)
Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$I_{xx} = 43871740.78$	$I_{xy} = -10.35$	$I_{xz} = 5767.77$
$I_{yx} = -10.35$	$I_{yy} = 43871752.99$	$I_{yz} = -3347.85$
$I_{zx} = 5767.77$	$I_{zy} = -3347.85$	$I_{zz} = 441534.24$

Figura 3.10. Inercia del tanque de separación glicérica.

$$T = I \times \alpha$$

$$T = 441534.24 \text{ gmm}^2 \times 41.88 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$T = 0.018 \text{ N.m}$$

$$P_{\text{paleta}} = T \times \omega$$

$$P_{paleta} = 0.018 \text{ N.m} \times 20.94 \text{ rad/s}$$

$$P_{paleta} = 0.3769 \frac{\text{N.m}}{\text{s}} \rightarrow W$$

$$P_{potencia \text{ de consumo}} = P_{paleta} + P_{fluido}$$

$$P_{consumo} = 0.3769 W + 112.06 W$$

$$P_{consumo} = 112.43 W$$

$$P_{potencia \text{ nominal}} = \frac{Potencia \text{ de consumo}}{Rendimiento}$$

$$P_{nominal} = \frac{112.43 W}{0.6}$$

$$P_{nominal} = 187.4 W$$

3.8 Simulación.

Una vez finalizado los cálculos se procede a realizar la simulación mediante el software SolidWorks para determinar el comportamiento del fluido con los impulsores ya seleccionados previamente.

Para dicha simulación el software requiere del ingreso de algunos parámetros de los elementos que se van a mezclar en los diferentes tanques, los cuales se detallan en la tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Parámetros de los materiales a mezclar.

Parámetros	Tanque Metóxido	Reactor	Tanque separación glicérica, lavado y secado
Densidad	$\rho_{metanol}: 790 \frac{kg}{m^3}$ $\rho_{NaOH}: 2100 \frac{kg}{m^3}$	$\rho_{higuerilla}: 900 \frac{kg}{m^3}$	$\rho_{biodiesel}: 900 \frac{kg}{m^3}$ $\rho_{agua}: 1000 \frac{kg}{m^3}$
Temperatura	T: 20°C	$T_1: 30^\circ C$ $T_2: 50^\circ C$	T: 100°C
Velocidad	V: 100 rpm	$V_1: 100rpm$ $V_2: 200rpm$	V: 100 rpm
Viscosidad	$\mu_{metanol}: 5.44 \times 10^{-4} \frac{kg}{ms}$	$\mu_{higuerilla}: 1.1 \frac{kg}{ms}$	$\mu_{biodiésel}: 1.1 \frac{kg}{ms}$ $\mu_{agua}: 0.656 \frac{kg}{ms}$

3.8.1 Simulación del tanque de metóxido.

En la simulación del tanque de metóxido figura 3.11, se puede notar el movimiento del flujo axial y radial que realiza el fluido, con dicha simulación se puede garantizar que existe mezcla, además de no tener derrame del fluido en la parte superior y la selección de los impulsores de palas inclinadas son adecuadas.

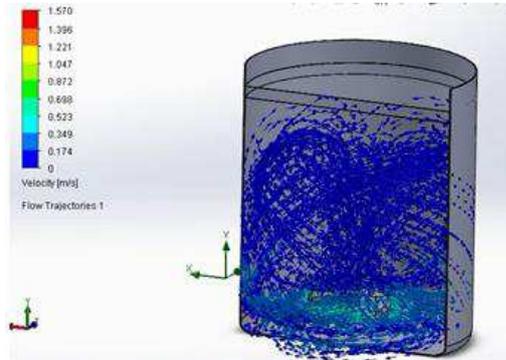


Figura 3.11. Simulación tanque metóxido.

3.8.2 Simulación del reactor.

Como se puede observar en la figura 3.12, la simulación del fluido en el reactor genera una turbulencia indispensable para obtener una mezcla ideal, el movimiento del fluido se genera desde el fondo del tanque con lo cual se evita los residuos de sólidos que aún no se han disuelto.

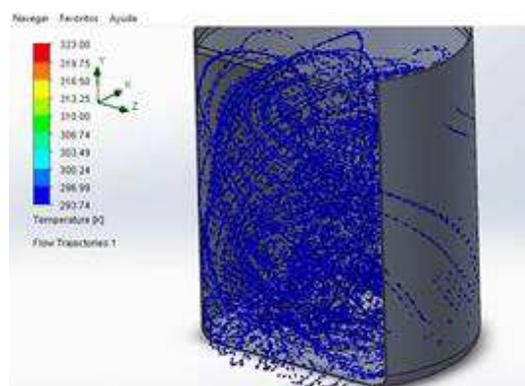


Figura 3.12. Simulación del reactor.

3.8.3 Simulación del tanque de separación glicérica, lavado y secado.

Para obtener una mezcla adecuada en el tanque de separación glicérica se instalaron dos impulsores uno sobre otro en un mismo eje, con la finalidad de homogenizar el biodiésel y el agua en el proceso de lavado, como se aprecia

en la figura 3.13, el fluido tiende a moverse desde el fondo del cono hacia la parte superior del tanque.

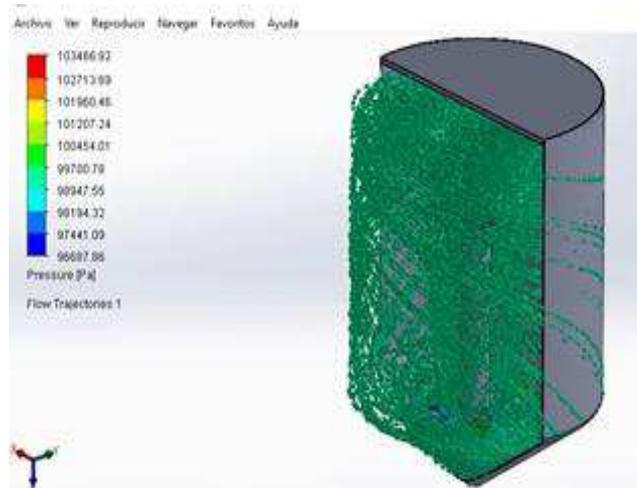


Figura 3.13. Simulación tanque de separación glicérica.

3.9 Construcción.

Una vez culminado los cálculos y simulación se procede a la construcción de la estructura que albergará a los tanques agitados previamente elaborados en el software SolidWorks como se muestra en la figura 3.14.

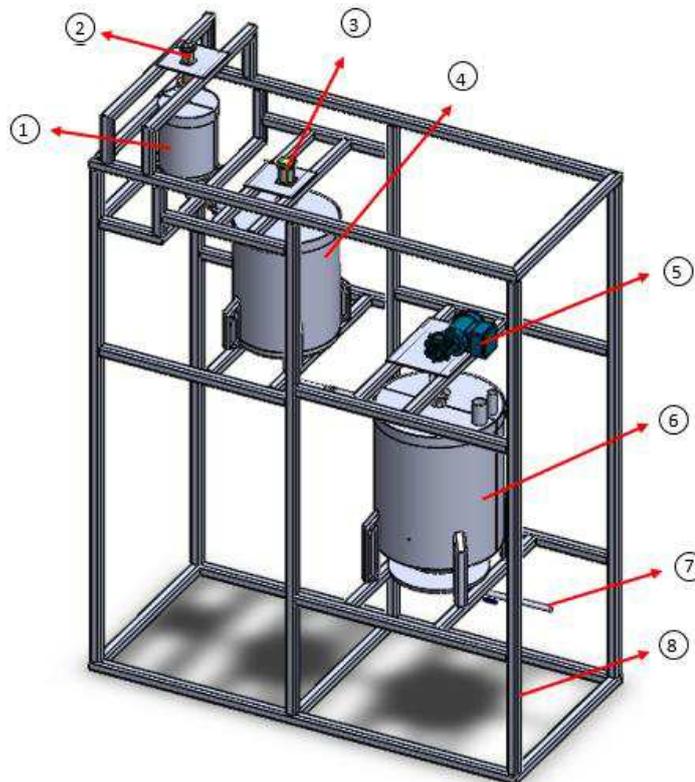


Figura 3.14. Diseño de máquina.

Partes:

1. Tanque de metóxido.
2. Motor para tanque de metóxido.
3. Motor para reactor.
4. Reactor.
5. Motor para tanque de separación glicérica.
6. Tanque de separación glicérica, lavado y secado.
7. Tubería acero inoxidable.
8. Estructura metálica.

3.9.1 Construcción de la estructura metálica.

Tomando como referencia las medidas del software y luego de realizar algunos procesos que implica la construcción de la estructura se procede a seccionar y unir mediante suelda los elementos estructurales para formar la estructura metálica como se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.15. Estructura metálica.

3.9.2 Construcción de tanques agitados.

Para la construcción del tanque de metóxido, reactor y tanque de separación de glicerina se utilizó como referencias las figuras 3.16, 3.17 las cuales indican el tipo de material a utilizar en base a las sustancias químicas.

RESISTENCIA QUIMICA DE LOS METALES

Clasificación por resistencia: A = Bueno; F = Regular; C = Precaución, depende de las condiciones; X = No se recomienda.

Precaución: No utilice la tabla sin leer las notas de pie de página y el texto.

Sustancia	Hierro y acero	Latón rojo	Bronce comercial	Plomo	Cobre	Aluminio	Níquel	Inconel	Metal Monel	Ac. Inox. Tipo 304	Ac. Inox. Tipo 316	Ac. Inox. Tipo 347	Ac. Inox. Carpenter "20"	Hastelloy "B" o "C"
Peróxido de hidrógeno	C	C	F	C	C	C	C	C	C	A	A	C	A	A
Sulfuro de hidrógeno, seco (20)...	A	X	X	-	X	A	C	A	C	C	A	A	A	A
Húmedo	C	X	X	-	X	A	C	A	C	C	A	A	A	A
Lacas (solventes)	C	C	C	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido láctico	X	A	A	-	C	F	A	C	C	A	A	A	A	A
Aceites lubricantes, refinados	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cloruro de magnesio	F	F	F	X	F	F	A ₂₁	A ₂₁	A ₂₁	C	C	A	A	A
Hidróxido de magnesio	A	C	C	-	X	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Sulfato de magnesio	C	A	-	-	X	C	A	A	A	A	A	-	-	-
Mercurio	A	X	X	-	X	X	A	-	A	A	A	-	-	-
Gas natural	A	C	C	A	C	X	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido nítrico, crudo	X	X	X	X	X	A ₂₂	X	C	X	A	A	A	A	A
diluido	X	X	X	X	X	A ₂₂	X	C	X	A	A	A	A	A
concentrado	X	X	X	X	X	A ₂₂	X	X	X	A	A	A	A	A
Acido oleico	C	A	A ₂₃	X	C ₂₃	A ₂₃	A	A	A	A	A	A	A	A ₂₃
Acido oxálico	C	A	A	X	C	C	F	A	A	A	F	A	A	A
Acido palmítico	C	C	A ₂₃	C	C ₂₃	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Aceites de petróleo, < 500°F - crudo	A	A	C	A	C	A	C	A	C	C	F	A	A	A
Acido fosfórico	C	C	C ₂₄	C	C ₂₄	X	C	C	C	C	F	A	A ₂₄	A
Hidróxido de potasio	C	X	X	X	X	X	A	A	A	C	C	-	-	A
Sulfato de potasio	C	A	-	A	A	A	A	A	A	F	F	-	-	A ₂₅
Propano	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Gas de cloacas	C	X	X	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A
Ceniza de sosa (carbonato de sodio)	A	F	F	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A
Bisulfato de sodio	X	F	F	A	F	C	-	-	-	A	C	A	A	A
Cloruro de sodio	F	F	F	A	C	A ₂₅	A ₂₅	A ₂₅	C	C	-	A	A	A
Cianuro de sodio	A	X	X	X	X	C	-	-	C	C	-	-	-	-
Hidróxido de sodio	A	C	F	F	C	X	A	A	A	A	A	A	A	A
Hipoclorito de sodio	X	C	F	X	C	X	C	C	C	C	C	C	F	A ₂₆

Figura 3.16. Resistencia química de los metales.
Fuente: (Megyesy, 1992)

Como se puede observar en la figura 3.16, se detallan algunos tipos de metales y su afinidad para soportar diferentes sustancias químicas según

(Megyesy, 1992) designa la calificación de la resistencia de los metales por letras siendo estas:

A: bueno

B: regular

C: precaución

X: no recomendable

En este caso el acero inoxidable AISI 304 obtiene una calificación (A: bueno) para soportar al hidróxido de sodio (NaOH) resaltado con color rojo en la figura anterior por el contrario, el aluminio obtiene una calificación (X: no recomendable) para este tipo de sustancia química sólida.

En la figura 3.17, se puede observar que se especifican varios productos químicos, así como algunos tipos de materiales como: Plásticos, elastómeros, metales y no metales los cuales califican su resistencia mediante colores siendo estos:

Verde: sin efecto

Celeste: efecto menor

Amarillo: efecto moderado

Tomate: efecto severo

Con respecto al acero inoxidable AISI 304 tiene una calificación (Verde: sin efecto) para resistir al metanol compuesto indispensable para el proceso de metóxido el cual está resaltado con color rojo como se indica en la siguiente figura.

8 PRODUCTO QUIMICO	Plásticos										Elastómeros										Metales										No Metales						
	ABS, plástico	Acetal (Dextrin*)	C-PVC	Epoxy	Hytrek	LDPE	Noryl*	Nylon	Polycarbonato	Polipropileno	PPS (Ryton*)	PTFE (Teflón*)	PVC	PVDF (Kynar*)	Buna N (Nitrilo)	EPDM	Hypalon*	Kel F*	Goma natural	Neopreno	Silicona	Tygon*	Wipac*	Ac. inox. 304	Ac. inox. 316	Aluminio	Latón	Bronce	Carpenter 20	Fundición Hierro	Cobre	Hastelloy C*	Titanio	Carbón, grafito	Cerámica Al2O3	Cerámica, magnet.	
Lejías: CA(OH)2 Calcio, hidróxido	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Licores blancos (molino de pasta)																																					
Ligroina																																					
Linoléico, ácido																																					
Litio, cloruro																																					
Litio, hidróxido																																					
Lubricantes																																					
Magnesio, Bisulfato																																					
Magnesio, Carbonato																																					
Magnesio, Cloruro																																					
Magnesio, Hidróxido																																					
Magnesio, Nitrato																																					
Magnesio, Oxido																																					
Magnesio, Sulfato (Sales de Epsom)																																					
Maléico, Acido																																					
Maléico, Anhídrido																																					
Málico, Acido																																					
Malta (mojada)																																					
Manganeso, Sulfato																																					
Mantequilla (suero)																																					
Mayonesa																																					
Melamina																																					
Melazas																																					
Mercurio																																					
Mercurio, Cianuro																																					
Mercurio, Cloruro (diluido)																																					
Mercurio, Nitrato																																					
Metano																																					
Metanol, Metil, alcohol																																					
Metil, Acetato																																					
Metil, Acetona																																					
Metil, Acrilato																																					
Metil, Alcohol 10%																																					
Metil, Bromuro																																					
Metil, Butil Ketona																																					

Figura 3.17. Selección de materiales.
Fuente: (Proindeca, 2012)

3.9.3 Corte de la lámina de acero inoxidable.

Para el proceso de construcción se calculó el perímetro y altura de los tanques, para cortar la lámina de acero inoxidable utilizando como medio de corte el plasma.



Figura 3.18. Corte de lámina de acero inoxidable.

3.9.4 Rolado de los tanques.

Después del corte por medio del plasma de la lámina de acero inoxidable, se procede a dar forma a los tanques por medio una roladora la cual permite obtener un diseño cilíndrico.



Figura 3.19. Tanques.

3.9.5 Soldadura.

Para el proceso de soldadura de los tanques agitados se eligió el electrodo UTP 308, debido a que se usa para la soldadura de unión y revestimiento en aceros de tipo cromo níquel, inoxidables y resistentes a la corrosión por ácidos. Sabiendo que el electrodo UTP tiene un aporte a base de níquel que cubre totalmente las más recientes exigencias y condiciones de seguridad de las industrias de reactores y criogénica (Böhler thyssen soldaduras, 2006). Sus características se detallan en la figura 3.20.



Electrodo para soldar aceros
inoxidables 19/9 resistentes a la
corrosión atmosférica y por ácidos

Campo de aplicación

UTP 308 se usa para la soldadura de unión y de revestimiento en aceros del tipo cromo-níquel 19/9, así como en aceros fundidos de tipos semejantes. Se sueldan también los aceros chapeados de la misma composición química.

UTP 308 se aplica económicamente en los aceros indicados a continuación:

	AISI	DIN	No. de material base
No estabilizado	302	X 12 CrNi 18 8	1.4300
	304	X 5 CrNi 18 9	1.4301
	—	GX 10 CrNi 18 8	1.4312
	308	—	—

Características de la soldadura

UTP 308 se suelda en todas las posiciones excepto la vertical descendente. Tiene un arco estable y se suelda sin salpicaduras. Fácil encendido y reencendido. Separación de la escoria con facilidad. La superficie del cordón posee un aspecto liso y fino, sin socavaciones.

Propiedades mecánicas del depósito

Resistencia a la tracción MPa	Alargamiento %	Límite de Elasticidad MPa
aprox. 600	> 30	~ 380

Análisis standard del depósito en %

C	Cr	Ni
< 0.05	19	9

Instrucciones para soldar

Limpiar la zona por soldar, sobre todo desengrasándola. Usar electrodos secos, arco corto. Electrodo que han estado expuestos al medio ambiente durante varias horas, deben secarse de hora y media a dos horas a una temperatura de 250°-300°C.

Tipos de corriente:
CC PI(+) / CA

Posición de soldaduras:



Electrodos	Ø x L(mm)	2.4 x 250	3.2 x 350	4.0 x 400	5.0 x 450
Amperaje	A	55-75	75-100	100-130	130-170

Figura 3.20. Características del electrodo UTP.

Fuente: (Böhler thyssen soldaduras, 2006).

Ya seleccionado el tipo de electrodo UTP se procede a soldar los tanques agitados como se muestran en la figura 3.21.



Figura 3.21. Tanque soldado

3.9.6 Construcción de bridas.

Para la construcción de las bridas del motor se tomó en cuenta el diámetro del eje de salida del motor para realizar la perforación de la brida, dicho elemento se fabrica con la finalidad de unir el eje del motor con el eje del impulsor y así transmitir movimiento al mismo.



Figura 3.22. Construcción de las bridas.

3.9.7 Construcción de impulsores.

Posterior al diseño y simulación en el software se procede a la construcción de los impulsores los mismos que están fabricados en acero inoxidable AISI 304, debido a que estos elementos van a estar en contacto directo y permanente durante el proceso de mezcla con elementos químicos corrosivos.



Figura 3.23. Construcción de los impulsores.

3.9.8 Construcción de las resistencias.

En base a los cálculos de las potencias obtenidas para las resistencias se procede a la construcción de las mismas, las cuales tienen la finalidad de precalentar y mantener la temperatura en el reactor y evaporar el agua en el

tanque de separación glicérica, lavado y secado, dichas resistencias son de forma circular y estarán alojadas a una distancia mínima del fondo de los tanques.



Figura 3.24. Construcción resistencias.

3.10 Capacidad y características del tanque de metóxido, reactor y tanque separador glicérico, lavado y secado.

Tabla 3.4. Capacidad y características de los tanques.

	Tanque metóxido	Reactor	Tanque separación glicérica.
Diámetro (m)	0.196	0.361	0.438
Altura (m)	0.237	0.433	0.525
Volumen (l)	5.05	31	46.5
Diámetro impulsor (m)	0.16	0.2	0.24
Número de espas	3	3	6
Potencia resistencias (kW)	--	1.42	3.14
Potencia de motores (W)	25	60	373

3.11 Tablero de control.

Los tableros eléctricos de control son paneles donde se albergan todos los dispositivos de control como interruptores, temporizadores, contactores y demás elementos auxiliares los cuales realizan operaciones determinadas en un proceso de automatización.

3.11.1 Descripción del tablero de control.

El tablero de control está constituido por componentes eléctricos y electrónicos los cuales facilitarán las operaciones y control de las diferentes variables como; temperatura, velocidad y tiempo de agitación, que se presentan en el proceso de producción de biodiésel, las mismas que se

llevarán a cabo en el tanque de metóxido, reactor y tanque de separación glicérica, lavado y secado como se muestra en la figura 3.25.

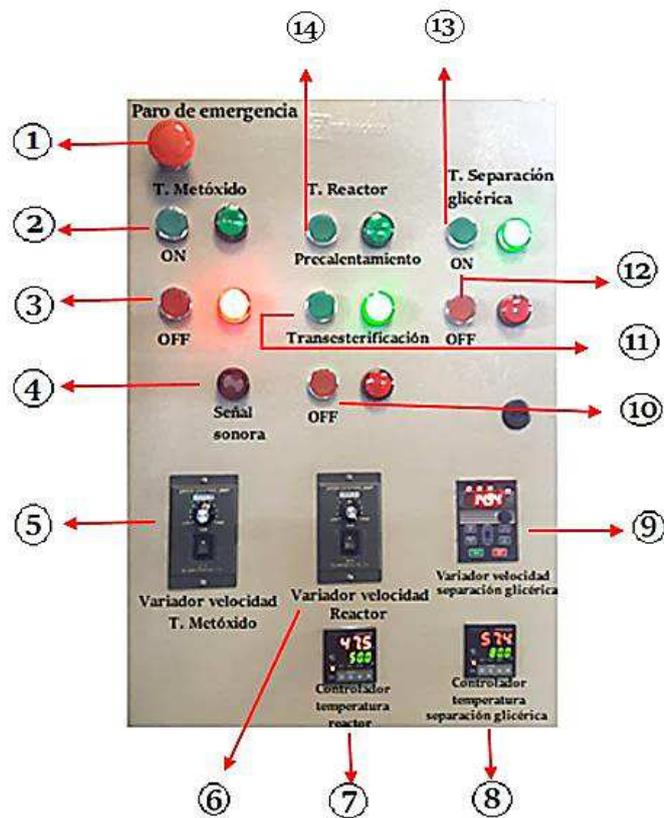


Figura 3.25. Tablero de control.

1. Pulsador paro de emergencia.
2. Inicio de agitación tanque de metóxido.
3. Fin de agitación tanque de metóxido.
4. Señal acústica y sonora.
5. Variador de frecuencia para el motor de 25 W.
6. Variador de frecuencia para el motor de 60 W.
7. Controlador de temperatura para el reactor.
8. Controlador de temperatura para el tanque de separación glicérica.
9. Variador de frecuencia para el motor de 373 W.
10. Fin de agitación reactor.
11. Inicio transesterificación.
12. Fin de agitación en el tanque de separación glicérica.
13. Inicio de agitación en el tanque de separación glicérica.
14. Inicio de agitación reactor.

3.12 Proceso de producción de biodiésel.

Para la producción de biodiésel a base de aceite de higuera se procede a realizar las mediciones de los reactantes químicos tanto para el tanque de metóxido como para el reactor tomando como referencia las siguientes proporciones de cada uno de los elementos químicos.

- ✓ Por cada litro de aceite de higuera se utiliza 0.2 litros de metanol.
- ✓ Por cada litro de aceite de higuera se utiliza 5 gramos de hidróxido de sodio (NaOH).

Tomando en consideración las proporciones descritas anteriormente se utilizará 15 litros de aceite de higuera y se procede a calcular la cantidad de hidróxido de sodio y metanol para el tanque de metóxido. Siendo estas las siguientes:

- ✓ Se utilizó 75 gramos de hidróxido de sodio (NaOH).
- ✓ Se utilizó 3 litros de metanol.

Una vez ya establecidas las cantidades para las mezclas se procede a pesar el hidróxido de sodio como se muestra en la figura 3.26.

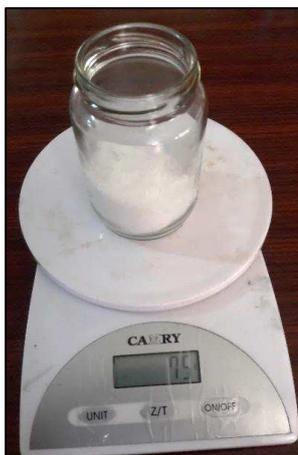


Figura 3.26. Hidróxido de sodio.

3.12.1 El proceso de producción de biodiésel da inicio en el tanque de metóxido, como se describe a continuación:

1. Se ingresa un volumen de 3 litros de metanol.
2. Se calibra el temporizador para un tiempo de 20 minutos como se indica en la imagen 3.27.

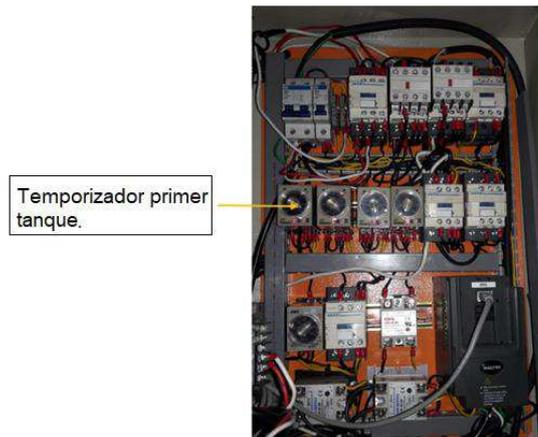


Figura 3.27. Ubicación temporizador tanque metóxido.

3. Se enciende el motor pulsando el botón verde que se encuentra en la parte superior izquierda del tablero de control para que inicie la agitación.
4. Se agrega 75 gramos de hidróxido de sodio (NaOH) sobre el metanol que se encuentra previamente agitado.
5. Se establece la velocidad de giro mediante el variador a 200 rpm.
6. Una vez culminado el tiempo de agitación previamente establecido en el temporizador se activará una alarma sonora y visual la cual indicará que la reacción esta lista y se apagará el motor de agitación automáticamente.

En la imagen 3.28 se puede apreciar la mezcla entre el metanol y el hidróxido de sodio.



Figura 3.28. Metanol e Hidróxido de sodio.

Antes de dar paso al proceso de transesterificación se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se vierten 15 litros de aceite de higuera puro en el reactor.
2. Se configura el controlador de temperatura a 30° C.
3. Se fija la velocidad de rotación en el variador a 100 rpm.
4. Se programa el temporizador para un tiempo de 30 minutos, tiempo que durará la homogenización de la temperatura en todo el volumen de aceite de higuera como se indica en la figura 3.29.



Figura 3.29. Ubicación temporizador reactor.

5. Una señal sonora y visual se activará con el fin de indicar la culminación de la etapa de homogenización del aceite de higuera y poder dar paso al proceso de transesterificación.
6. Para realizar el proceso de transesterificación el cual se lleva a cabo en el reactor se procede a activar la llave de paso que se encuentra ubicada entre el tanque de metóxido y reactor con el fin de dejar fluir el metóxido y mezclarse con el aceite de higuera como se muestra en la figura 3.30.



Figura 3.30. Ubicación llave de paso.

7. Se eleva la temperatura a 50° C.
8. Se incrementa la velocidad de agitación a 200 rpm.
9. El proceso de transesterificación se mantiene en las condiciones anteriormente descritas por un lapso de tiempo de 3 horas previamente programado en el temporizador como se indica en la figura 3.31.



Figura 3.31. Temporizador segundo tanque calentamiento.

10. Una vez transcurrido las 3 horas de agitación el motor se detendrá indicando por medio de una señal visual y sonora que el proceso ha finalizado.

En la imagen 3.32, se puede apreciar la etapa de transesterificación completa.



Figura 3.32. Transesterificación.

3.12.2 Etapa de separación glicérica:

1. Para realizar la etapa de separación glicérica se abre la llave de paso que se encuentra ubicada entre el reactor y el tanque cónico para dejar pasar todo el producto de la transesterificación que se encuentra en el reactor, como se indica en la figura 3.33.



Figura 3.33. Ubicación llave de paso, tanque cónico.

2. Para la separación glicérica se deja reposar el producto de la transesterificación en el tanque cónico por un tiempo aproximado de 9 días.

3. Una vez transcurrido el tiempo de 9 días se puede diferenciar claramente que la glicerina se ha separado del biodiésel como se muestra en la figura 3.34, debido a la diferencia de densidades.

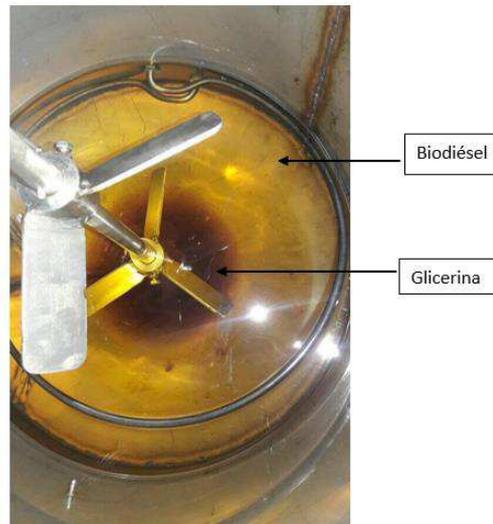


Figura 3.34. Separación glicérica.

4. Una vez realizada la separación se procede a extraer la glicerina por medio de la llave de paso que se encuentra ubicada en la parte inferior del tanque cónico. En la imagen 3.35, se puede visualizar la glicerina obtenida.



Figura 3.35. Glicerina.

3.12.3 Etapa del lavado y secado del biodiésel.

1. Una vez concluido la etapa de extracción de glicerina del tanque cónico se procede al lavado del biodiésel en el mismo tanque con la finalidad de purificar y eliminar posibles restos de alcohol y glicerina inmersos en el biodiésel. Es necesario tomar en consideración que el lavado se realiza agregando el 50% de agua del volumen del biodiésel presente en el tanque.

2. Se da inicio programando el tiempo de agitación del motor en el temporizador de 5 minutos, el cual se encuentra ubicado dentro de la caja de control como se indica en la figura 3.36.

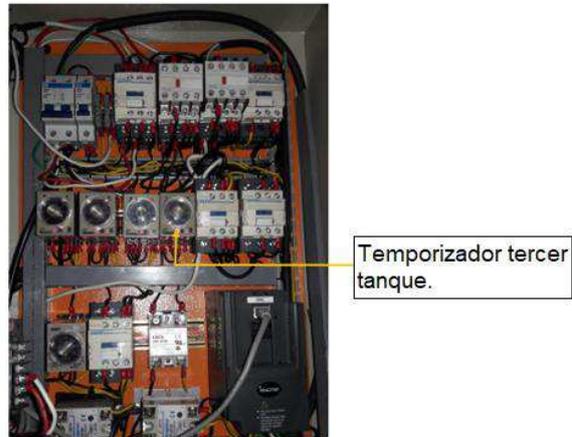


Figura 3.36. Ubicación temporizador tercer tanque.

3. Se inicia presionando el pulsador color verde que se encuentra en la parte derecha superior del tablero denominado T. Separación glicérica, a una velocidad de agitación de 100 rpm o 26Hz que se puede configurar desde la pantalla del variador como se indica en la figura 3.37.



Figura 3.37. Indicador de selección de frecuencia.

4. Una vez ya establecida la frecuencia el motor empieza a mover el agitador por un tiempo establecido de 5 minutos como se muestra en la figura 3.38.



Figura 3.38. Mezcla de agua y biodiésel.

5. Con la finalidad de obtener un biodiésel libre de agua se realiza el procedimiento de secado a una temperatura de 100°C la cual ayuda a evaporar toda el agua de la etapa de lavado, esta acción se lleva cabo por un tiempo de una hora dicha acción se realiza por una resistencia eléctrica ubicada en la parte interior e inferior del tanque cónico como se muestra en la figura 3.39.



Figura 3.39. Ubicación resistencia eléctrica.

6. Tomando en cuenta que dicho proceso de lavado y secado se debe realizar 5 veces para asegurar que el biodiésel esté libre de residuos de agua.

CAPÍTULO IV.

4. RESULTADOS.

Para el desarrollo del presente capítulo de resultados obtenidos se tomó en consideración el diseño preliminar y simulación de elementos tanto fijos como móviles realizados en el software SolidWorks. Esta herramienta computacional de diseño tiene como finalidad proyectar de manera real el comportamiento dinámico de las diferentes partes que intervienen en la máquina, y así garantizar de esta manera el correcto funcionamiento.

4.1 Simulación y construcción de la máquina.

Para la construcción de la máquina se desarrolló un diseño previo con las características, requerimientos y materiales de los diferentes elementos que intervienen en la producción de biodiesel, los cuales fueron realizados en el software SolidWorks con el objetivo de simular el diseño final de la máquina, cabe recalcar que los accesorios como; motores, pernos, tuercas, tubería y llaves de paso son seleccionadas previamente de un sitio web enlazado con el programa SolidWorks llamado 3D Content el diseño final se muestra en las figuras 4.1, 4.2.

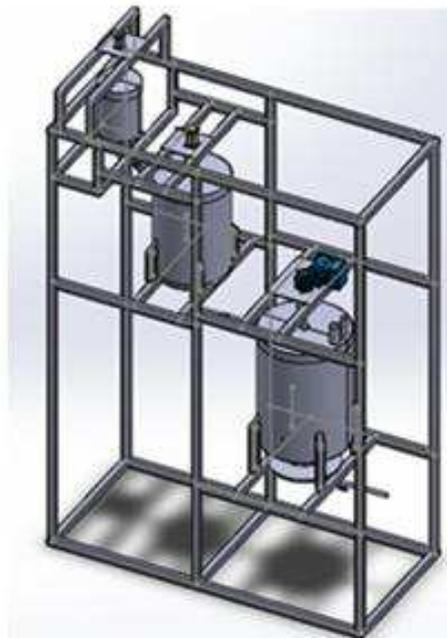


Figura 4.1. Diseño



Figura 4.2. Construcción de la máquina.

4.1.2 Simulación del fluido y comparación de la agitación real en el tanque de metóxido.

Para la realización de la simulación del fluido en el tanque de metóxido el programa SolidWorks requiere de algunos valores de los elementos que intervienen en la mezcla como:

Tabla 4.1. Elementos que intervienen en la mezcla.

ELEMENTOS	VALORES
Densidad del metanol	790 kg/m^3
Densidad hidróxido de sodio	2.1 g/cm^3 .
Volumen de llenado	5 L.
Velocidad de agitación	200 rpm.
Temperatura	20°C.
Fluidos a mezclarse	<i>Metanol e hidróxido de sodio</i>
Régimen de flujo	<i>Turbulento.</i>

Una vez establecidos los parámetros se procede a realizar la simulación obteniendo el siguiente resultado como se muestra la figura 4.3.

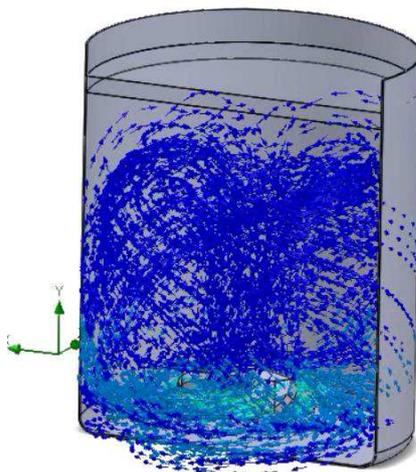


Figura 4.3. Simulación del fluido.

Como se puede observar en la figura 4.3, el fluido es agitado de manera radial y axial en dirección al eje del impulsor, desde el fondo del tanque hasta la parte superior observando de esta forma que existe mezcla entre el metanol e hidróxido de sodio.

Bajo estas condiciones de simulación se procedió a la construcción del tanque de metóxido obteniendo el siguiente resultado real como se muestra en la figura 4.4.



Figura 4.4. Mezcla tanque de metóxido.

Como se puede visualizar en la figura 4.4, el movimiento del fluido se asemeja al movimiento obtenido en la simulación anteriormente detallado, cabe recalcar que el tanque de metóxido no está a su máxima capacidad como se estableció en la simulación, pero tiende a seguir la misma trayectoria.

4.1.3 Simulación del fluido y comparación de la agitación real en el reactor.

Para la realización de la simulación del fluido en el reactor el programa SolidWorks requiere de algunos valores de los elementos que intervienen en la transesterificación como:

Tabla 4.2. Elementos que intervienen en la transesterificación.

ELEMENTOS	VALORES
Densidad aceite de higuera	0.961 kg/m³
Volumen de llenado	31 L
Velocidad de agitación	200 rpm
Temperatura	50°C
Fluidos a mezclarse	<i>Aceite de higuera y metóxido</i>
Régimen de flujo	<i>Laminar y turbulento</i>

Después de haber tomado en consideración los parámetros anteriormente detallados se obtuvo como resultado la siguiente simulación como se indica en la figura 4.5.

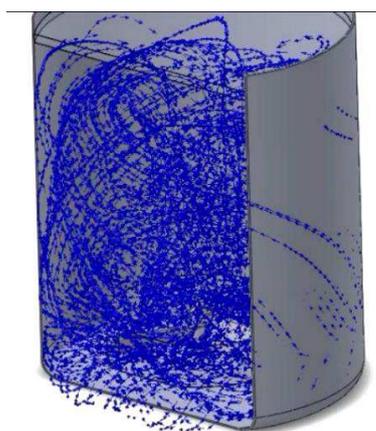


Figura 4.5. Simulación reactor.

Tomando en consideración la figura 4.5, se puede notar que la trayectoria del fluido inicia desde el fondo del tanque hacia las paredes y parte superior del mismo mostrando que existe mezcla.

Una vez conocido el comportamiento de los fluidos a mezclarse por medio de la simulación se procedió a llevarlo a la práctica obteniendo el siguiente

resultado, tomando en consideración que se realizó la prueba de funcionamiento con 18 litros de fluido como indica la figura 4.6.



Figura 4.6. Transesterificación reactor.

Haciendo referencia a la figura 4.6, se puede demostrar que el fluido toma la misma trayectoria descrita en el software con lo cual se garantiza que existe mezcla entre los fluidos en el proceso de transesterificación.

4.1.4 Simulación del fluido y comparación de la agitación real en el tanque de separación glicérica de lavado y secado.

En la simulación del tanque de separación glicérica se realizó una variante en lo referente a los impulsores, ya que este tanque es de forma cónica y tiene una altura mayor en referencia a los tanques anteriores, por lo cual se realizó la simulación con doble impulsor montados en un mismo eje como se ilustra en la figura 4.7.

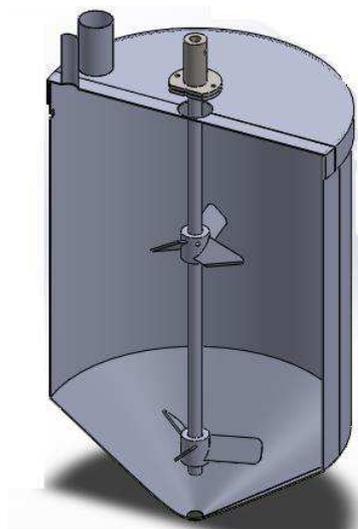


Figura 4.7. Tanque doble impulsor.

Para dar inicio a la simulación en el tanque cónico de separación glicérica de lavado y secado se procede a ingresar valores que requieren el software como se describe a continuación:

Tabla 4.3. Elementos que intervienen en el lavado del biodiésel.

ELEMENTOS	VALORES
Densidad del biodiésel	900kg/m³
Densidad del agua	1000kg/m³
Volumen de llenado	46,5 L
Velocidad de agitación	100 rpm
Temperatura	100°C
Régimen de flujo	Laminar y turbulento

Una vez realizada la simulación en el software SolidWorks se obtiene como derivación el movimiento que toman los fluidos como se muestra en la figura 4.8.

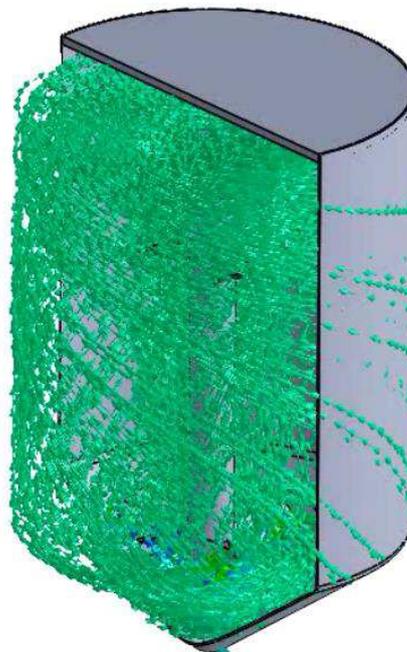


Figura 4.8. Simulación tanque cónico.

Analizando la figura 4.8, se puede mostrar que el fluido inicia su agitación desde la parte final del cono hacia la parte superior de forma espiral sin causar remolinos debido a su doble impulsor además se puede observar que el fluido no se derrama por la parte superior y existe mezcla.

Después de obtener la trayectoria que toma el fluido en el tanque cónico por medio de la simulación se realiza la construcción de dicho tanque, con las variantes preestablecidas en el diseño y se realiza la prueba de funcionamiento con un volumen total de 27 litros de fluido como se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.9. Lavado del biodiésel.

Como se ilustra en la figura 4.9, se comprueba que el fluido se comporta de manera similar al obtenido en la simulación teniendo como resultado real una agitación adecuada para el proceso de lavado, considerando que el volumen utilizado para esta prueba de funcionamiento fue de 27 litros.

4.2 Volumen obtenido de biodiésel.

Para la obtención de biodiésel se utilizó como materia prima los siguientes elementos y sus cantidades respectivas como indica la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Materia prima.

Materiales	Cantidad
Aceite de higuera	15 litros
Metanol	3 litros
Hidróxido de sodio(NaOH)	75 gr
Agua	45 litros

Una vez realizado el proceso de producción de biodiésel en sus diferentes etapas y bajo los parámetros establecidos en el capítulo III anteriormente detallado se obtuvieron los siguientes volúmenes de producción.

- Volumen total de biodiésel de 13 litros.



Figura 4.10. volumen de biodiésel.

- Volumen obtenido de glicerina 0.9 litros.



Figura 4.11. Volumen glicerina.

Es decir que del 100% de la materia prima que interviene en el proceso de metóxido y transesterificación se aprovecha un 72%.

CAPÍTULO V.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

- ✓ Mediante investigaciones previas se puede determinar las variantes que intervienen en el proceso de producción de biodiésel como, la velocidad de agitación se encuentra entre 100 rpm a 200 rpm, la temperatura entre 30 °C a 50 °C y tiempo de agitación de 20 minutos para el proceso de metóxido y para la transesterificación 3 horas
- ✓ Los sistemas de agitación de los diferentes tanques están equipados por un agitador de 3 palas inclinadas, los cuales generan flujos radiales y axiales que evitan que se formen sedimentos en el fondo del tanque logrando así obtener un mejor resultado en la mezcla.
- ✓ Para la construcción de los tanques que intervienen en los procesos de producción de biodiésel, así como la tubería e impulsores se seleccionó el acero inoxidable AISI 304 por su resistencia a la mezcla de metanol e hidróxido de sodio elementos químicos altamente corrosivos, que la lámina de acero inoxidable tiene un espesor de 1.5 mm, debido a esto la soldadura se puede realizar sin ningún problema.
- ✓ Con las cantidades establecidas de materia prima que intervienen en la producción de 13 litros de biodiésel se aprovecha un 72% del total y no existe mayor desperdicio en la materia prima utilizada para la producción de biodiésel.
- ✓ La higuerilla tiene independencia energética ya que la planta se desarrolla y crece en forma de maleza en tierras marginales sin comprometer campos destinados a la producción de alimentos.

5.2 Recomendaciones.

- ✓ Trabajar a una temperatura menor a 65°C en el proceso de transesterificación que se lleva a cabo en el reactor con el fin de evitar que el metanol se evapore.
- ✓ Determinar por medio de estudios el impacto que genere la variación de los parámetros en el proceso de producción de biodiésel en el funcionamiento tales como: Tiempo, velocidad de agitación, tiempo de reacción.
- ✓ En caso de reemplazo de la tubería se recomienda utilizar acero inoxidable AISI 304 debido a su alta resistencia a la corrosión.
- ✓ Efectuar un análisis minucioso para determinar el desempeño del biodiésel obtenido, siendo este aplicado en motores diésel.
- ✓ Mediante cálculos determinar una mayor potencia para el medio calefactor (resistencia) en el tanque de separación glicérica, lavado y secado para optimizar el tiempo de secado del biodiésel.
- ✓ Verificar que las llaves de paso se encuentren cerradas para evitar derramamiento de producto al momento de la producción de biodiésel.
- ✓ Trabajar en un lugar abierto o ventilado para evitar la acumulación de vapores en el proceso de secado ya que puede afectar la salud del operario.
- ✓ Implementar programas informáticos que faciliten el control automatizado de la máquina con la finalidad de mejorar la productividad y condiciones de trabajo del personal.

Bibliografía.

1. Aceites10. (2016). *Aceites 10*. Obtenido de <http://aceites10.com/ricino/>
2. Ahmad, K., & etal. (2013). *Practical Handbook on Biodiesel Production and Properties*. Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
3. Altair, H. (8 de Marzo de 2016). *Slide Share*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/hugoaltair/reactores-discontinuos>
4. Beyer, W. (1987). *Manual de Química Organica*. En W. Bayer. Barcelona: Reverté.
5. Böhler thyssen soldaduras. (2006). *UTP*. Obtenido de http://www.shimaweld.com/manuales/manual_utp_espanol.pdf
6. Castillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Chile: Universidad del Bío-Bío (tesis).
7. Cengel, Y., & Boles, M. (2008). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.
8. Coronel, J. (2014). *Diseño y construcción de un reactor tipo batch*. Quito: SEK (Tesis).
9. Cuevas, R. (01 de Septiembre de 2009). *Introducción a los reactores químicos*. Obtenido de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IntroReactores_10564.pdf
10. K., & James, T. (1990). *Introducción a la teoría de los reactores químicos*. México: Limusa.
11. Ecured. (Miércoles de Septiembre de 2017). *Ecured*. Obtenido de http://www.ecured.cu/Hodróxido_de_Sodio
12. Gieck, K., & Gieck, r. (2003). *Manual de fórmulas técnicas*. México: Alfaomega.
13. Gunt . (2017). *Equipos para la educación en ingeniería*. Obtenido de <http://www.gunt.de/es/productos/hidraulica-para-ingenieros-civiles/fundamentos-de-mecanica-de-fluidos/flujo-en-tuberias/friccion->

de-tubo-en-un-flujo-laminar-turbulento/070.15001/hm150-01/glct-1:pa-150:ca-176:pr-548

14. Hackenberg, N. (2011). *Biocombustibles de segunda generación*. Obtenido de <http://www.arbolesymedioambiente.es/bios-segunda-generacion.html>
15. Link Industrial. (2011). *Process Engeneering Equipment*. Obtenido de <http://www.linkindustrial.es/web/es/productos/agitadores-industriales/impulsores/helice-marina/>
16. Lombeida, N. (2015). *Diseño de un reactor tipo Batch para la obtención de biodiesel a partir de aceite de ricino*. Quito: EPN Tesis.
17. McCabe, W., & et al. (2007). *Operaciones unitarias ingeniería química*. España: Mc Graw Hill.
18. Medina, J. (09 de Marzo de 2016). *SlideShare*. Obtenido de <https://www.slideshare.net/AnaLaura68/tipos-de-reactores-59342442>
19. Megyesy, E. (1992). *Manual de recipientes a presión*. México: Lumisa.
20. Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación.
21. Mourad, & et al. (2014). Influence of biodiesel fuel on performance characteristics of hybrid electric vehicle according to urban driving cycle. *IEEE*, 1.
22. Muñoz, M. (2014). *Evaluación del comportamiento de estanques agitados para la homogenización de una planta clarificadora de agua. Compañía siderúrgica Huachipato*. Obtenido de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1668/1/Mu%C3%B1oz_Milton_Aloso.pdf
23. Navjyot. (2017). *NAVJYOT*. Obtenido de <http://navjyot.co.in/chemical-reactor.html>
24. Omaira, K. (21 de Agosto de 2015). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/omariakarla/diseo-de-reactores-51914916>
25. Organización mundial de la Salud. (2006). *Calidad del aire ambiente y salud*. Obtenido de www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/

26. Palomino, & et al. (2013). Criterios globales de escalamiento y costos preliminares para obtener biodiésel a partir de aceite de higuera en una planta piloto. *IEEE*, 20.
27. Panorama Agrario. (2015). *Agrario*. Obtenido de <http://www.panoramaagrario.com/2015/03/sonora-y-sinaloa-produciran-60-mil-has-de-higuera/>
28. Proaño, P. (Junio de 2010). *Investigación de la utilización del aceite de higuera, como combustible alternativo 5 -10 % en motores diesel con bomba de alta presión convencional*. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/2961/1/T-ESPEL-0712.pdf>
29. Proindecsa. (2012). *Fluirnot*. Obtenido de <http://www.fluinort.cl/2013/wp-content/uploads/2015/04/TABLA-QUIMICA-GOMAS-Y-METALES.pdf>
30. Químicos, C. d. (2016). *Aceite de ricino*. Quito.
31. Sánchez, I., & Huertas, K. (2012). *Repositorio UTP*. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/3048/1/6626S211.pdf>
32. Senplades. (2013). Obtenido de <http://www.buenvivir.gob.ec/herramientas>
33. SolidWorks. (2017). Inercia Paleta. Ibarra, Imbabura.
34. Textos científicos. (18 de Agosto de 2005). *Textos científicos*. Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/quimica/metanol>
35. Toledo, M. (2001). Manual de Sistemas de Módulos de Peso. En M. Toledo, *Cuadro de resistencia química* (pág. 7).
36. Torres, S., & Nelson, V. (Octubre de 2010). Diseño, construcción e instalación de un tanque marmita de 2800 Lt y rediseño de la lavadora de botellas N°1 de la empresa Licoram . Latacunga, Ambato, Ecuador.
37. Vega, O. (2010). *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*. Obtenido de <http://repiica.iica.int/docs/B1884e/B1884e.pdf>

ANEXO 1



REFERENCIA:	Aceite de Ricino USP		
TIEMPO DE VIDA UTIL :	Dos años (bajo condiciones optimas de almacenamiento) ✓		
LOTE:	OPM-ARUSP-0615299		
FECHA DE ELABORACION	Octubre del 2016		

CERTIFICADO DE ANALISIS			
ENSAYO	RESULTADOS	METODO	
COLOR (LOVIBOND 5 1/4)	Y=9/R=0,9	Cc 13b-45	AOCS
ÁCIDOS GRASOS LIBRES (OLEICO)	1.19%	Ca 5a-40	AOCS
HUMEDAD & VOLÁTILES	0.20%	Ca 2c-25	AOCS
PESO ESPECIFICO A 25 °C	0.961	Cc 10a-25	AOCS
ÍNDICE DE YODO (WIJS)	85 cg/g	Cd 1 - 25	AOCS
ÍNDICE DE HIDROXILO	164	Cd 13 - 60	AOCS
ÍNDICE DE REFRACCIÓN 25 °C	1.477	Cc 7 - 25	AOCS
ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN	178 mg KOH/g	Cd 3 - 25	AOCS
IMPUREZAS INSOLUBLES	0,01 % MAX	Ca 3 - 46	AOCS
ASPECTO	CLARO Y BRILLANTE		
OLOR	CARACTERÍSTICO A RICINO		

 ING. VICTOR ALVAREZ JEFE DE CONTROL DE CALIDAD	 ING. ROBIN ALAVA A. JEFE DE PLANTA
---	---

Figura 1. Resultados aceite de higuierilla.

Fuente: (Químicos, 2016)

ANEXO 2

**Scharlab S.L.**

Tel. int.: +34-93-7151811

Email: scharlab@scharlab.com

CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product:	Methanol, ACS BASIC	Batch	16509624
ME0336		Quality release date	30/09/2015
		Expiry date	9/2020
Analysis	Batch value	Specifications	
assay (G.C.)	99,99 %	min. 99,8 %	
colour (Hazen)	2	max. 10	
solubility in water.....	passes test	passes test	
acidity.....	0,0002 meq/g	max. 0,0003 meq/g	
alkalinity.....	< 0,0002 meq/g	max. 0,0002 meq/g	
acetaldehyde (CH ₃ CHO)	< 0,001 %	max. 0,001 %	
acetone (G.C.).....	< 0,001 %	max. 0,001 %	
formaldehyde.....	< 0,001 %	max. 0,001 %	
substances darkened by H ₂ SO ₄	passes test	passes test	
residue on evaporation	0,0002 %	max. 0,001 %	
substances reducing KMnO ₄	passes test	passes test	
water (K.F.)	0,0089 %	max. 0,1 %	

Figura 2. Resultados aceite de higuera.

Fuente: (Químicos, 2016)

ANEXO 3

2.6.2 Propiedades del biodiésel

Según la norma (NTE INEN 2482, 2009) para biodiésel B100 en el Ecuador este biocombustible debe cumplir con los siguientes requisitos:

Tabla 7. Requisitos para biodiésel mezcla B100 en Ecuador

REQUISITOS	Unidad	Mínimo	Máximo	Métodos de Ensayo
Densidad a 15°C	Kg/m ³	860	900	ASTM D 1298
Punto de Inflamación	°C	120	--	ASTM D 93
Punto de Turbidez (1)	°C	Reportar	Reportar	Reportar
Agua y Sedimentos	%	---	0,05	ASTM D 1796
Contenido de Agua	Mg/kg	---	500	ASTM D 95
Viscosidad cinemática a 40°C	Mm ² /s	3,5	5	ASTM D 445
Cenizas Sulfatadas	%(m/m)	---	0,02	ASTM D 875
Contenido de Azufre	Mg/kg	---	10	ASTM D 1552
Carbón Residual (2)	%	---	0,05	ASTM D 4530
Corrosión lámina de cobre	Clasificación	---	3	ASTM D 130
Número de cetano	-	49	---	ASTM D 613
Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	ASTM D 1160
Glicerina libre	%	---	0,02	ASTM D 6584
Glicerina total	%	---	0,25	ASTM D 6584
Contenido de ésteres	%	96,5	---	EN 14103
Índice de yodo	g yodo/100g	---	120	EN 14111
Contenido de metanol	%	---	0,020	ASTM D 4815 EN 14110
Contenido de Fósforo	Mg/kg	---	10	ASTM D 4951
Contenido de metales alcalinos (Na+k)	Mg/kg	---	5	EN 14108
Contenido de metales alcalinos (Ca+Mg)	Mg/kg	---	5	prEN 14538
Número de acidez	Mg KOH/g	---	0,5	ASTM D 664

Figura 3. Propiedades biodiésel
Fuente: (Senplades, 2013)

RESISTENCIA QUIMICA DE LOS METALES														
Precaución: No utilice la tabla sin leer las notas de pie de página y el texto.						Clasificación por resistencia: A = Bueno; F = Regular; C = Precaución, depende de las condiciones; X = No se recomienda.								
Sustancia	Hierro y acero	Latón rojo	Bronce comercial	Plomo	Cobre	Aluminio	Níquel	Inconel	Metal Monel	Ac. Inox. Tipo 304	Ac. Inox. Tipo 316	Ac. Inox. Tipo 347	Ac. Inox. Carpenter "20"	Hastelloy "B" o "C"
Peróxido de hidrógeno	C	C	F	C	C	C	C	C	C	A	A	C	A	A
Sulfuro de hidrógeno, seco (20)	X	X	-	-	X	A	C	C	C	A	A	A	A	A
Húmedo	C	X	X	-	X	A	C	C	C	A	A	A	A	A
Lacas (solventes)	C	C	C	A	C	A	A	C	C	A	A	A	A	A
Acido láctico	X	A	A	-	A	F	A	C	C	A	A	A	A	A
Aceites lubricantes, refinados	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cloruro de magnesio	F	F	F	X	F	F	A ₂₁	A ₂₁	A ₂₁	C	C	A	A	A ₂₁
Hidróxido de magnesio	A	C	C	-	X	X	A	A	A	A	A	A	A	A
Sulfato de magnesio	C	A	-	-	A	C	A	A	A	A	A	-	A	-
Mercurio	A	X	X	-	X	X	A	-	A	A	A	-	-	-
Gas natural	A	C	C	A	C	X	A	A	A	A	A	A	A	A
Acido nítrico, crudo	X	X	X	X	X	A ₂₁	X	C	X	A	A	A	A	C
diluido	X	X	X	X	X	A ₂₁	X	C	X	A	A	A	A	C ₂₁
concentrado	X	X	X	X	X	A ₂₁	X	X	X	A	A	A	A	-
Acido oleico	C	A	A	X	C ₂₁	C ₂₁	A	A	A	A	A	A	A	A ₂₁
Acido oxálico	C	A	A	X	C	C	F	A	A	A	A	A	A	A
Acido palmítico	C	C	C	A	C ₂₁	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Aceites de petróleo, < 500°F - crudo	A	C	C	C	C	A	C	C	C	A	F	A	A	A
Acido fosfórico	C	C	C ₂₁	C	C ₂₁	X	C	C	C	C	F	A	A ₂₁	A
Hidróxido de potasio	C	X	X	X	X	X	A	A	A	A	C	-	-	A
Sulfato de potasio	C	A	-	A	A	A	A	A	A	A	F	-	-	A ₁₄
Propano	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Gas de cloacas	C	X	A	A	C	A	A	A	A	A	A	-	-	-
Ceniza de sosa (carbonato de sodio)	A	F	F	A	C	C	A	A	A	A	A	-	-	A
Bisulfato de sodio	X	F	F	A	F	C	-	-	-	A	A	A	A	A
Cloruro de sodio	F	F	F	A	C	X	A ₂₁	A ₂₁	A ₂₁	C	C	-	A	A
Cianuro de sodio	A	X	X	X	X	C	C	-	C	C	-	-	A	-
Hidróxido de sodio	A	C	F	F	C	X	A	A	A	A	A	A	A	A
Hipoclorito de sodio	X	C	F	X	C	X	C	C	C	C	C	C	F	A

Las notas continúan en la página siguiente

1. En ausencia de oxígeno.
2. 125° máximo.
3. Todos los porcentajes; 70°.
4. Hasta ebullición.
5. 5% temperatura ambiente.
6. Hasta 122°.
7. El hierro y el acero pueden oxidarse considerablemente en presencia de agua y aire.
8. Las aleaciones de alto contenido de cobre están prohibidas por las normas; latón amarillo aceptable.
9. Se recomienda Hastelloy "C" hasta 105°.

10. Cuando no es importante el color. No usar con ácido c.p.
11. Temperatura ambiente hasta 212°. La humedad inhibe el ataque.
12. Gas; 70°.
13. Hasta 500°.
14. Hastelloy "C" a temperatura ambiente.
15. De temperatura ambiente hasta 158°.
16. A temperatura ambiente.
17. Cuando no es objetable la decoloración.
18. 5% máximo; 150° máximo.
19. Satisfactorio para vapores hasta 212°.

Figura 4. Resistencia de los metales.
Fuente: (Megyesy, 1992)

ANEXO 5

8 PRODUCTO QUIMICO	Plásticos										Elastómeros							Metales						No Metales														
	ABS, plásico	Acetal (Dielin*)	CPVC	Epoxy	Hytrel	LDPE	Noryl*	Nylon	Policarbonato	Polipropileno	PPS (Ryton*)	PTFE (Teflon*)	PVC	PVDF (Kynar*)	Buna N (Nitrilo)	EPDM	Hyalón*	Kel F*	Goma natural	Neopreno	Silicona	Tylen*	Vitón*	Ac. inox. 304	Ac. inox. 316	Aluminio	Latón	Bronce	Coperfer 20	Fundición hierro	Cobre	Hastelloy C*	Titanio	Carbón, grafito	Cerámica Al2O3	Cerámica, magnet.		
Lejías:CA(OH)2 Calco, hidróxido	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Licores blancos (molino de pasta)					2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ligroína																																						
Linoleico, ácido																																						
Litio, cloruro																																						
Litio, hidróxido																																						
Lubricantes																																						
Magnesio, Bisulfato																																						
Magnesio, Carbonato																																						
Magnesio, Cloruro																																						
Magnesio, Hidróxido																																						
Magnesio, Nitrato																																						
Magnesio, Óxido																																						
Magnesio, Sulfato (sales de Epsom)																																						
Maleico, Acido																																						
Maleico, Anhídrido																																						
Maleico, Acido																																						
Malta (mojada)																																						
Manganeso, Sulfato																																						
Mantequilla (suero)																																						
Mayonesa																																						
Melamina																																						
Melazas																																						
Mercurio																																						
Mercurio, Cianuro																																						
Mercurio, Cloruro (diluido)																																						
Mercurio, Nitrato																																						
Metano																																						
Metanol, Metil, alcohol)																																						
Metil, Acetato																																						
Metil, Acetona																																						
Metil, Acrilato																																						
Metil, Alcohol 10%																																						
Metil, Bromuro																																						
Metil, Butil Ketona																																						
Metil (Cellosolve)																																						
Metil, Cloruro																																						
Metil, Diclورو																																						
Metil Etil Ketona																																						
Metil Etil Ketona, Peróxido																																						
Metil Isobutil Ketona																																						
Metil Isopropil Ketona																																						
Metil Metacrilato																																						
Metilamina																																						
Metileno, Cloruro																																						
Miel																																						
Minerales, Licores																																						
Monocloroacético, Acido																																						
Monoetanolamina																																						
Morfina																																						
Motor, aceite																																						
Nafta																																						
Naftalina																																						
Natural, Gas																																						
Niquel, Cloruro																																						
Niquel, Nitrato																																						
Niquel, Sulfato																																						
Nitratador, Acido <1% acido																																						
Nitratador, Acido <15% SO4H2																																						
Nitratador, Acido >15% SO4H2																																						
Nitratador, Acido <15% HNO3																																						
Nitrico, Acido 5-10%																																						
Nitrico, Acido 20%																																						
Nitrico, Acido 50%																																						

Figura 5. Tabla de productos químicos.
Fuente: (Proindeca, 2012)

ANEXO 6

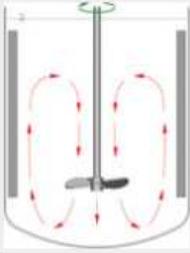
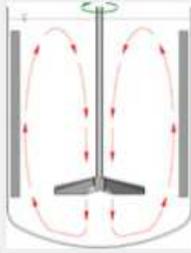
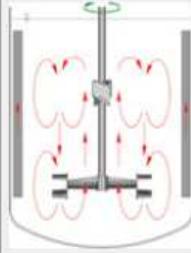
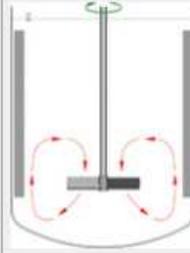
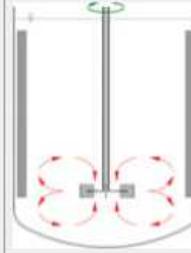
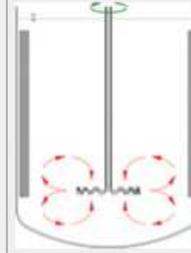
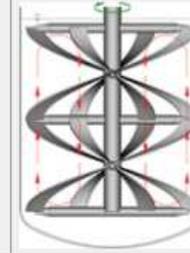
Denominación	Hélice	Hidrofoil	Versafoil	Turbina axial	Turbina radial	Cowles	Ancora	Cinta Helicoidal	
Proporciones geométricas standard									
Situación	centrada descentrada sin baffles lateral	centrada descentrada sin baffles lateral	centrada con baffles	centrada con baffles	centrada con baffles	centrada descentrada sin baffles	centrada sin baffles	centrada sin baffles	
Flujo primario	axial	axial	axial	axial y radial	radial	radial	tangencial	axial	
Rango de utilización	d/D	0'1 - 0'5	0'2 - 0'7	0'5 - 0'98	0'2 - 0'6	0'2 - 0'4	0'1 - 0'5	0'9 - 0'98	0'9 - 0'98
	Vel Tang	3 - 15	2 - 10	1 - 12	2 - 6	4 - 10	5 - 20	1 - 5	$u < 2$
	Re	$Re > 10^2$	$Re > 10^2$	$Re > 20$	$Re > 10^2$ ^a	$Re > 10^2$	$Re > 10^3$ turbulento	$Re > 10^2$	$Re > 10^2$ laminar
	Viscosidad	$\eta < 20$	$\eta < 50$	$\eta < 100$	$\eta < 20$	$\eta < 20$	$\eta < 20$	$\eta < 20$	$\eta < 50$
Comentarios	Tanques pequeños Baja agitación en tanques grandes Baja viscosidad	Buen rendimiento Permite bajos consumos y accionamientos más económicos	Muy versátil Apta para altas y bajas viscosidades Agitación uniforme en todo el tanque	Construcción económica Facilmente adaptable a tanques muy grandes	Indicada casi exclusivamente para dispersión de gases y transferencia térmica	Alta cizalladura Potencia muy sensible a la viscosidad Especial para emulsiones, pinturas, etc.	Para agitación cerca de paredes A menudo con rascadores Para transferencia térmica	Ideal para viscosidades muy altas Poco apta para baja viscosidad	

Figura 6. Denominaciones paletas.

Fuente: (Proindeca, 2012)

ANEXO 7

Tabla de viscosidad dinámica (a la presión de 1 bar)

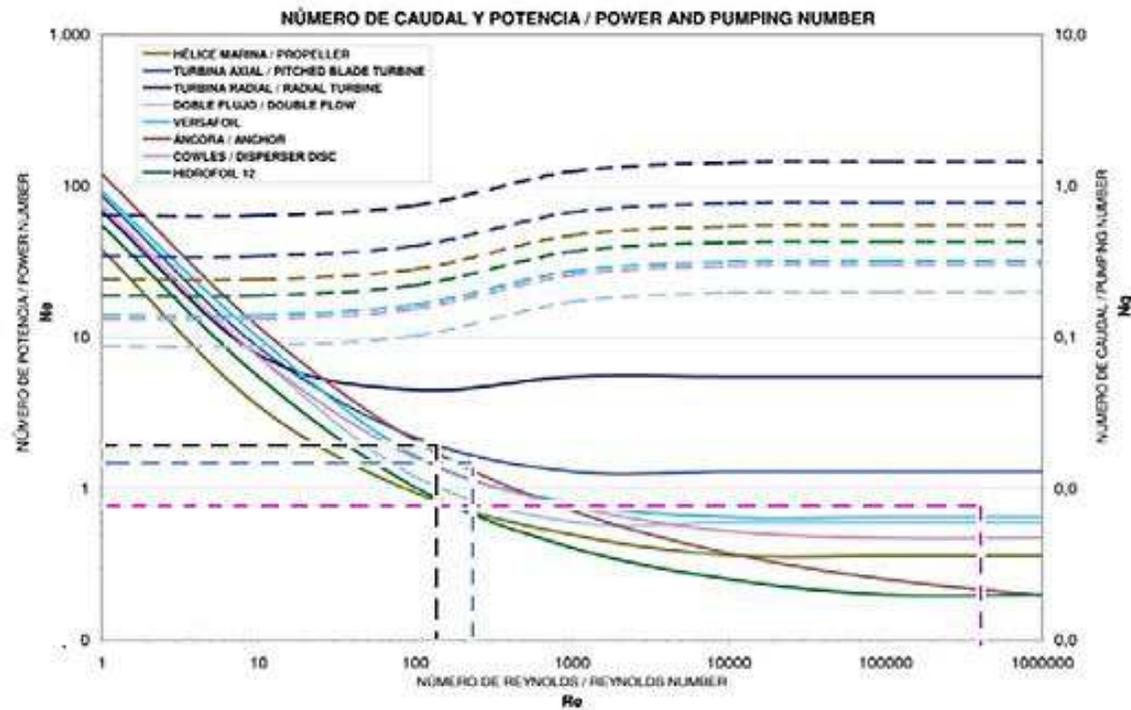
Substancia	T °C	μ Pa·s
Aceite de castor	25	0,985
Aceite de oliva	25	0,081
Acetona	25	$3,06 \times 10^{-4}$
Ácido sulfúrico	25	0,0242
Agua	20	$1,003 \times 10^{-3}$
Agua	25	$8,91 \times 10^{-4}$
Aire	0	$17,4 \times 10^{-6}$
Argón	27	$22,9 \times 10^{-6}$
Benceno	25	$6,04 \times 10^{-4}$
Brea / pez / piche	25	$2,3 \times 10^8$
Crema de cacahuete /maní	25	250 000
Etanol (alcohol etílico)	25	$1,074 \times 10^{-3}$
Etilenglicol	25	0,0161
Glicerina (glicerol)	25	1,5
Helio	27	$19,9 \times 10^{-6}$
Hidrógeno	0	$8,4 \times 10^{-6}$
Jarabe de maíz	25	1,3806
Ketchup	25	50 000 - 100 000
Melaza	25	5000 - 10 000
Mercurio	25	$1,526 \times 10^{-3}$
Metano	27	$11,2 \times 10^{-6}$
Metanol	25	$5,44 \times 10^{-4}$
Miel	25	2000 - 10 000
Nitrobenceno	25	$1,863 \times 10^{-3}$
Nitrógeno	27	18×10^{-6}
Nitrógeno líquido	-196	$1,58 \times 10^{-4}$
Propanol	25	$1,945 \times 10^{-3}$
Sangre humana	37	3×10^{-3} - 4×10^{-3}
Sirope de chocolate	25	10 000 - 25 000
Xenon	0	$21,2 \times 10^{-6}$

Figura 7. Tabla de viscosidad dinámica.
Fuente: (Textos científicos, 2005)

ANEXO 8

CAUDAL VEHICULADO / PUMPING CAPACITY		
$Q = N_q \cdot n \cdot d^3 \quad (1)$		
POTENCIA ABSORBIDA / ABSORBED POWER		
$P = Ne \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5 \quad (2)$		
Simbolos / Symbols		Unidades / Units
D	diámetro tanque / tank diameter	m
d	diámetro impulsor / impeller diameter	m
n	velocidad agitador / Agitator speed	s ⁻¹
Ne	número de potencia / Power number	-
Nq	número de caudal / Pumping number	-
P	potencia absorbida / Absorbed power	W
Q	caudal vehiculado / Pumping capacity	m ³ s ⁻¹
Re	número de Reynolds / Reynolds number	-
η	Viscosidad / Viscosity	Pa.s
ρ	densidad / Density	kg. m ⁻³

NÚMERO DE CAUDAL Y POTENCIA / POWER AND PUMPING NUMBER



Turbulento ← Turb. 1 → **Np = 0.9**
109.09 ← Turb. 2 → **Np = 2.8**
207.74 ← Turb. 3 → **Np = 2**

Laminar = Re < 10
Transitorio = 300 < Re < 10000
Turbulento = Re > 10000

Figura 8. Número de caudal y potencia.
Fuente: (Proindecsa, 2012)