

Universidad Internacional del Ecuador

Facultad de Ingeniería Automotriz

**Tesis de grado para la obtención del título de ingeniero en mecánica
automotriz**

**“Diseño y construcción de un reactor para la elaboración de biodiesel y
obtención de glicerina”**

Autores

Fabián Mauricio Abad Izquierdo

Santiago Francisco Ortiz Viteri

Director: Ing. Miguel Granja

Quito, Mayo 2014

CERTIFICACIÓN

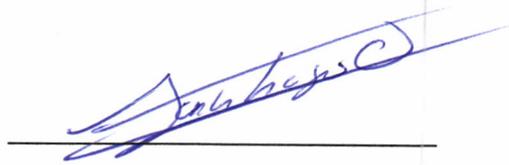
Nosotros, Fabián Mauricio Abad Izquierdo y Santiago Francisco Ortiz Viteri, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.



Abad Izquierdo Fabián Mauricio

1715848675



Ortiz Viteri Santiago Francisco

1718366022

Yo, Ing. Miguel Granja, certifico que conozco a los autores del presente trabajo siendo ellos responsables exclusivos tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



Ing. Miguel Granja

Director

AGRADECIMIENTO

Agradezco por la elaboración de este proyecto a todas las personas que han estado a mi lado en estos 5 largos años de estudios.

Principalmente a mis padres por darme la oportunidad de poder estudiar y tener un título universitario, a mi familia que siempre me dio fuerzas para seguir adelante y no desistir en medio camino, a mi esposa e hijos por los que me esfuerzo cada día más para ser mejor.

También agradezco a mi director de tesis Ingeniero Miguel Granja que fue un pilar fundamental para la culminación de mi carrera y a todos los profesores que me ayudaron a ampliar mis conocimientos en todos los aspectos de la vida no solo académicamente, y a mis amigos con los cuales vivimos momentos hermosos en las aulas y fuera de ellas, gracias a todos por hacer de mi vida estudiantil un momento inolvidable y lleno de felicidad y aprendizaje. GRACIAS.

Mauricio Abad

AGRADECIMIENTO

A mi familia, por estar a mi lado siempre.

A mis amigos, Mauricio, David y Oscar, gracias por los buenos y malos momentos, por aguantarme y por escucharme.

A la Universidad Internacional del Ecuador por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mis profesores por compartir sus enseñanzas y experiencia.

Al Ingeniero Flavio Arroyo, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha contribuido para que podamos terminar este trabajo con éxito.

A nuestro director de tesis Miguel Granja por su apoyo y ayuda en todo momento.

Santiago Ortíz

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado de manera muy especial a mis padres que han sido las personas más maravillosas en mi vida, me han dado todo el amor necesario como para poder triunfar en la vida.

A mi esposa que es la mujer que me da el apoyo y las fuerzas para seguir adelante con mis proyectos de vida, ella es mi fuerza para poder hacer mis sueños realidad. TE AMO.

A mis hijos Julián y Rafaela que son mi inspiración para hacer todo lo que hago en la vida, todo es para ellos y por ellos, es la luz de mis ojos la que nunca se apagará, LES AMO MIS PRECIOSOS.

A mi familia por toda la ayuda y el tiempo dedicado para poder culminar esta etapa muy importante de mi vida, es para ustedes hermanas queridas, sobrinos, cuñados y suegros.

Esta meta alcanzada en mi vida no sólo es mía se la dedico a todos ustedes que son los seres que más quiero.

Mauricio Abad

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mi madre

Por brindarme los recursos necesarios, por sus consejos, por la motivación constante, pero más que nada, por su amor.

A mi padre

Por hacer de mí una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor.

A mi hermano

Gracias por tu cariño, confianza y apoyo.

A mis familiares.

A mis abuelos, tías, tíos, primos y a mi amada sobrina. Les amo

Santiago Ortíz

Diseño y construcción de un reactor para la elaboración de biodiesel y obtención de glicerina

En la actualidad se ha generado la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles, ha creado en la comunidad científica un interés por una constante búsqueda de nuevas alternativas para producir energía y uno de estos campos es el de la generación de energía a través de los motores Diesel.

Entre las opciones con mayor acogida es el aprovechamiento de los desechos agrícolas para producir biocombustibles. De aquí parte la decisión de comenzar a generar biodiesel a partir de aceites vegetales, uno de los motivos por los cuales dimos inicio a la elaboración de este proyecto de tesis.

Este proyecto tiene como objetivo buscar un sustituto a los combustibles convencionales que generan una gran cantidad de contaminantes para el medio ambiente.

Al realizar este estudio lo que queremos llegar es a comprobar si es viable el introducir este producto al mercado ecuatoriano apoyándonos a la campaña ecologista que engloba al mundo en la actualidad y al bajo precio al que se podría vender al público, también se quiere demostrar si existe la compatibilidad con los vehículos que circulan en el mercado. Todo este análisis lo haremos al poner en marcha el diseño y funcionamiento del reactor para la producción de biodiesel, el que se obtendrá del aceite de palma africana, que tiene un alto índice de producción en el país.

El proceso para la obtención del biodiesel comienza con mezclando el alcohol metílico y el hidróxido en un envase fuera del reactor. Esperamos que la mezcla se disuelva en un tiempo mínimo de 15 minutos. Luego se transfiere el aceite al reactor. Activamos el circuito de trabajo del reactor y esperamos que el aceite llegue a 50 °C con agitación constante. Después vertimos el metóxido que anteriormente lo dejamos reaccionar. Dejamos la mezcla en agitación hasta que la termocupa cense los 65 Grados Celsius y automáticamente el reactor dejara de trabajar y dejamos reposar la mezcla hasta el día siguiente (mínimo 8 horas).

Luego de esto se habrán separado los productos: el biodiesel y la glicerina.

Design and construction of a reactor for the production of biodiesel and obtaining glicerina

At present there has been generated the need to reduce the emission of pollutant gases of greenhouse effect and the dependence of the fossil fuels, has created in the scientific community an interest for a constant search of new alternatives to produce energy and one of these fields is that of the generation of energy across the diesel engines.

Between the options with major reception it is the utilization of the agricultural waste to produce biocombustibles. Of here it divides the decision to begin to generate biodiesel from vegetable oils, one of the motives for which we gave beginning to the production of this project of thesis.

This project a substitute has as aim search to the conventional fuels that generate a great quantity of pollutants for the environment.

When this study realizes what we want to come it is to verifying if it is viable to introduce this product to the Ecuadoran market resting to the environmental campaign that it includes to the world at present and to the low price to the one that might sell at the public, also it wants to be demonstrated if the compatibility exists with the vehicles that circulate on the market. All this analysis we will do it on having started the design and functioning of the reactor for the production of biodiesel, which will be obtained of the oil of African palm, which has a high index of production in the country.

The process for the obtaining of the biodiesel begins with mixing the methylic alcohol and the hydroxide in a packing out of the reactor. We hope that the mixture dissolves in a minimal time of 15 minutes. Then the oil is transferred to the reactor. We activate the circuit of work of the reactor and hope that the oil comes to 50 °C with constant agitation. Later we spilt the metóxido that previously we leave it to react. We leave the mixture in agitation until the termocupla registers 65 Degrees Celsius and automatically the reactor was stopping working and we leave the mixture rests until the following day (minimum 8 hours).

After this the products will have separated: the biodiesel and the glycerin.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Certificación.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Dedicatoria	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Índice de contenidos.....	xi
Índice de figuras	xvii
Índice de tablas	xix
CAPÍTULO I.....	1
Introducción	1
CAPÍTULO II.....	7
Marco teórico.....	7
2.1 Magnitudes eléctricas.....	7
2.1.1 Intensidad	7
2.1.2 Resistencia	8
2.1.3 Voltaje.....	9

2.2	Ley de OHM	10
2.3	Potencia	11
2.4	Componentes eléctricos	12
2.4.1	Resistencias eléctricas tubulares	12
2.4.2	Potenciómetros	12
2.4.3	Termocupla	13
2.4.4	Luz Piloto led:	14
2.4.5	Control paro y marcha (on/off)	14
2.4.6	Braker trifásico	15
2.4.7	Motor eléctrico	15
2.4.8	Contactador trifásico	16
2.5	Presión	17
2.5.1	Definición	17
2.5.2	Densidad de fuerza	18
2.5.3	Presión absoluta y relativa	18
2.6	Unidades de medida y presión y sus factores de conversión.....	19
2.7	Funcionamiento del motor diésel.....	20

2.7.1	Antecedentes	20
2.8	Funcionamiento.....	21
CAPÍTULO III.....		23
Biodiesel.....		23
3.1.	Antecedentes	23
3.2.	Definición y especificaciones del biodiesel	23
3.3.	Compatibilidad del biodiesel con los elementos.....	26
3.4.	Materias primas para la producción del biodiesel	28
3.4.1.	Aceites vegetales convencionales.....	28
3.4.2.	Aceites de fritura usados	29
3.4.3.	Grasas animales.....	29
3.5.	Reacciones en la producción del biodiesel	32
3.6.	Procesos en la producción del biodiesel	36
3.6.1.	Proceso discontinuo	37
3.7.	Aplicaciones	39
3.7.1.	Biocombustibles obtenidos a partir del biodiesel.....	40
3.7.2.	Aplicaciones de la glicerina y su problemática	40

CAPÍTULO IV	42
Diseño y construcción del reactor.....	42
4.1 Cálculos para el diseño del reactor.....	42
4.1.1. Cálculo del volumen de la cámara de ebullición.....	42
4.1.2. Cálculo de la altura de la cámara de ebullición	43
4.1.3. Cálculo del volumen de la cámara de calefacción.....	43
4.1.4. Cálculo del volumen real de la cámara de calefacción.....	44
4.2. Cálculos para el sistema de agitación.....	44
4.2.3. Cálculo de la potencia para accionar el rodete.....	47
4.3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor.....	48
4.4. Cálculo de la media logarítmica de temperatura.....	51
4.5. Cálculo del flujo de calor	52
4.6. Cálculo del área de transferencia de calor.....	52
4.7. Balance de masa y energía	52
4.7.1. Balance de masa.....	53
4.7.2. Balance de energía	54
4.8. Resultados	56

4.8.1. Caracterización de las materias primas.....	56
4.8.2. Caracterización del biodiesel.....	56
4.8.3. Caracterización de la glicerina.....	57
4.8.4. Determinación de la temperatura de trabajo.....	57
4.8.5. Determinación de la concentración del catalizador	58
4.8.6. Cantidad de productos por litro de aceite de palma	59
4.8.7. Cantidad de agua de lavado.....	59
4.8.8. Cantidad de vapor requerida	59
4.8.9. Características biodiesel	59
4.9 Diseño.....	60
4.9.1 Consideraciones de diseño	60
4.9.2 Detalles de los componentes.....	63
Cálculo del volumen	68
4.10 Pruebas de funcionamiento	78
4.11 Uso del biodiesel obtenido, en un motor diesel.....	81
4.11.1 Eficiencia del biodiesel en un motor diesel.....	81
4.12 Cálculos del reactor de biodiesel	82

4.12.1 Cálculos.....	83
4.13 Cálculo estructural	92
4.13.1 Cálculo del soporte del motorreductor.....	92
4.13.2 Cálculo de la estructura base	97
CAPÍTULO V	98
Conclusiones y recomendaciones	98
5.1 Conclusiones.....	98
5.2 Recomendaciones	98
ANEXOS.....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema eléctrico básico.....	7
Figura 2.2: Medición de intensidad.....	8
Figura3.3: Medición de resistencia.....	9
Figura 2.4: Ley de ohm.....	10
Figura 2.5: Resistencias tubulares.....	12
Figura 2.6: Potenciómetros.....	13
Figura 2.7: Termocupla.....	13
Figura 2.8: Luz piloto led.....	14
Figura 2.9: Control paro y marcha.....	14
Figura 2.10: Braker trifásico.....	15
Figura 2.11: Motor eléctrico.....	16
Figura 2.12: Contactor trifásico.....	16
Figura 2.13: Motor diésel.....	21
Figura 2.14: Funcionamiento motor diésel.....	22
Figura 3.1: Reacción de transesterificación.....	32
Figura 3.2: Reacciones en la transesterificación.....	33
Figura 3.3: Reacción de saponificación.....	35
Figura 3.4: Obtención de jabón.....	36
Figura 3.5: Proceso discontinuo.....	38
Figura 4.1: Diseño general del prototipo.....	61

Figura 4.2: Reactor.....	63
Figura 4.3: Dimensiones del reactor.....	64
Figura 4.4: Recipiente de aceite.....	65
Figura 4.5: Dimensiones del recipiente de aceite.....	66
Figura 4.6: Recipiente contenedor de metóxido.....	66
Figura 4.7: Dimensiones del recipiente contenedor de metóxido.....	67
Figura 4.8: Impulsor del motor agitador.....	68
Figura 4.9: Válvula solenoide.....	70
Figura 4.10: Ángulo estructural	76
Figura 4.11: Armadura de soporte.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tabla de unidades de presión.....	20
Tabla 3.1: Propiedades del biodiesel.....	26
Tabla 3.2: Producción de aceite de palma en el mundo.....	30
Tabla 3.3: Producción de biodiesel en el Ecuador.....	31
Tabla 3.4: Propiedades de los esteres metílicos derivados de aceites.....	39
Tabla 4.1: Análisis físico y químico de las materias primas.....	55
Tabla 4.2: Análisis físico y químico del biodiesel.....	55
Tabla 4.3: Análisis físico y químico de la glicerina.....	56
Tabla 4.4: Determinación de la temperatura de trabajo.....	56
Tabla 4.5: Determinación de la concentración del catalizador.....	57
Tabla 4.6: Cantidad de productos por litro de aceite de palma.....	58
Tabla 4.7: Cantidad de agua de lavado.....	58
Tabla 4.8: Cantidad de vapor requerida.....	58
Tabla 4.9: Características biodiesel.....	58
Tabla 4.10: Pruebas de funcionamiento del prototipo.....	79
Tabla 4.11: Compatibilidad de algunos materiales con las sustancias que intervienen en la producción de biodiesel.....	81

CAPÍTULO I

Introducción

Dentro del ámbito Mundial, el tema del calentamiento global y la búsqueda de combustibles alternos, ha generado un sin número de investigaciones a la producción de Biocombustibles.

Dichos biocombustibles buscan suplantar el consumo de carburantes fósiles, debido a su bajo impacto ambiental. Entre estos ha aparecido el Biodiesel que se utiliza como aditivos en motores de combustión interna en forma de mezcla (B20, B50) o directo B100, han presentado características óptimas.

El presente trabajo busca diseñar y construir un reactor para la elaboración de biodiesel y obtención de glicerina como una alternativa a los combustibles tradicionales utilizados dentro de la sociedad.

Se ha usado como materia prima aceite de cocina usado debido a su bajo costo y fácil reciclaje.

El objetivo principal de este capítulo es fundamentar teóricamente, y de esta manera poder explicar, y hacer un recuento breve a los lectores, de algunos conceptos y funcionamientos básicos que están ligados directamente con el proyecto y su producto final (Biodiesel), por ejemplo la explicación de los elementos eléctricos y mecánicos de los cuales vamos a hacer uso durante la elaboración de la presente tesis y en donde los vamos a utilizar.

Con esto evitaremos dificultades al momento de entender la fabricación de ciertas partes de la maqueta de tesis y también conseguiremos generar un recuento fundamental de dichos conceptos, partes, piezas y funcionamientos en los lectores.

A partir de la revolución industrial en 1790, surge la implementación y desarrollo energético acompañado de la constante lucha por el equilibrio entre la alta productividad, la nueva modernización y el ambiente. De aquí que las principales naciones en especial las más preocupadas por dicho repunte de la tecnología y con esto de la industrialización de sus tierras y operaciones, promueven charlas y convenciones en las cuales llegan a acuerdos y compromisos por un ambiente sano (Garrido, 2013, p. 176).

Con esto y por las diferentes secuelas que va dejando los primeros indicios del calentamiento global ya en las últimas décadas empiezan estudios más profundos y continuos de la búsqueda de un combustible alternativo más amigable al ambiente, es por estos que se toma en cuenta a los aceites vegetales los mismos que ya habían sido citados en estudios desde la invención del motor diesel gracias a los trabajos de Rudolf Diesel, en los que ya se destinaba a la combustión en motores de ciclo diesel convencionales o adaptados (Montrell, 2010, p. 246).

Como ya se mencionó a principios del siglo XXI, en el contexto de búsqueda de nuevas fuentes de energía y la creciente preocupación por el calentamiento global del planeta, se impulsó su desarrollo para su utilización en automóviles como combustible alternativo a los derivados del petróleo.

Para Sampert (2012, p. 59), la Comunidad Europea produce y utiliza biodiesel desde hace varios años. El mayor productor mundial es Alemania y lo elabora a partir de aceite de colza. Es uno de los pocos países en que los usuarios lo pueden utilizar solo o mezclado en cualquier proporción con gasoil. En Estados Unidos también se producen cantidades importantes pero a partir de aceite de soja. En varios países asiáticos obtienen biodiesel para exportar.

La mayoría de los países de Centro y Sudamérica están comenzando a reglamentar leyes de biocombustibles; algunos de ellos, más avanzados en el tema, como Brasil lo produce desde hace algún tiempo. En Paraguay también hay algunas plantas. En Argentina se ha estado obteniendo biodiesel en pequeña y mediana escala desde hace algunos años, generalmente para autoconsumo. Actualmente, se pusieron en funcionamiento plantas de gran envergadura y hay anunciadas inversiones para este año, de aproximadamente 800 millones de dólares para construir plantas de producción de este biocombustible, mayoritariamente para exportación.

El uso de combustibles fósiles en Ecuador ha estado en constante aumento en las recientes décadas. En particular su uso en vehículos ha crecido tanto por el aumento del parque automotor como por el hecho que los combustibles fósiles presentan un subsidio en el país. En el mundo moderno se empieza a utilizar bio-etanol en diversas mezclas con gasolina (puede usarse hasta 10-15% de etanol sin alterar el vehículo), mientras que en los motores a diesel empieza a usarse mezclas con biodiesel. Los países europeos hablan ya de un nivel de reemplazo de biodiesel de hasta un 20% en el diesel fósil.

En Ecuador, se incorporó en las políticas nacionales el apoyo al uso de bio-combustibles por medio del Decreto Ejecutivo 2332, Registro Oficial 482, 15 diciembre 2004. En él, se declara de interés nacional la producción, comercialización y uso de bio-carburantes como componentes de los combustibles que se consumen en el país, y se crea el Consejo Consultivo de Bio-combustibles.

En la Provincia de Pichincha en general, ha sido poco el interés para utilizar los recursos renovables como fuentes alternativas de energía. Siendo uno de las principales razones la falta de concientización y cultura ecológica a más del poco conocimiento y falta de tecnología para su implementación.

El presente trabajo de investigación será el punto de partida para llevar a cabo una posible utilización de combustibles alternos mediante el diseño y construcción de equipos que facilitaran esta actividad.

La comunidad mundial ha buscado un sin número de alternativas válidas para obtener una solución factible a la gran problemática ambiental que enfrenta el planeta, en varias oportunidades se han hablado de programas y compromisos dentro de convenciones como la de Kyoto en la que los acuerdos buscan energías alternativas; siendo como eje fundamental la desutilización de combustibles fósiles.

Es por esto que es indudable que hay que buscar combustibles renovables alternativos a los que se obtienen del petróleo, no sólo por la disponibilidad limitada de este recurso sino también por los problemas de contaminación ambiental creciente y los biocombustibles son una opción válida.

Esto no quiere decir que sean la única opción ni la definitiva; hay otras fuentes de energías renovables con mucho potencial: hidrógeno, energía solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, etc., pero actualmente los motores diesel se pueden utilizar con mezclas de pequeños porcentajes de biodiesel, sin realizar cambios en los mismos; o sea, es una opción que está disponible ahora, mientras se sigue desarrollando la tecnología necesaria para poder sumar otras fuentes renovables de energía a un costo competitivo (Coopler, 2013, p. 130).

Como futuros profesionales de la Facultad de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador con conocimientos claves acerca de la importancia en cuanto a la búsqueda de un equilibrio estable con un ambiente sano y limpio, y siendo parte activa de la sociedad, hemos visto la necesidad imperiosa de la realización del presente estudio de investigación buscando la manera de la obtención de fuentes alternas de energía con una visión hacia su posible industrialización. Como lo es la producción de Biodiesel.

Como base primordial del sector productivo de la ciudad y del país, el análisis realizado nace con la finalidad de la construcción de un reactor semiautomático que cumpla con las especificaciones técnicas óptimas para la obtención de Biodiesel, basándonos en juicios adquiridos como Ingenieros Automotrices en el dimensionamiento y construcción de equipos, con visión crítica a mantener una generación de energía amigable al ambiente.

El objetivo general es: realizar el diseño y construcción de un reactor para la elaboración de Biodiesel y obtención de glicerina.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar las materias primas a usar para la elaboración de biodiesel y obtención de glicerina.
- Determinar las variables del diseño del reactor.
- Efectuar los cálculos de ingeniería para el diseño y construcción del reactor y realizar su respectivo dimensionamiento
- Ejecutar el ensamble y armado del equipo, para verificar la implementación y el funcionamiento del equipo

CAPÍTULO II

Marco teórico

2.1 Magnitudes eléctricas

Es necesario conocer la electricidad básica y sus términos, para poder inmiscuirse en la electrónica del reactor. El amperaje, voltaje y resistencia tienen una relación muy importante la cual hay que tener siempre en cuenta cuando hablamos de electricidad.

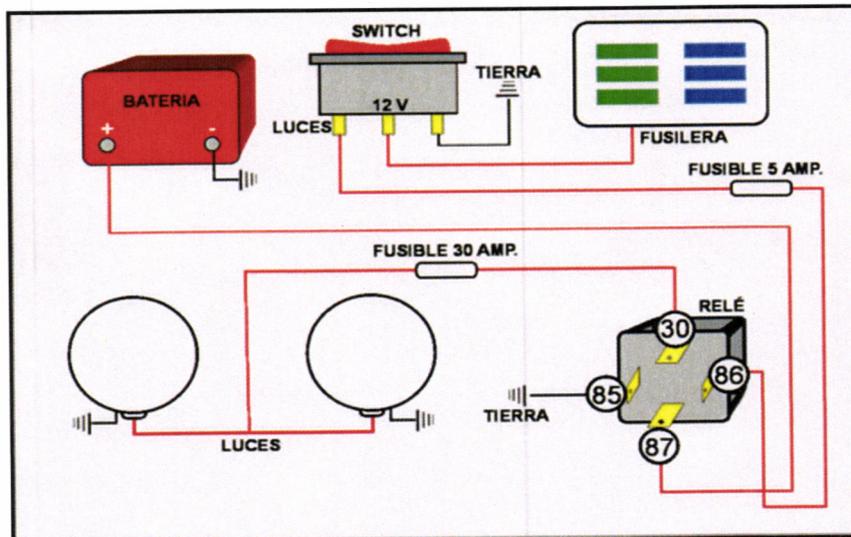


Figura 2.1: Sistema eléctrico básico

Fuente: Página de sistemas electrónicos, pestaña esquemas.

www.jeeperos.com/foros/showthread.php?t=16428

2.1.1 Intensidad

Es la cantidad de electricidad que pasa por un elemento conductor en una cantidad de unidades tiempo determinado y se lo mide con el multímetro como

se puede observar en la Figura 2.2. La unidad con la que se mide es el Amperio, que es representado con la letra A.

“Un Amperio es la cantidad de 6,24 Trillones de electrones que circulan durante 1 segundo, empujados por la fuerza de 1 Voltio a través de una resistencia de 1 Ohmio.” (Efrén Coello Serrano, 2009, p. 5)

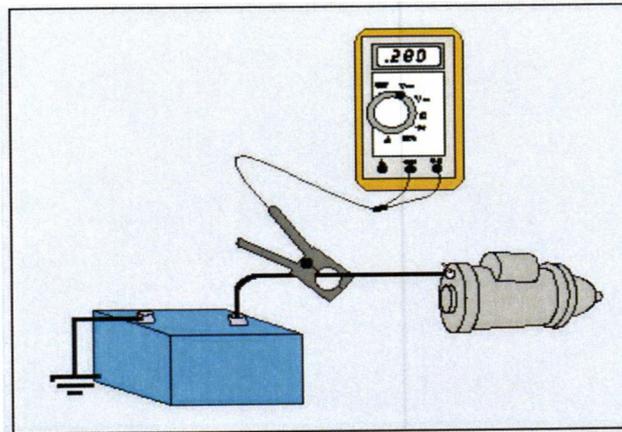


Figura 2.2: Medición de intensidad

Fuente: Página de sistemas de medición de elementos electrónicos.
www.electronicosistemas.com

2.1.2 Resistencia

Se la representa con la letra R. Y es la oposición al paso libre de los electrones en un circuito eléctrico. Su unidad de medida el Ohmio, que es representado con el símbolo Ω .

“Un Ohmio es la resistencia que ofrece una columna de Mercurio de 1 mm² de superficie por 1 metro de altura a una temperatura de 20 Grados centígrados.” (Efrén Coello Serrano, 2009, p.5)

Para medir la resistencia de un circuito eléctrico es necesario verificar que dicho circuito no esté alimentado de ningún tipo de voltaje o tensión, porque lo que se quiere medir es la conductividad que tiene. El instrumento que se utiliza para medir la resistencia de un circuito eléctrico se llama Ohmiómetro. (Figura 2.3).

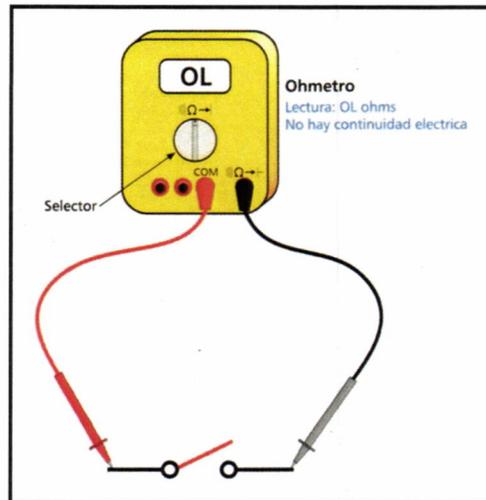


Figura 2.3: Medición de resistencia

Fuente: Página de sistemas de medición de elementos electrónicos.
www.electronicosysistemas.com

2.1.3 Voltaje

Se representa con la letra V. Es la fuerza con la que se mueven los electrones dentro del circuito eléctrico. Se representa con las letras E o U. Su unidad de medida es el Voltio.

“Un Voltio es la fuerza necesaria para empujar la cantidad de un Amperio de corriente a través de una resistencia de un Ohmio.”
(Efrén Coello Serrano, 2009, p. 5)

Al medir el voltaje solo se mide la diferencia de potencial. Esta se define como

“la diferencia de electrones existente entre dos cuerpos, cuyas cargas tienen el mismo signo o signos contrarios” (Martínez, 2004, p. 594).

Para la medición del voltaje se utiliza el voltímetro, el cual debe estar conectado en paralelo.

2.2 Ley de OHM

Es la relación que existe entre las corriente, tensión y resistencia. Fórmula:
(Hewitt, 2010, p.537)

$$E = I \times R \quad (1)$$

E = voltaje I = corriente R = resistencia

En todo circuito eléctrico la intensidad de la corriente es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica, sucede lo contrario entre el voltaje y la intensidad ya que estas siempre son directamente proporcionales. (Figura 2.4).

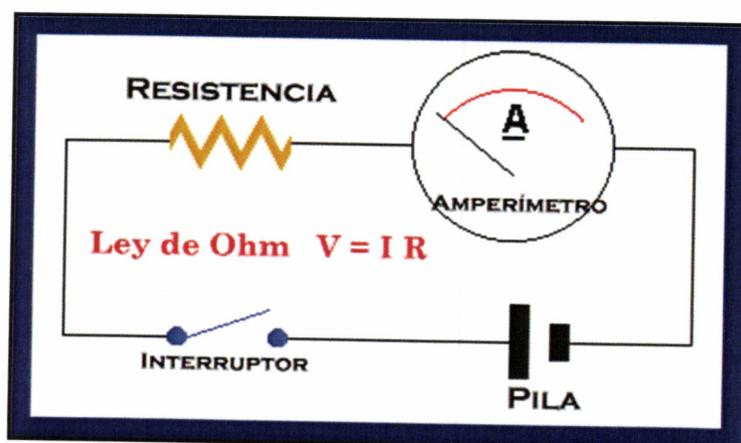


Figura 2.4: Ley de ohm

Fuente: Leyes e implementaciones profesionales electrónicas

<http://usuarios.multimania.es/pefeco/leyohm/leyohm.htm>

2.3 Potencia

Se la representa con la letra P y es el trabajo que realizan los aparatos eléctricos o electrónicos en un determinado espacio de tiempo. Su unidad de medición es el Wattio. Que se representa con la letra W.

La potencia de un elemento o consumidor es directamente proporcional al tiempo, debido que la cantidad de tiempo puede aumentar o disminuir el trabajo del consumidor.

“Un Wattio es la trabajo que realiza un consumidor eléctrico al cual se lo ha conectado a una fuente de energía de un Voltio y por el cual circula un Amperio de corriente durante un segundo.” (Martínez, 2004, p. 590).

Como se genera un trabajo con corriente eléctrica:

“Una corriente que atraviesa una resistencia nos genera calor, la misma que tendrá mayor o menor potencia dependiendo del tiempo que necesite para producir una cierta cantidad de calor. Igualmente si hablamos de una corriente eléctrica que atraviesa las bobinas de un motor eléctrico, dándonos trabajo en el eje del motor o una corriente eléctrica que circula por el filamento de una bombilla.” (Martínez, 2004, p. 590).

Fórmula: (Hewitt, 2010, p. 545)

$$P = E \times I \quad (2)$$

P= potencia E= voltaje I= corriente

2.4 Componentes eléctricos

2.4.1 Resistencias eléctricas tubulares

Son elementos diseñados para generar calor los cuales son utilizados para varias aplicaciones a nivel industrial. Estos elementos son fabricados con diferentes materiales que tienen como propiedad ser conductores de calor como por ejemplo: cobre, acero inoxidable, etcétera.

Son elementos muy versátiles debido a su fabricación son de varias formas y logran entregar altas temperaturas.

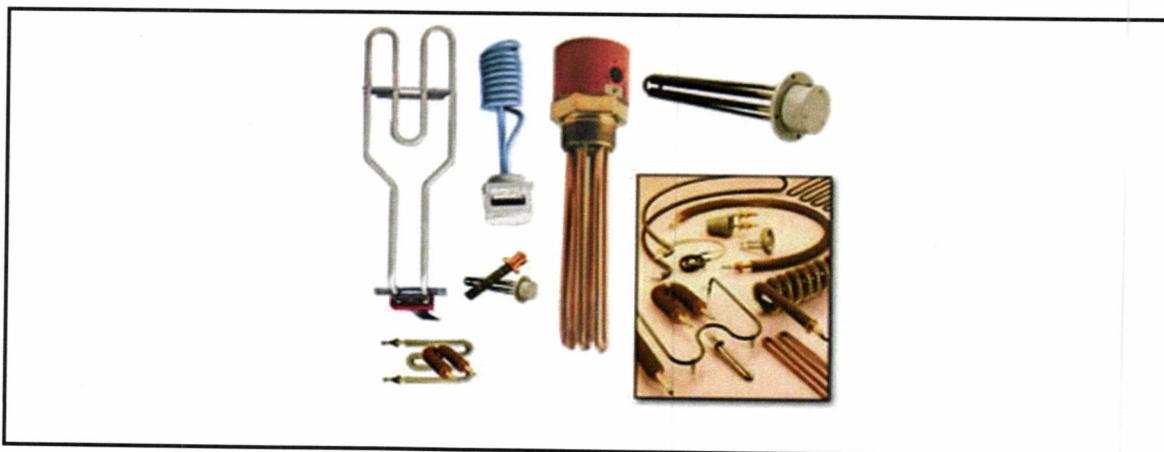


Figura 2.5: Resistencias tubulares

Fuente: Manual práctico de electricidad para ingenieros editado por Donald G. Fink, 2012, p. 249

2.4.2 Potenciómetros

Es un resistor en el cual el valor de resistencia puede ser variado o ajustado. Es decir que, indirectamente, se puede controlar la intensidad de corriente que circula por un circuito si este está conectado en paralelo, o la diferencia de

potencial al conectarlo en serie. Normalmente, los potenciómetros se utilizan en circuitos de poca corriente.

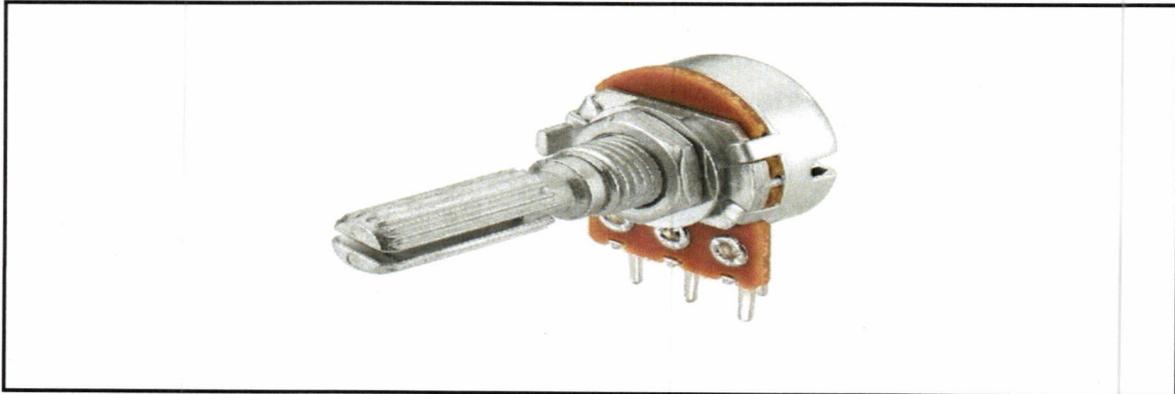


Figura 2.6: Potenciómetros

Fuente: Manual práctico de electricidad para ingenieros editado por Donald G. Fink, 2012, p. 271

2.4.3 Termocupla

Este elemento, sensor de temperatura es el que más se utiliza en la industria. Esta consta de 2 tipos de metales generalmente soldados en un extremo. Al tener contacto con temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje mínimo (milivoltios) el cual aumenta con la temperatura.



Figura 2.7: Termocupla

Fuente: Manual práctico de electricidad para ingenieros editado por Donald G. Fink, 2012, p. 273

2.4.4 Luz Piloto LED:

Es un semiconductor que se utiliza como indicador en muchos dispositivos. Presentan muchas ventajas como un menor consumo de energía, mayor vida útil, durabilidad y fiabilidad.



Figura 2.8: Luz piloto led

Fuente: Dany Miltor, Agenda de elementos electrónicos, Ed. Patros, 2012

2.4.5 Control Paro y Marcha (on/off)

Es un dispositivo utilizado para desviar o interrumpir el curso de una corriente eléctrica. Consiste en dos contactos separados que se unen para permitir que la corriente eléctrica circule.

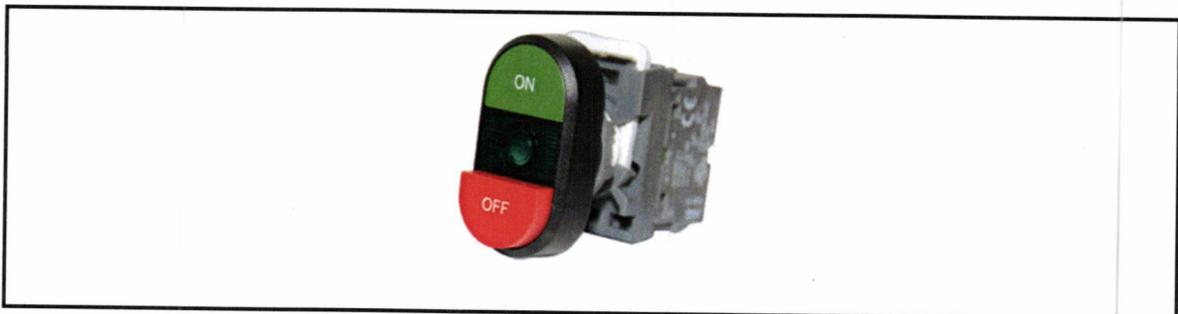


Figura 2.9: Control paro y marcha

Fuente: Dany Miltor, Agenda de elementos electrónicos, Ed. Patros, 2012

2.4.6 Braker trifásico

Está diseñado para proteger un circuito eléctrico de los daños causados por sobre carga o corta circuito. Su función básica consiste en detectar una condición de fallo y mediante la interrupción de la continuidad, suspender el flujo eléctrico.



Figura 2.10: Braker trifásico

Fuente: Dany Miltor, Agenda de elementos electrónicos, Ed. Patros, 2012

2.4.7 Motor Eléctrico

Es una máquina eléctrica que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, esto se da por las interacciones electromagnéticas. Estos pueden hacer la función contraria en la que se convierten en generadores.

Son utilizados en instalaciones industriales, comerciales y particulares. Y pueden funcionar conectándose a una red de suministro eléctrico o a una batería.

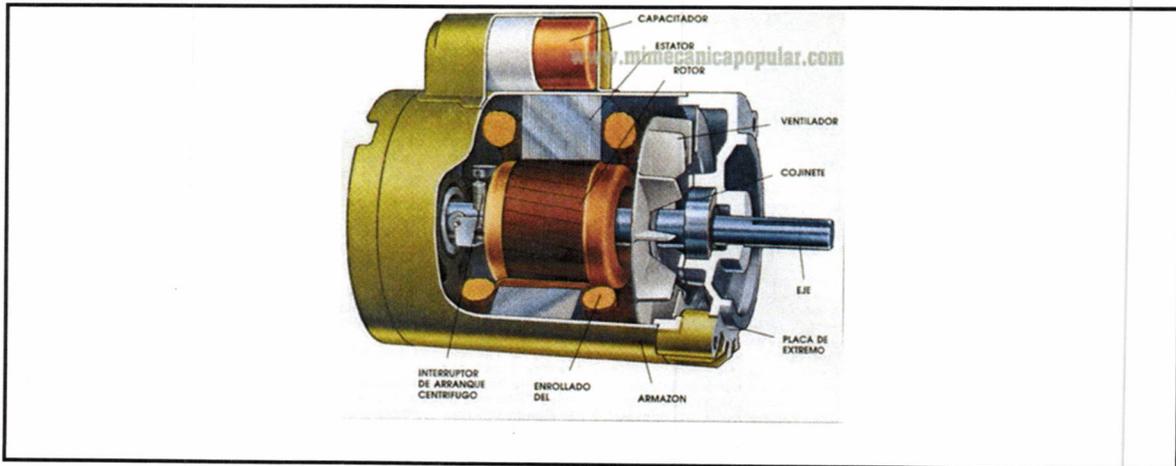


Figura 2.11: Motor eléctrico

Fuente: Dany Miltor, Agenda de elementos electrónicos, Ed. Patros, 2012

2.4.8 Contactor trifásico

Es un componente electromecánico que tiene como función de establecer o interrumpir el paso de corriente, ya sea en el circuito de mando o en el de potencia. Tiene dos posiciones de funcionamiento que son: una estable o de reposo, cuando no recibe acción alguna de parte del circuito de mando, y otra inestable, cuando actúa el circuito de mando.

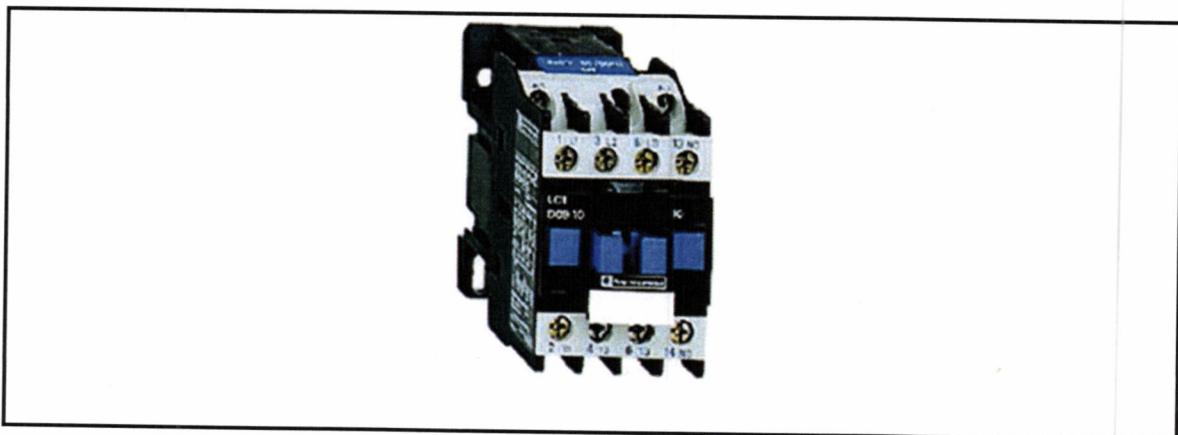


Figura 2.12: Contactor trifásico

Fuente: Dany Miltor, Agenda de elementos electrónicos, Ed. Patros, 2012

2.5 Presión

2.5.1 Definición

La presión es una magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

En el Sistema Internacional de Unidades (SI) la presión se mide en una unidad derivada que se denomina pascal (Pa), que equivale a una fuerza total de un newton actuando uniformemente en un metro cuadrado.

La presión es la magnitud que relaciona la fuerza con la superficie sobre la que actúa. Cuando sobre una superficie plana de área A se aplica una fuerza normal F de manera uniforme y perpendicularmente a la superficie, la presión P viene dada por:

Fórmula:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

En general, donde la fuerza puede tener cualquier dirección y no estar distribuida uniformemente en cada punto la presión se define como:

Fórmula:

$$P = \frac{d\vec{F}}{dA} \cdot \vec{n} \quad (4)$$

Donde \vec{n} es un vector unitario y normal a la superficie en el punto donde se pretende medir la presión.

2.5.2 Densidad de fuerza

La densidad de fuerza \vec{f} , en el seno de un fluido no-viscoso, o cualquier fluido en reposo, es igual al gradiente de la presión:

Fórmula:

$$\vec{f} = \frac{d\vec{F}}{dV} = \nabla P \quad (5)$$

Si hace referencia a la fuerza gravitacional, la densidad de la fuerza es el peso específico. La anterior igualdad hace que podamos interpretar a la presión como energía potencial por unidad de volumen.

2.5.3 Presión absoluta y relativa

2.5.3.1 Presión Absoluta

Es la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad de las moléculas son muy pequeñas (Verdesoto, 2010, p. 2012).

Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar por lo que un término absoluto unifica criterios.

2.5.3.2 Presión Manométrica

Son generalmente las presiones superiores a la atmosférica, que se mide por medio de un elemento que define la diferencia entre la presión que es desconocida y la presión atmosférica que existe, si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña mientras que en las mediciones de presiones superiores, dicha diferencia es insignificante, es evidente que el valor absoluto de la presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro (Griller, 2010, p. 2011).

La presión puede obtenerse sumando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

$$\text{Presión Absoluta} = \text{Presión Manométrica} + \text{Presión Atmosférica.}$$

2.6 Unidades de medida y presión y sus factores de conversión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y se expresa en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas que tuvieron lugar en Paris en octubre de 1967 y 1971, y según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la III Conferencia General de la Organización Internacional de Metrología Legal. El pascal es 1

newton por metro cuadrado (1 N/m²), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo (Newsoller, 2009, p. 361).

TABLA DE EQUIVALENCIAS ENTRE UNIDADES DE PRESION

bar	mbar	N/m ² , Pa	kN/m ²	mm Hg (0°C)	m H ₂ O	kgf/cm ²	inch Hg	inch H ₂ O	PSI	atm
		m·l. kg.s ⁻²	kPa	Torr	(4 °C)	at	(0°C)	(4 °C)	lbf/inch 2	(standar)
1	1.000	1x10 ⁵	100	750,062	10,1972	1,01972	29,53	401,463	14,5038	0,986923
1x10 ⁻³	1	100	0,1	0,750062	1,01972x10 ⁻²	1,01972x10 ⁻³	0,02953	0,401463	0,014504	9,86923x10 ⁻⁴
1x10 ⁻⁵	1x10 ⁻²	1	1x10 ⁻³	7,50062x10 ⁻³	1,01972x10 ⁻⁴	1,01975x10 ⁻⁵	2,953x10 ⁻⁴	4,01463x10 ⁻³	1,45038x10 ⁻⁴	9,86923x10 ⁻⁶
1x10 ⁻²	10	1.000	1	7,50062	0,10197	0,01197	0,02953	4,01463	0,145038	9,86923x10 ⁻³
1,33322x10 ⁻³	1,33322	133,322	0,133322	1	1,35951x10 ⁻²	1,35951x10 ⁻³	0,03937	0,53524	0,019337	1,31579x10 ⁻³
0,00981	98,0665	9,80665x10 ³	9,80665	73,5559	1	0,1	2,8959	39,3701	1,42233	0,096784
0,980655	980,665	9,80665x10 ⁴	98,0665	735,559	10	1	28,959	393,701	14,2233	0,967841
0,033864	33,8639	3.386,39	3,3864	25,4	0,345316	0,034532	1	13,5951	0,491154	0,033421
2,49089x10 ⁻³	2,49089	249,089	0,249089	1,86832	2,540x10 ⁻²	2,540x10 ⁻³	0,073556	1	0,03613	2,458x10 ⁻³
0,06895	68,9476	6.894,76	6,89476	51,7149	0,70307	0,070307	2,03602	7,68	1	0,068046
1,01325	1.013,25	1,01325x10 ⁵	1,01325x10 ²	760	10,3323	1,03323	29,921	406,78	14,6959	1

Tabla 2.1: Tabla de unidades de presión

Fuente: Antonio Creus, "Instrumentación industrial", 7ma edición, editorial Marcombo, 2010, pág. 68

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

2.7 Funcionamiento del motor diésel

2.7.1 Antecedentes

El motor diésel lleva este nombre en honor a su creador Rudolf Diesel, que creó un el primer motor 1897, desde donde comienza su historia. (Figura 2.13)

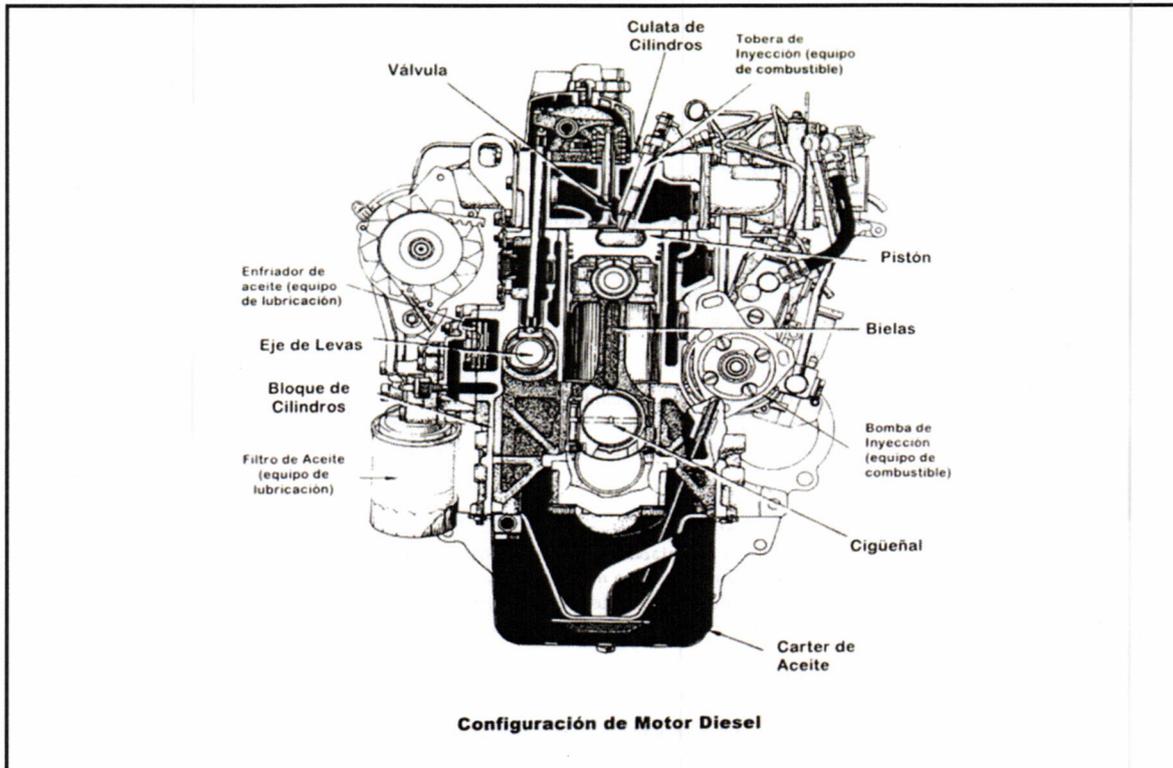


Figura 2.13 : Motor diésel

Fuente: "Regulación técnica Diesel (RTD)", Manual de Bosch, 2013, pág. 146

2.8 Funcionamiento

Este motor es aquel que combustiona diésel como su combustible. Se comprime el aire en el compartimento interior de los cilindros. Cuando la temperatura del aire que se encuentra dentro del cilindro empieza a elevarse la temperatura, debido a la excesiva presión generada en el cilindro la que es producida por una alta relación de compresión, el combustible se inyecta en forma pulverizada dentro del motor y la combustión espontánea del combustible ocurre.

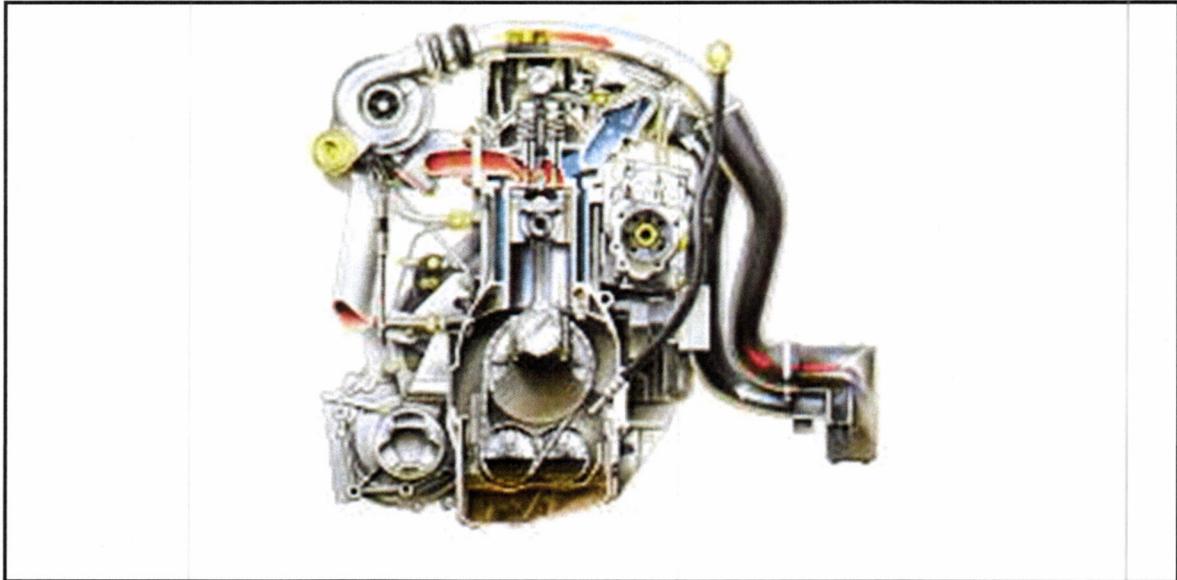


Figura 2.14: Funcionamiento motor diésel

Fuente: "Regulación técnica Diesel (RTD)", Manual de Bosch, 2013, pág. 168

CAPÍTULO III

Biodiesel

3.1. Antecedentes

La producción de biodiesel en el país puede resultar muy beneficioso debido al incremento acelerado a nivel mundial del precio del petróleo, se convierte en una ventaja para los países que son productores a gran escala de aceites vegetales, debido a que de estos aceites se pueden derivar biocombustible útiles para el consumo tanto en el campo industrial como particular.

La dependencia del Ecuador por la importación de combustible como GLP, Diesel, Nafta, etcétera, es una realidad que preocupa a nivel económico al país. Con la producción nacional de biocombustibles se reduciría el porcentaje de importación de dichos combustible fósiles anteriormente mencionados, y se generarían más fuentes de trabajo, lo que mejoraría en cierta forma la situación económica y ecología del país.

El biodiesel por ser un biocombustible es totalmente renovable y biodegradable, este produce menos emisiones dañinas al medio ambiente que las producidas por los combustibles fósiles lo que contribuye a la disminución de CO₂ en el ambiente.

3.2. Definición y especificaciones del biodiesel

Es un hidrocarburo en estado líquido, el cual es producido a base de las grasas animales y aceites vegetales, siendo el girasol, la colza y la soja las materias

primas más utilizadas. El biodiesel tiene características casi exactas a las que tiene el diésel común en lo relacionado a su densidad y número de cetano. También, posee un punto de inflamación mucho mayor. Es por esto que, el biodiesel puede usarse en motores e incluso sustituir totalmente a otros combustibles si se adaptan éstos convenientemente.

La definición de biodiésel propuesta por las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Material Standard), asociación internacional de normativa de calidad) lo define como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión.

Los ésteres más utilizados son los de metanol y etanol (obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos) debido a su bajo costo y sus ventajas químicas y físicas.

A diferencia de otros combustibles, los biocarburantes presentan la particularidad de utilizar productos vegetales como materia prima, es por esto que es preciso tener en cuenta las características de los mercados agrícolas, junto a la complejidad que ya de por sí presentan los mercados energéticos (Branigan, 2012, p. 178)

En general, cabe destacar que el desarrollo de la industria de los biocarburantes no depende principalmente de la disponibilidad local de materia prima, sino de la existencia de una demanda suficiente.

Al asegurar la existencia de una demanda de biocarburantes, el desarrollo de su mercado puede aprovecharse para potenciar otras políticas como la agrícola, favoreciendo la creación de empleo en el sector primario, la fijación de población en el ámbito rural, el desarrollo industrial y de actividades agrícolas.

En cuanto a la utilización del biodiésel como combustible de automoción, ha de señalarse que las características de los ésteres son más parecidas a las del diésel común que las del aceite vegetal sin modificar. La viscosidad del éster es dos veces superior a la del diésel frente a diez veces ó más de la del aceite crudo; además el índice de cetano de los ésteres es superior, siendo los valores adecuados para su uso como combustible. ASTM ha especificado distintas pruebas que se deben realizar a los combustibles para asegurar su correcto funcionamiento (Pastrano, 2012, p. 92).

N°	PROPIEDAD	PRINCIPALES NORMAS			UNIDADES
		PNTF 321.125:2007	ASTM D 6751 - 7	EN 14214:2002	
1	Contenido de calcio y magnesio, combinado	5 máx	5 máx		ppm ($\mu\text{g/g}$)
2	Punto de inflamación (copa cerrada)	93 mín	130.0 mín	120.0 mín.	$^{\circ}\text{C}$
3	Control de alcohol				
	1. Contenido de metanol	0.2 máx		0.2 máx	% volumen
	2. Punto de inflamación	130.0 mín			$^{\circ}\text{C}$
4	Agua y sedimento	0.050 máx	0.050 máx		% volumen
5	Viscosidad cinemática a 40 $^{\circ}\text{C}$	1.9 - 6.0	1.9 - 6.0	5.00 máx	mm^2/s
6	Ceniza sulfatada	0.020 máx	0.020 máx	0.020 máx	% masa
7	Azufre	0.0015 máx	0.05 máx	0.001 máx	% masa (ppm)
8	Corrosión a la lamina de cobre	N° 1	N° 3 máx	N° 1	
9	Número de cetano	47 mín	47 mín	51.0 mín	
10	Punto de nube	reportar	reportar		$^{\circ}\text{C}$
11	Residuo de carbón	0.050 máx	0.050 máx	0.30 máx	% masa
12	Número de acidez	0.50 máx	0.50 máx	0.50 máx	Mg KOH
13	Glicerina libre	0.020 máx	0.020 máx	0.02 máx	% masa
14	Glicerina total	0.240 máx	0.240 máx	0.250 máx	% masa
15	Contenido de fósforo	0.001 máx	0.001 máx	0.0001 máx	% masa
16	Temperatura de destilación, 90% recuperado	360 máx	360 máx		$^{\circ}\text{C}$
17	Contenido de sodio y potasio, combinado	5 máx	5 máx	6.0 mín	ppm ($\mu\text{g/g}$)
18	Estabilidad a la oxidación	3 mín	3 mín		horas
19	Contenido de éster			96.5 mín	% (m/m)

Tabla 3.1: Propiedades del biodiesel

Fuente: Mehlenbacher, V. Análisis de Grasas y Aceites. Madrid: Urmo, 1977.

3.3. Compatibilidad del biodiesel con los elementos

El biodiésel no es compatible con polímeros (materiales aislantes) que muestran un comportamiento elástico, fabricados con caucho natural y piezas de cobre.

“En una prueba realizada por el Instituto de Investigación de Southwest sobre la resistencia a la tensión, elongación, dureza y variaciones de volumen de ciertos elastómeros en presencia de

mezclas de biodiésel como: B100, B20 y B30, se comprobó que es compatible con todos los elastómeros probados (Teflón, Nylon 66, Nitrilo, Viton A401C (caucho sintético), Viton GFLT, Fluorsiliconas, Poliuretano, Polipropileno) aunque hubo pequeñas diferencias con la goma de Nitrilo. Los elastómeros que mejor desempeño tuvieron con el biodiésel son el Teflón, Viton 401C y Viton GFLT” (<http://www.biodiesel.org/>).

El biodiésel con el tiempo llegara a ablandar y degradar algunos tipos de elastómeros y compuestos de caucho natural usados en mangueras y bombas de combustible antiguas.

La mayoría de los vehículos construidos después de 1994 poseen tuberías y sellos completamente sintéticos, con lo cual no sufrirán este problema. Los vehículos más viejos deben ser modificados antes de utilizar altos porcentajes de mezcla para asegurarse que el sistema de alimentación de combustible no contenga elastómeros incompatibles con el biodiesel (Kepler, 2011, p. 317).

Los fabricantes recomiendan que las gomas butílicas o naturales no entren en contacto con biodiésel puro, pues quedarán pegajosas y se disolverán.

Además el biodiésel tiene un efecto solvente que puede liberar depósitos acumulados en las paredes del tanque de combustible o en las tuberías, obstruyendo los filtros del sistema (Arrierll, 2009, p. 121).

Se debe tomar precauciones para evitar que estos depósitos consigan llegar a los filtros de combustible del motor.

3.4. Materias primas para la producción del biodiésel

Las materias primas más comunes utilizadas para la fabricación de biodiésel son los aceites de fritura usados y el aceite de colza ya que es una especie con alto contenido de aceite, que se adapta bien a los climas fríos.

También se usa el aceite de girasol y el de palma, se puede decir que la producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas. Cualquier materia que contenga triglicéridos puede utilizarse para la producción de biodiésel (girasol, colza, soja, aceites de fritura usado, sebo de vaca, etcétera).

A continuación se detallan las principales materias primas para la elaboración de biodiésel:

- Aceites vegetales convencionales
- Grasas animales
- Aceites de fritura usados
- Aceites de otras fuentes

3.4.1. Aceites vegetales convencionales

Las materias primas utilizadas convencionalmente en la producción de biodiésel han sido los aceites de semillas oleaginosas como el girasol y la colza (Europa), la soja (Estados Unidos, Brasil y Argentina) y el coco (Filipinas); y los aceites de frutos oleaginosos como la palma (Malasia, Indonesia y Ecuador).

Por razones climatológicas, la colza (*Brassica napus*) se produce principalmente en el norte de Europa y el girasol (*Helianthus annuus*) en los países mediterráneos del sur.

3.4.2. Aceites de fritura usados

El aceite de fritura usado es una alternativa que tiene buenas perspectivas en la producción de biodiésel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitan los costos de tratamiento como residuo.

Por su parte, los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible.

3.4.3. Grasas animales

Además de los aceites vegetales y los aceites de fritura usados, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca, pueden utilizarse como materia prima de la transesterificación para obtener biodiésel.

El sebo tiene diferentes grados de calidad respecto a su utilización en la alimentación, empleándose los de peor calidad en la formulación de los alimentos de animales.

3.4.4. Aceites de otras fuentes

Por otra parte, es interesante señalar la producción de lípidos de composiciones similares a los aceites vegetales, mediante procesos

microbianos, a partir de algas, bacterias y hongos, así como a partir de micro algas.

Para la producción de biodiésel en nuestro proyecto se ha seleccionado un aceite vegetal convencional (aceite de palma), este aceite de palma es una de los más producidos a nivel mundial y según los estudios realizado por las USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), el Ecuador se encuentra entre los 6 países con mayor producción de aceite de palma a nivel mundial.

Palm Oil World Production (Thousand Metric Tons)				
	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06
Indonesia	10.300	11.500	14.000	15.000
Malaysia	13.180	13.420	15.194	15.300
Thailand	640	840	700	900
Nigeria	770	780	790	800
Colombia	540	614	647	690
Ecuador	241	247	260	340
Other	2.042	2.191	2.285	2.341
Total.	27.713	29.592	33.876	35.371

Sources: USDA, Fedepalma

Tabla 3.2: Producción de aceite de palma en el mundo

Fuente: Indicadores de niveles de producción por mercado en referencia de un producto (aceite de palma)

USDA, Fedepalma. <http://www.fedepalma.org/>

En la actualidad en el Ecuador existen alrededor de 230.000 Has de cultivo de palma africana, un porcentaje de estas pertenecen a industrias que cuentan con excelente infraestructura y tecnología para la extracción y

refinación de dicho aceite lo que garantiza tener un producto de primera calidad.

Según las fuentes del último censo realizado por la ANCUPA (Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera), las provincias con mayor producción en el Ecuador, son: Bolívar, Esmeraldas, Pichincha y La Concordia.

Podemos observar que las provincias de mayor producción están muy cerca de la capital, por lo que se seleccionó el aceite de palma como materia prima para la obtención del biodiesel en nuestro proyecto.

SECTOR	TOTAL PALMA (ha)	NÚMERO DE PREDIOS	NÚMERO DE PALMICULTORES
BOLIVAR	209	12	9
COTOPAXI	1756	123	87
ESMERALDAS	83466	2897	2018
GUAYAS	4512	58	35
LOS RIOS	43279	795	598
MANABÍ	1287	56	47
ORELLANA	3278	138	97
PICHINCHA	17660	450	397
SUCUMBIOS	26549	876	675
SANTA ELENA	2650	29	19
CAÑAR	3786	36	35
SANTO DOMINGO	12890	156	135
OTRAS	28098	289	277
TOTAL	229420	5915	4429

Tabla 3.3: Producción de biodiesel en el Ecuador

Fuente: www.ecuadorencifras.gob.ec

3.5. Reacciones en la producción del biodiesel

El método más utilizado comercialmente para la obtención de biodiésel es la transesterificación (también conocida como alcoholisis) (Weber, 2012, p. 162).

Se basa en la reacción de moléculas de triglicéridos (el número de átomos de las cadenas está comprendido entre 15 y 23, siendo 18 el más común) con alcoholes de bajo peso molecular (metanol, etanol, propanol, butanol) para producir ésteres y glicerina (esta es utilizada en la industria cosmética, alimentaria, farmacéutica, etcétera).

Para Morris (2013, p. 207), la reacción de transesterificación, se desarrolla en una proporción molar de alcohol a triglicérido de 3 a 1, reaccionando en la metanólisis 1 mol de triglicérido con 3 moles de alcohol (aunque se añade una cantidad adicional de alcohol para trasladar la reacción hacia la formación del éster metílico). El triglicérido es el principal ingrediente del aceite vegetal y la grasa animal. Además, la formación de la base de la glicerina, inmiscible (que no se puede mezclar con otros elementos homogéneamente) con los ésteres metílicos, es importante en la obtención del biodiésel.

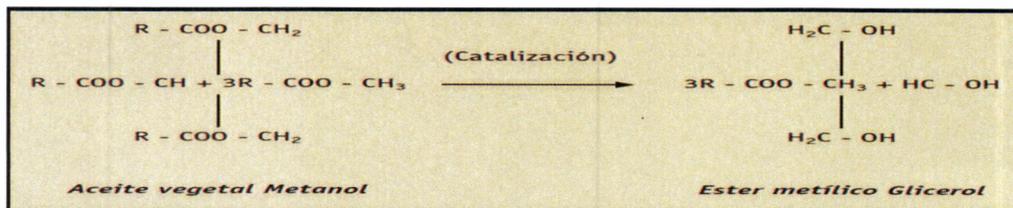


Figura 3.1: Reacción de transesterificación

Fuente: <http://go-chemistry.blogspot.com/2009/09/como-se-fabrica-el-biodiesel.html>

En la figura 3.2 se pueden observar las diferentes reacciones que tienen lugar en la transesterificación, la cual consiste químicamente en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido es convertido sucesivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado.

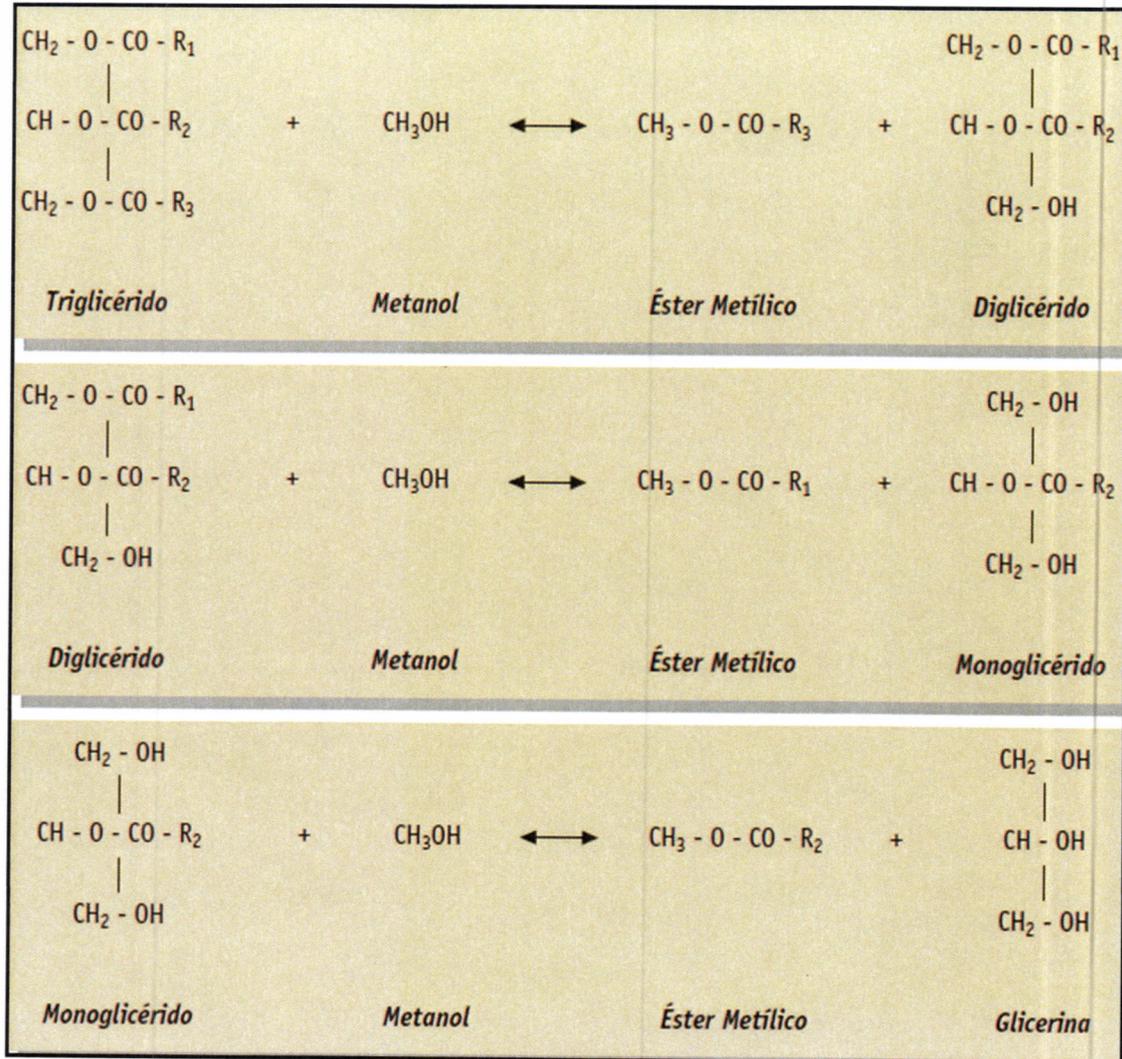


Figura 3.2: Reacciones en la transesterificación

Fuente: <http://go-chemistry.blogspot.com/2009/09/como-se-fabrica-el-biodiesel.html>

En la reacción de transesterificación se utiliza un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento, sin este no sería posible la reacción. Los catalizadores pueden ser ácidos homogéneos (H_2 , SO_4 , HCl , H_3PO_4 , RSO_3), ácidos heterogéneos (Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO_4/ZrO_2 , WO_3/ZrO_2), básicos heterogéneos (MgO , CaO , $Na/NaOH/Al_2O_3$), básicos homogéneos (KOH , $NaOH$) o enzimáticos (Lipasas: *Candida*, *Penicillium*, *Pseudomonas*); de todos estos; los catalizadores homogéneos básicos son los más utilizados comercialmente ya que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones moderadas (Zhalklep, 2011, p. 230).

En la reacción de transesterificación, cuando se utiliza un catalizador ácido se requieren condiciones de temperaturas elevadas y tiempos más largos de reacción, por ello es frecuente el uso de derivados de ácidos más activos.

Debido a esto, la utilización de álcalis, es la opción más utilizada a escala industrial, indica que los glicéridos y el alcohol deben ser anhidros (<0,06 % v/v) para evitar que se produzca la saponificación. Igualmente, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen también jabones.

De esta manera las reacciones secundarias que se pueden dar son las siguientes:

- Reacción de saponificación.
- Reacción de neutralización de Ácidos grasos libres.

El triglicérido reacciona con el catalizador básico, consumiendo éste, en presencia de agua dando lugar a la formación de jabones (reacción de saponificación), tal y como se puede ver en la figura 3.3.

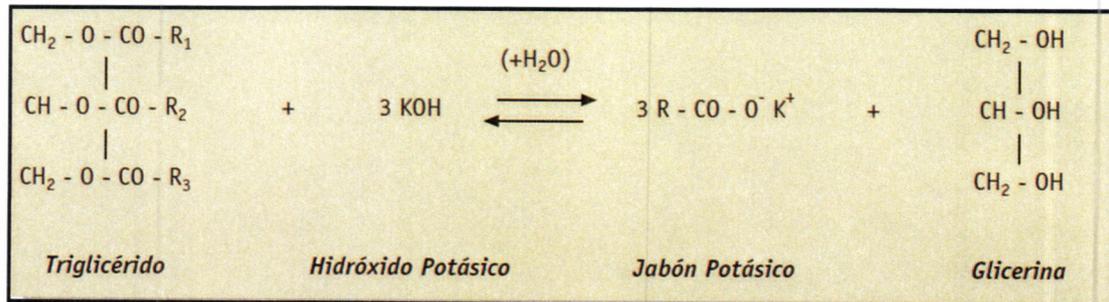


Figura 3.3: Reacción de saponificación

Fuente: www.biodiesel.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-mas-comunes/la-produccion-de-biodiesel-materias-primas-procesos-calidad/

La saponificación se amplifica cuando se utiliza el hidróxido potásico o sódico, ya que sus moléculas contienen los grupos OH responsables de esta reacción.

Además, cuando se utilizan estos catalizadores, se debe tener especial precaución con las condiciones de reacción, especialmente la temperatura y la cantidad de catalizador básico, para disminuir al máximo la saponificación (Guimarães, 2010, p. 2012).

Sin embargo, los metóxidos sólo contienen el grupo OH como impureza, por lo que su aplicación no produce prácticamente jabones por saponificación. Por ende, se deben utilizar aceites y alcoholes esencialmente anhidros, ya que el agua favorece la formación de jabones por saponificación.

Por esta razón, se debe eliminar el agua, mediante evaporación, en los aceites que contengan humedad antes de llevar a cabo la transesterificación.

Hay dos maneras de eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite, se puede proceder a su neutralización, ya que los ácidos grasos presentes en el aceite vegetal pueden reaccionar con el catalizador básico (fundamentalmente NaOH) en presencia de agua, ocurriendo una reacción indeseable, obteniéndose como en el caso anterior jabón, como se puede ver en la figura 3.4.

Otra manera de eliminar los ácidos grasos libres es mediante una reacción de esterificación con un catalizador ácido con lo que se formaría el éster metílico.

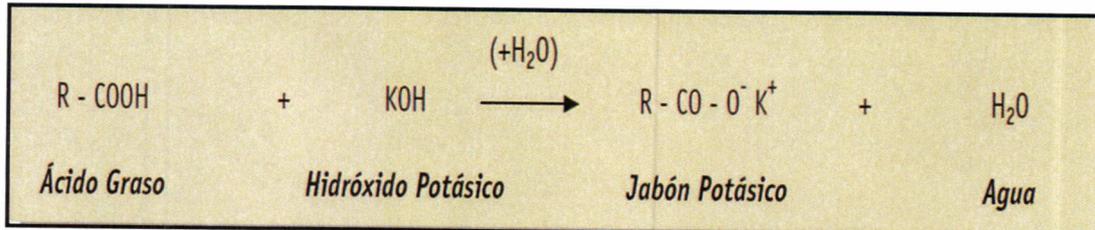


Figura 3.4: Obtención de jabón

Fuente: www.ugr.es/~quiored/qoamb/Jabon.doc

3.6. Procesos en la producción del biodiesel

La transesterificación (proceso industrial de producción) consta de tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido es convertido sucesivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina.

En cada reacción un mol de éster metílico es liberado. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen las reacciones y en posteriores fases de separación, purificación y estabilización (Samuelson, 2009, p. 128).

En este punto se mencionaran los diferentes procesos para la producción de biodiésel entre los que comprenden el proceso general de transesterificación y el proceso general de esterificación, aunque usualmente en este último el proceso se utiliza en combinación con el de transesterificación a partir de los ácidos grasos, subproductos de este proceso, para la producción de biodiésel.

Además también se comentaran estos procesos en discontinuo y en continuo, para finalizar con el proceso en condiciones supercríticas donde no es necesario añadir catalizadores.

3.6.1. Proceso discontinuo

Es el método más simple para la producción de biodiesel donde se han publicado mezclas de 4 a 1 (alcohol: triglicérido), se lo produce en reactores con agitación, donde el reactor puede estar sellado o equipado con un condensador de reflujo.

Las temperaturas de operación más habituales son de 65° C, aunque rangos de temperaturas desde 25° C a 85° C también han sido publicadas.

El catalizador más común es el NaOH, aunque también se utiliza el KOH, en rangos del 0,3% al 1,5%. Es imprescindible una rápida agitación para una correcta mezcla del aceite, el catalizador y el alcohol, ya acercándose al fin de la reacción, la agitación debe ser menor para que el glicerol pueda separarse de la fase éster.

En la transesterificación, al utilizar catalizadores ácidos se requiere temperaturas elevadas y tiempos prolongados de reacción.

Algunas plantas en operación utilizan reacciones en dos etapas (Figura 3.5), con la eliminación del glicerol entre ellas, así se puede aumentar el rendimiento final hasta porcentajes superiores al 95%.

Temperaturas mayores y cantidades superiores de alcohol pueden aumentar el rendimiento de la reacción. El tiempo de reacción suele ser entre 20 minutos y una hora (Hayek, 2009, p. 207).

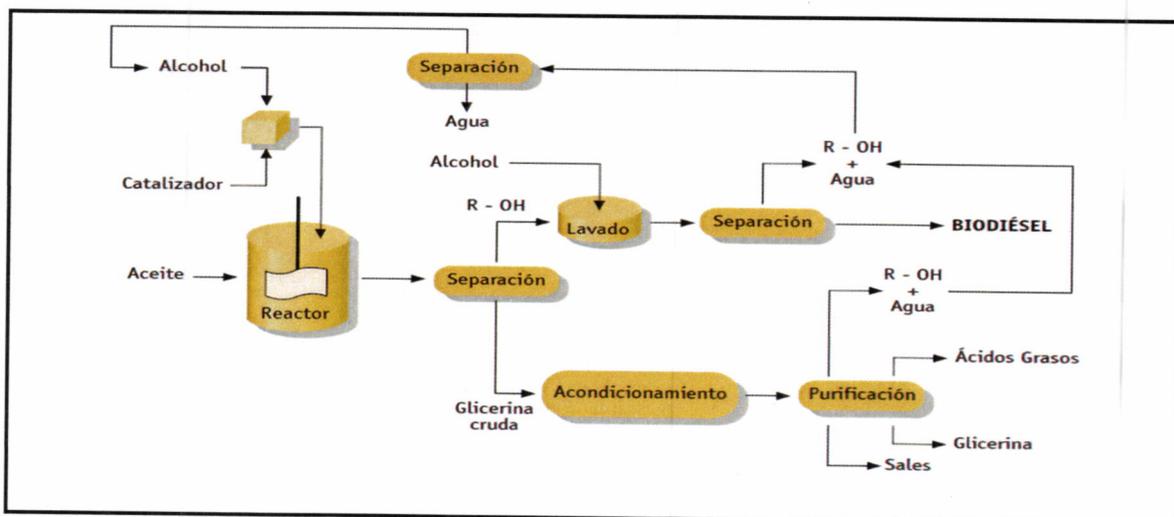


Figura 3.5: Proceso discontinuo

Fuente: <http://qopi3.blogspot.com/2008/03/procesos-de-obtencion-del-biodiesel.html>

3.7. Aplicaciones

Los carburantes obtenidos a partir de cultivos y de otras materias orgánicas, los llamados biocarburantes, presentan una serie de ventajas para el sector del transporte. En primer lugar, los biocarburantes pueden contribuir a reducir el crecimiento en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Los ésteres metílicos derivados de los aceites vegetales poseen características físicas y fisicoquímicas parecidas al diésel común, lo que permite mezclarlos en cualquier proporción y usarlos en los vehículos a diésel, sin realizar importantes modificaciones en el diseño básico del motor, pero en proporciones superiores al 5% es necesario reemplazar los materiales del circuito de alimentación de combustible por otro más resistente debido a que el biodiésel tiene mayor poder disolvente (Walmer, 2010, p. 62).

<i>Propiedad</i>	<i>Gasóleo</i>	<i>Aceite de Girasol</i>	<i>Metil Ester de Girasol</i>	<i>Aceite de Colza</i>	<i>Metil Ester de Colza</i>
Densidad (15°C)(Kg/l)	0,84	0,92	0,89	0,9	0,883
Punto de ignición (°C)	63	215	183	200	153
Viscosidad cinemática (37,8°C)(mm ² /s)	3,2	35	4,2	39	4,8
Número de cetano	45-50	33	47-51	35-40	52
Calor bruto de combustión (mj/Kg)	44	39,5	40	-	40
Punto de enturbamiento (°C)	0-(+3)	-6,6	3	-	-3
Azufre (% peso)	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Residuo de carbón (% peso)	0,2	0,42	0,05	-	-

Tabla 3.4: Propiedades de los esteres metílicos derivados de aceites.

Fuente: Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, Juan Manuel García Camús, José Ángel

García Laborda p. 56

3.7.1. Biocombustibles obtenidos a partir del biodiesel

El Biodiésel posee varios tipos de mezclas para la obtención de biocombustibles con los siguientes nombres y propiedades:

- **B20:** El biocombustible **B20** significa una mezcla del 20% de Biodiésel y el 80% de diesel normal. El B20 es la mezcla de biocombustible de Biodiésel más utilizada en Norteamérica (Parker, 2012, p. 229).
- **B100:** El biocombustible **B100** significa biodiesel al 100% sin mezcla alguna con diesel normal. Es un producto 100% ecológico con bajas de emisiones nocivas a la atmósfera. El único inconveniente es que en los motores de vehículos antiguos (años anteriores a 1994) se debe reemplazar los conductos de goma del sistema del combustible por otros materiales más resistentes al biodiesel (Parker, 2012, p. 229).

3.7.2. Aplicaciones de la glicerina y su problemática

En la producción del biodiésel, se forman entre el aceite y el alcohol, normalmente metílico, ésteres en una proporción que se aproxima al 90% y un 10% de glicerina. La glicerina es un subproducto muy valioso que refinada tiene un importante uso en el campo farmacológico.

La glicerina es eliminada en el proceso de lavado con agua. Sin embargo, la glicerina puede hallarse en el biodiesel como consecuencia de un proceso inapropiado, como una insuficiente separación de la fase de glicerina o un insuficiente lavado con agua.

La glicerina se emplea en la fabricación, conservación, ablandamiento y humectación de gran cantidad de productos, éstos pueden ser resinas alquídicas (polyester), celofán, tabaco, explosivos (nitroglicerina), fármacos y cosméticos, espumas de uretano, alimentos y bebidas, etcétera.

Así, como subproducto de la producción de biodiésel se obtiene por tanto glicerina, de calidad farmacéutica e industrial.

Estas glicerinas tienen un valor económico alto y su comercialización forma parte de la rentabilidad del biodiésel.

CAPÍTULO IV

Diseño y construcción del reactor

4.1 Cálculos para el diseño del reactor

4.1.1. Cálculo del volumen de la cámara de ebullición

Para un mejor estudio se basará como base de cálculo el estudio previo de Acosta, Astro y Cortijo (2012, p. 39), donde se procede a la fabricación de un reactor con capacidad de 40 L, pero para el presente proyecto investigativo se adaptará este manual para la ejecución de un reactor con capacidad de 8 L. Citándose de la siguiente forma los datos referenciales:

Deseando la producción de 8 L de biodiesel, partimos de un volumen de 7 L. con el factor de corrección de 0,15 (el factor de corrección está determinado de acuerdo a estándares de diseño y construcción, recomendado en el Manual de construcción y uso de reactor para producción de biodiésel a pequeña escala, de Fernando Acosta, Paula Castro, Elsa Cortijo, 2012, p. 39), en relación al volumen de la caída cónica de 25°, se tiene:

$$V_r = 8 \text{ L}$$

$$V = f_s * V_r$$

$$V = 0,15 * 7 \text{ L}$$

$$V = 1,05 \text{ L}$$

Tenemos un volumen total de:

$$V_t = 7 + 1,05$$

$V_t = 8,05 \text{ L}$ (valor aprox. De acuerdo manual)

4.1.2. Cálculo de la altura de la cámara de ebullición

Se utiliza la fórmula del volumen de un cilindro, tomando la consideración de diseño de un diámetro de 20 cm, teniendo:

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$h = \frac{v}{\pi * r^2}$$

$$h = \frac{8,05L}{\pi * (10cm)^2} * \frac{100cm^3}{1 L}$$

$$h = 24,68 \cong 25cm$$

4.1.3. Cálculo del volumen de la cámara de calefacción

Por recomendación técnica para la construcción, el diámetro del medio de calentamiento se aumenta 2,5 cm a cada lado del diámetro de la cámara de ebullición. Esto es:

$$\phi = (25 + 5)cm$$

$$\phi = 30cm$$

Tenemos para el volumen total:

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * (10\text{cm})^2 * 25\text{cm}$$

$$V = 250 * \frac{1\text{L}}{1000\text{cm}^3}$$

$$V = 10,25\text{L}$$

4.1.4. Cálculo del volumen real de la cámara de calefacción

Lo determinamos por la diferencia de volúmenes:

$$V_{cal} = V - V_{eb}$$

Dónde:

V_{cal}= Vol. de la cámara de calefacción

V= Vol. total del tanque

V_{eb}= Vol. de la cámara de ebullición

El volumen real de calefacción es:

$$V_{cal} = (10,25 - 8,05)\text{L}$$

$$V_{cal} = 2,20\text{L}$$

4.2. Cálculos para el sistema de agitación

Para establecer las condiciones de diseño del agitador es necesario determinar la potencia para accionar el rodete.

El cálculo de la potencia deberá realizarse a partir de la experiencia, es decir mediante la empírica en las pruebas a nivel de laboratorio. A partir de esto partiremos de las siguientes consideraciones:

Agitación media = 100 rpm, Agitación a usar 300 rpm

Diámetro del tanque $\phi_t = 25 \text{ cm}$

- **Altura del tanque agitador**

La altura es aproximadamente 1,2 del ϕ_t , por lo tanto:

$$L = 1,2 \phi_t$$

$$L = 1,2 (25\text{cm})$$

$$L = 1,2 (25\text{cm})$$

$$L = 30 \text{ cm}$$

Por condiciones de diseño para una mejor separación de las fases formadas en el proceso de transesterificación, el tanque deberá ser más alto que ancho por lo que se aumentó el alto del mismo a la altura de 57 cm.

- **Cálculo del diámetro del rodete**

- **Longitud del brazo**

$$L_b = \frac{1}{2} (25 \text{ cm.})$$

$$L_b = 12,5 \text{ cm}$$

Por haberse diseñado el tanque con mayor altitud y para tener un mejor criterio en el mezclado se aumenta el largo del brazo hasta 40 cm.

- **Espesor del Rodete**

$$Er = \frac{1}{4} Lb$$

$$Er = \frac{1}{4} (12,5 \text{ cm.})$$

$$Er = 3,125 \text{ cm.}$$

- **Diámetro del rodete**

$$\varnothing_r = \frac{2}{3} * \varnothing_t$$

$$\varnothing_r = \frac{2}{3} * (25 \text{ cm.})$$

$$\varnothing_r = 16,66 \text{ cm}$$

- **Distancia entre el fondo del tanque y el rodete**

Altura del tanque = 25 cm

Altura del brazo = 12,5 cm

$$X = L - Lb$$

$$X = (25 - 12,5) \text{ cm.}$$

$$X = 12,5 \text{ cm.}$$

4.2.3. Cálculo de la potencia para accionar el rodete

4.2.3.1. Cálculo del número de Reynolds

Se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$N_{RE} = \frac{\phi t^2 * N * \rho}{\mu}$$

Dónde:

ϕt = diámetro del tanque (m)

N = Número de revoluciones por segundo

μ = viscosidad del fluido (Pa.s)

ρ = densidad del fluido (Kg / m³)

Para lo cual:

μ = 0,02585 Pa.s

ρ = 1055 kg / m³

Con esto tenemos:

$$N_{RE} = \frac{\phi t^2 * N * \rho}{\mu}$$

$$N_{RE} = \frac{0,20 m^2 * 1,67 \frac{rev}{s} * 1055 \frac{kg}{m^3}}{0,02585 Pa.s}$$

$$N_{RE} = 2726,266$$

$$N_{RE} = 2,7 \times 10^3$$

4.2.3.2. Cálculo de la potencia del agitador

Por medio de la gráfica del número de potencia N_p en función de N_{re} , el número de potencia es:

$$N_p = \frac{P}{\rho * N^3 * \phi t^5}$$

Con el número de Reynolds utilizamos la gráfica de correlaciones de potencia

$$N_p = 0,38$$

Dando una potencia de:

$$P = 0,60$$

4.3. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor

Las correlaciones de transferencia de calor para soluciones agitadas en el interior de un recipiente y las paredes de la chaqueta viene dado por:

$$\frac{U\phi}{k} = a * (N_{RE})^b * N\rho^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^m$$

$$N_{RE} = \frac{\phi t^2 * N * \rho}{\mu}$$

$$N_{pr} = \frac{Cp * \mu}{k}$$

Dónde: U= Coeficiente de Transferencia de calor (J / s m² K)

ϕ = Diámetro Interno del Tanque (m)

k = Conductividad térmica (J / sm K)

Nre = Número de Reynolds

ϕt = Diámetro del agitador (m)

N = Velocidad Rotacional (rpm)

ρ = densidad del fluido (kg / m³)

μ = viscosidad del Fluido (Pa.s)

Np -= Número de Prandt

Cp = Capacidad Calorífica (J / kg K)

μ_w = Viscosidad del fluido a temperatura de la pared (Pa.s)

a, b, m = Constantes según el tipo de agitador

Calculamos el Número de Reynolds, teniendo:

$$N_{RE} = \frac{\phi t^2 * N * \rho}{\mu}$$

$$N_{RE} = 2,7 \times 10^3$$

El número de Prandt es:

$$N_{pr} = \frac{Cp * \mu}{k}$$

Para lo cual:

La Capacidad Calorífica de la palma es:

$$C_{P \text{ PALMA}} = 14,19 \text{ KJ / Kg K}$$

La conductividad térmica del acero inoxidable es:

$$k = 50,2 \text{ J / m s K}$$

Teniendo:

$$N_{Pr} = \frac{\left(14190 \frac{\text{J}}{\text{Kg K}}\right) / (0,02585 \text{ Pa.s})}{50,2 \frac{\text{J}}{\text{s m K}}}$$

$$N_{Pr} = 7,31$$

Las constantes a, b y m son determinadas de acuerdo al tipo de paleta siendo este tipo ancla:

$$a = 0,54 \quad b = 2 / 3 \quad m = 0,14$$

Reemplazando en la fórmula:

$$\frac{U\phi}{k} = a * (N_{RE})^b * N_{\frac{1}{P^3}} * \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right) m$$

$$\frac{U(0,30m)}{50,2 \frac{J}{msK}} = (0,54 * (2739,15)^{2/3} * 7,31^{1/3} * \left(\frac{0,02585}{1 * 10^{-3}} \right)^{0,14})$$

$$U = \frac{\left(0,54 * (2739,15)^{2/3} * 7,31^{1/3} * \left(\frac{0,02585 Pa.s}{1 * 10^{-3}} \right)^{0,14} * 50,2 \right)}{0,3m}$$

$$U = 53,604 \frac{KJ}{s m^2 K}$$

4.4. Cálculo de la media logarítmica de temperatura

$$MLDT = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

$$\Delta T_1 = (93 - 19) = 74$$

$$\Delta T_2 = (55 - 45) = 10$$

$$MLDT = \frac{(10 - 74)}{\ln \frac{10}{74}}$$

$$MLDT = 31,98 \cong 32 C$$

4.5. Cálculo del flujo de calor

Con los datos determinados en el balance de energía tenemos necesarios para calentar al fluido de la cámara de ebullición a la temperatura deseada una cantidad de 15,94 Kg de vapor, entonces tenemos:

$$Q = m C_p \Delta T$$

$$Q = 3,80 \text{ Kg} * 4,184 \frac{\text{KJ}}{\text{kg C}} * (93 - 95) \text{ C}$$

$$Q = 763,16 \text{ KJ}$$

4.6. Cálculo del área de transferencia de calor

Coefficiente Global de transferencia de Calor U: $3,60 \frac{\text{KJ}}{\text{s m}^2 \text{ K}}$

$$Q = U * A * MLDT$$

$$A = \frac{Q}{U * MLDT}$$

$$A = \frac{763,16 \text{ KJ}}{\left(3,60 \frac{\text{KJ}}{\text{s m}^2 \text{ K}} \right) * 30,5 \text{ K}}$$

$$A = 0,047 \text{ m}^2$$

4.7. Balance de masa y energía

Para la realización del balance de masa se estableció como sistema, la totalidad del proceso es decir la obtención del biodiesel y su post tratamiento (lavado y desecado).

4.7.1. Balance de masa

Con una alimentación de 20 Kg, basándonos en literatura y en la empírica adquirida en las pruebas de laboratorio tenemos las siguientes cantidades de productos obtenidos con esta alimentación:

Para lo cual:

$$\rho_{biodiesel} = 0,93 \frac{g}{ml}$$

$$\rho_{gliserina} = 0,98 \frac{g}{ml}$$

Dónde:

$$V_{biodiesel} = 15,30 L = 14,23 Kg$$

$$V_{gliserina} = 4,32 L = 4,23 Kg$$

- **Balance de masa global de productos**

Luego de dada la reacción y el proceso de lavado en el tanque de lavado y teniendo en cuenta que el porcentaje de metanol y agua por cantidad de palma es del 20 % y 1/3 respectivamente, nos da:

$$A + M + C = B + G + F$$

$$(20 Kg) + (4 Kg) + (6,6 Kg) = (14,23 Kg) + (4,23 Kg) + F$$

$$F = 12,14 Kg$$

Teniendo así una salida de agua de lavado (emulsión de jabón y agua) de 12,14 Kg tomando en cuenta alrededor de un 75 % de rendimiento en la producción de biodiesel después de cuatro lavados y una desecación de 5 min a 112 C.

4.7.2. Balance de energía

Mediante el balance de energía encontraremos la cantidad de vapor necesaria para trabajar a las condiciones óptimas establecidas. Así:

$$-Q_{cedido} = Q_{absorbido}$$

Calor latente cedido de vapor a 93 C

= Calor absorbido por los productos

+ Calor latente del vapor a la temp. De salida

$$V\lambda_{CF} = (B\hat{H}_B + G\hat{H}_G) + V\lambda_{CF}$$

Dónde:

V = es el flujo másico de vapor

B = flujo másico de biodiesel

G = flujo másico de glicerina

λ_{CF} = Calor Latente del vapor a la temperatura de entrada 93 C

λ_{CF} = Calor Latente del vapor a la temperatura de salida 45 C

\bar{H}_B y \bar{H}_G : = Entalpias del Biodiesel y Glicerina respectivamente

De las características del vapor que nos brinda el caldero tenemos:

- Calor Latente del Vapor de agua sobrecalentada brindada por el caldero a una temperatura de 93 C y 10 psia.

$$\lambda_{CF} = 637 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} = 2665,208 \text{KJ} / \text{Kg}$$

- Teóricamente tenemos que la temperatura de salida del vapor será 45 C, teniendo en tablas las propiedades del vapor saturado

$$\lambda_{CF}' = H_V - h_L$$

$$\lambda_{CF}' = (2583,2 - 188,46) \text{KJ} / \text{Kg}$$

$$\lambda_{CF}' = 2394,74 \text{ KJ} / \text{Kg}$$

- Considerando:

$$C_{p \text{ biodiesel}} = 568,4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol C}} \cong 2,22 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg C}}$$

$$C_{p \text{ gliserina}} = 213,7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol C}} \cong 2,32 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg C}}$$

El balance de energía nos queda:

$$V \lambda_{CF} = \left(B \int_{T_1}^{T_2} C_p dT + G \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \right) + V \lambda_{CF}$$

$$\left(2665,21 \frac{KJ}{Kg} \right) V = \left(\left(12,41 Kg * 2,22 \frac{KJ}{Kg C} * (55 - 19) C \right) + \left(2,62 Kg * 2,32 \frac{KJ}{Kg C} * (55 - 19) C \right) + \left(2394,75 \frac{KJ}{Kg} \right) V \right)$$

$$270,46 V = 991,8 + 218,82$$

$$270,46 V = 1210,62$$

$$V = 4,48 Kg$$

Siendo la densidad del vapor proporcionado por la caldera 0,99838 Kg / L a la temperatura referencial de 19 C, se necesita 4,49 L de vapor para el proceso de obtención de biodiesel por Transesterificación a una temperatura de 55 C

4.8. Resultados

4.8.1. Caracterización de las materias primas

DETERMINACIÓN	UNIDADES	RESULTADOS
Densidad	g/ml	1,05
Viscosidad	g/cm s	0,2585
Capacidad calorífica	KJ/Kg K	14,19

Tabla 4.1: Análisis físico y químico de las materias primas

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

4.8.2. Caracterización del biodiesel

DETERMINACIÓN	UNIDADES	RESULTADOS
Densidad	g/ml	0,93
Viscosidad	g/cm s	2,22
Capacidad calorífica	KJ/Kg K	3,2

Tabla 4.2: Análisis físico y químico del biodiesel

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

4.8.3. Caracterización de la glicerina

DETERMINACIÓN	UNIDADES	RESULTADOS
Densidad	g/ml	0,98
Capacidad calorífica	KJ/Kg K	2,32

Tabla 4.3: Análisis físico y químico de la glicerina

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

4.8.4. Determinación de la temperatura de trabajo

Para la realización de las corridas correspondientes a la determinación de la temperatura óptima de trabajo se procedió a mantener constante el volumen de aceite de palma inicial con 150 ml y de igual manera los porcentajes de concentración de metanol y sosa por litro de aceite alimentado.

	Temperatura (±2 C)	Metanol (%)	NaOH (g)/ L de aceite	Tiempo de Reacción (min)	Vol. Biodiesel (ml)	Vol. Gliserina (ml)	Rendimiento (% vol. Bio/ Vol. Ac)	Agitación	
								Velocidad	Tiempo (min)
1	50	20	0,525	7:31	105,90	20,00	73,30	Media	5-8
2	50	20	0,525	8:28	107,90	18,20	71,90	Media	5-8
3	50	20	0,525	8:10	112,50	21,00	75,00	Media	5-8
4	55	20	0,525	3:30	109,00	20,50	72,60	Media	5-8
5	55	20	0,525	3:41	106,50	19,70	71,00	Media	5-8
6	55	20	0,525	3:59	107,90	19,90	71,90	Media	5-8
7	60	20	0,525	4:11	107,50	21,50	71,60	Media	5-8
8	60	20	0,525	4:23	113,10	20,60	75,40	Media	5-8
9	60	20	0,525	4:18	102,00	20,80	68,60	Media	5-8

Tabla 4.4: Determinación de la temperatura de trabajo

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

La determinación de esta temperatura está directamente relacionada al tiempo de reacción más que al rendimiento de la cantidad de biodiesel producido debido a que, a estas condiciones de trabajo especialmente en cuanto a concentraciones de reactivos el biodiesel obtenido tiene un alto

porcentaje de jabón emulsionado siendo necesario más número de lavados en el proceso de purificación, así como una elevada temperatura de secado corriendo el riesgo de pérdidas por ebullición. La temperatura óptima de reacción es 55 C.

4.8.5. Determinación de la concentración del catalizador

Para la realización de las corridas correspondientes a la determinación de las concentraciones de catalizador óptima de trabajo se procedió a mantener constante el volumen de aceite inicial con 150 ml y la temperatura de trabajo de 55 C.

n	Temperatura (±2 C)	Metanol (%)	NaOH (g)/ L de aceite	Tiempo de Reacción (min)	Vol. Biodiesel (ml)	Vol. Gliserina (ml)	Rendimiento (% vol. Bio/ Vol. Ac)	Agitación	
								Velocidad	Tiempo (min)
1	55	20	1,6	3:27	115,60	23,10	77,10	Const.	5-8
2	55	20	1,6	3:42	120,00	19,30	80,00	Const.	5-8
3	55	20	1,6	3:15	112,00	20,40	74,60	Const.	5-8
4	60	20	1,6	3:23	118,20	21,60	78,80	Const.	5-8
5	60	20	1,6	3:40	113,00	23,00	75,30	Const.	5-8
6	60	20	1,6	3:02	108,70	22,00	72,50	Const.	5-8

Tabla 4.5: Determinación de la concentración del catalizador

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

Se añadió un gramo en las pruebas a razón de los datos son los que arrojo el porcentaje de acidez del aceite (4.6 %) siendo el recomendado para su utilización como materia prima para la obtención de biodiesel alrededor de 3 % de acidez.

4.8.6. Cantidad de productos por litro de aceite de palma

PRODUCTO	PORCENTAJE (%)
Biodiesel	76,47
Glicerina	22,3

Tabla 4.6: Cantidad de productos por litro de aceite de palma

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

4.8.7. Cantidad de agua de lavado

CANTIDAD
1/3 del Vol. Inicial de aceite

Tabla 4.7: Cantidad de agua de lavado

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

4.8.8. Cantidad de vapor requerida

CANTIDAD	UNIDADES
3,8	Kg
3,81	L

Tabla 4.8: Cantidad de vapor requerida

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

4.8.9. Características biodiesel

PARAMETRO	CANTIDAD	UNIDADES
Gravedad API	27,2	Adimensional
Punto de Inflamación	72	C

Tabla 4.9: Características biodiesel

Fuente: Coleman Stuart "Modelos de rectores industriales", editorial Sutra, 4ta ed., 2011

4.9 Diseño

4.9.1 Consideraciones de diseño

4.9.1.1 Consideraciones generales

- **Tipo de proceso.** El proceso de transesterificación que se llevará a cabo en el prototipo podrá considerarse por lotes (batch) aún y que, si después del tiempo de reacción se trasfiere la carga del reactor a otro tanque para que se separen la glicerina y el biodiesel, inmediatamente se puede iniciar una nueva carga.
- **Tamaño del prototipo.** El prototipo diseñado y construido como objetivo principal de este trabajo de tesis, representa el escalamiento a equipo piloto del proceso estudiado a nivel laboratorio. Las características de los materiales en que se construirá, la instrumentación y los sistemas de control para su operación servirán de modelo (prototipo), en caso de que se quiera reproducir el proceso a escala industrial. En este caso particular, se diseñó para una capacidad máxima de producción de biodiesel de ocho litros por lote.
- **Suministro de las sustancias.** A través de la acción de la gravedad se van a verter las sustancias que intervienen en la reacción, con esto, se anula el uso de un dispositivo de bombeo.

A partir de la etapa de experimentación, fueron incrementándose las consideraciones a tomar en cuenta.

- Se garantiza una buena separación de biodiesel y glicerina a una temperatura de reacción entre 55 – 60 °C. Esto conlleva a mantener la temperatura en el reactor dentro del rango especificado, mediante el uso de resistencia eléctrica de calentamiento tipo banda.
- En particular, el aceite tiene un punto de fusión de 23 °C, haciendo necesario un precalentamiento del aceite antes de ser incorporado al reactor.
- Observar la separación de biodiesel y glicerina a través de una mirilla.

Las siguientes consideraciones se hicieron atendiendo al manejo de la sosa cáustica, la cual es muy corrosiva y no puede estar en contacto con ciertos metales, además de ser hidrocópica.

- Se va a disponer de metóxido ya preparado (mezcla metanol-sosa) en un recipiente.
- El material de construcción de los recipientes contenedores de aceite y metóxido, así como el reactor, es lámina de acero inoxidable.
- La tubería por donde se transfieren el aceite, el metóxido, la glicerina y el biodiesel, son de acero inoxidable. Los dispositivos encargados de controlar el flujo son válvulas solenoide de características dadas más adelante.

La figura 4.1 muestra el diseño general del prototipo, la hoja técnica se presenta en el anexo

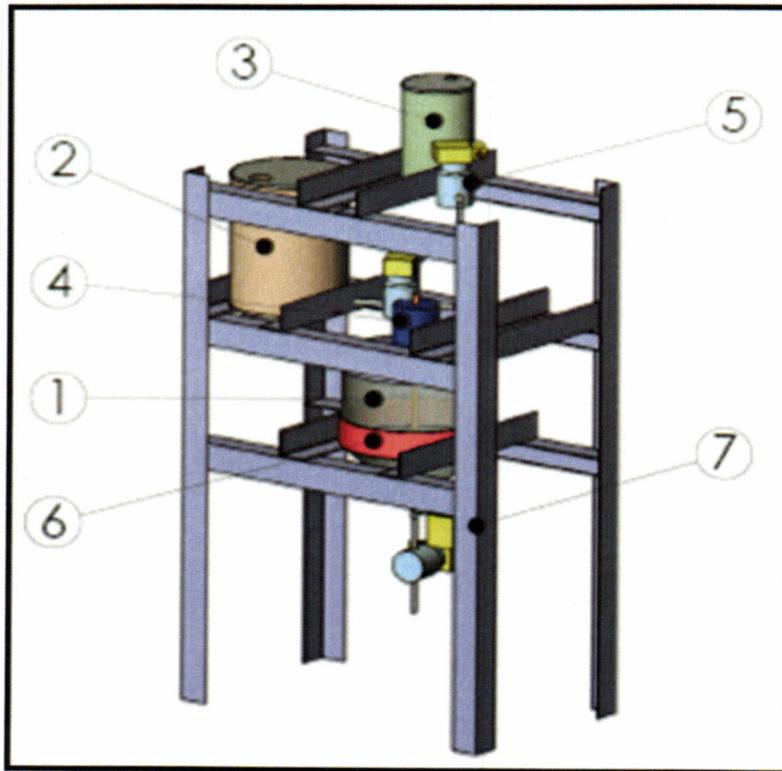


Figura 4.1: Diseño general del prototipo

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

Lista de componentes principales:

1. Reactor
2. Recipiente contenedor de aceite
3. Recipiente contenedor de metóxido
4. Motor agitador
5. Válvula solenoide

6. Resistencia eléctrica de calentamiento

7. Armadura de soporte

4.9.2 Detalles de los componentes

Los componentes que integran el prototipo fueron diseñados siguiendo las consideraciones generales planteadas en la sección anterior y en base a particularidades que serán descritas en este apartado. La selección de las válvulas, resistencia eléctrica y el motor del agitador fueron hechas a partir de cálculos realizados para tal fin.

4.9.2.1 Reactor

La reacción de transesterificación para producir biodiesel se propicia en el reactor. Durante el tiempo de reacción se mantiene la mezcla en agitación, así como a la temperatura dentro del intervalo especificado. El tiempo de reacción y de agitación es de 25 minutos. Culminada la agitación, se deja reposar la mezcla en el mismo reactor para que se logre la separación de glicerina y biodiesel por diferencia de densidades. Como mínimo se requieren de 4 horas para garantizar que se ha precipitado la totalidad de la glicerina, de acuerdo a los análisis reflejados anteriormente.

La glicerina se precipita en el fondo del reactor, por tal razón, es conveniente que la forma de dicho reactor sea parecida a un embudo, es decir de forma cónica, con ello permitirá drenar su contenido con mayor facilidad.

Considerando el tamaño del prototipo, el reactor se diseñó para manejar hasta un volumen de 8 litros de mezcla aceite-metóxido. Poniendo atención que al agitar, el nivel de la mezcla se incrementa.

En la figura 4.2 se observa el dibujo del reactor. La hoja de diseño se puede ver en el anexo

La tapa presenta tres orificios, el orificio central es donde se introducirá el vástago del motor agitador. Los orificios que se encuentran a los lados son para conectar con los recipientes de aceite y metóxido, mediante la tubería de acero inoxidable.

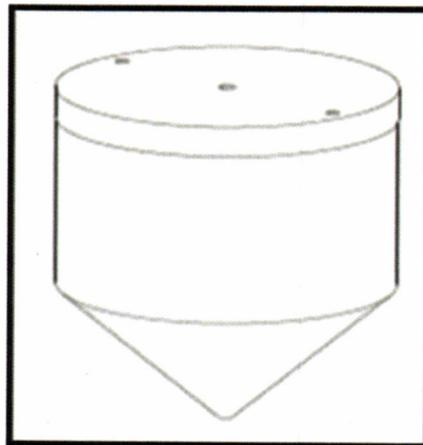


Figura 4.2: Reactor

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

Cálculo del volumen total del reactor

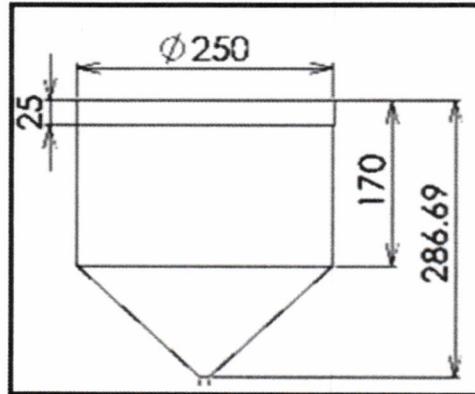


Figura 4.3: Dimensiones del reactor

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

- **Parte cilíndrica**

$$v_1 = \frac{\pi D_2}{4} a = \frac{\pi (250\text{mm})^2}{4} (170\text{mm}) = 8.34 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

- **Parte cónica**

$$v_1 = \frac{\pi D_2}{12} a = \frac{\pi (250\text{mm})^2}{12} (117\text{mm}) = 2.04 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Volumen Total: $10.38 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 10.388 \text{ litros}$

4.9.2.2 Recipiente contenedor de aceite

Para almacenar el aceite vegetal se diseñó un recipiente de lámina de acero inoxidable. El dibujo técnico se contempla en el anexo



Figura 4.4: Recipiente de aceite

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

Observando la figura 4.4 se denota lo siguiente:

- Forma cilíndrica. Permite calcular con mayor facilidad el volumen del aceite si se conoce su altura dentro del recipiente.
- Contiene una tapa que evitará el alojamiento de polvo y basura en la superficie del aceite.
- El orificio en la parte lateral, es la salida del aceite.

Cálculo del volumen

Volumen del recipiente de forma cilíndrica, se obtiene:

$$v_1 = \frac{\pi D_2}{4} a = \frac{\pi (200mm)^2}{4} (250mm) = 7.85 \times 10^6 mm^3$$

Volumen= 7.85 litros

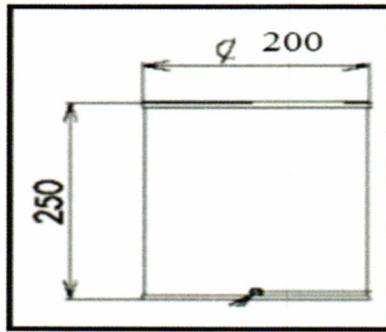


Figura 4.5: Dimensiones del recipiente de aceite

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

4.9.2.3 Recipiente contenedor de metóxido

La mezcla de metanol y sosa cáustica se le conoce como metóxido, el cual estará contenido en un recipiente de lámina de acero inoxidable. En el anexo quedan definido el dibujo técnico de este componente.

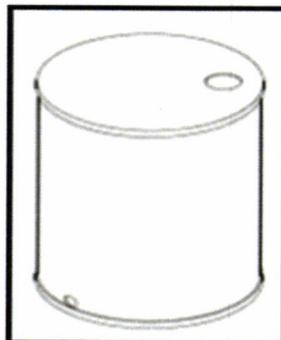


Figura 4.6: Recipiente contenedor de metóxido

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

En la figura 4.6 se aprecia que el recipiente es de forma cilíndrica, contiene una tapa y un orificio en la parte lateral inferior para la salida del metóxido

Cálculo del volumen

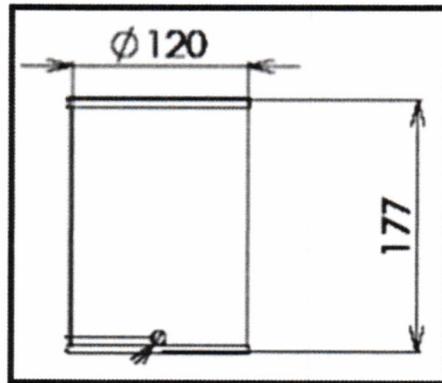


Figura 4.7: Dimensiones del recipiente contenedor de metóxido

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

El volumen se calcula de la misma manera que en el caso anterior

$$v_1 = \frac{\pi D_2}{4} a = \frac{\pi (120\text{mm})^2}{4} (177\text{mm}) = 2 \times 10^6 \text{mm}^3$$

Volumen = 2 litros

4.9.2.4 Motor del agitador

El cálculo para conocer la potencia del motor del agitador, tuvo como punto de partida la conclusión hecha en la etapa de experimentación; la intensidad de la agitación no es un factor determinante en la obtención de biodiesel, basta con que ésta sea suficiente para mantener una mezcla homogénea que favorezca el contacto de los reactivos, sobre todo en las etapas donde la viscosidad de la mezcla se incrementa. Se eligió hacer uso de un motor eléctrico monofásico de 1800 rpm, considerando que es muy común en el mercado.

El motor se acopla a un impulsor tipo paletas inclinadas, el cual causa que el movimiento del líquido sea de forma radial y tangencial, así como también exista un movimiento vertical con respecto al vástago del agitador.

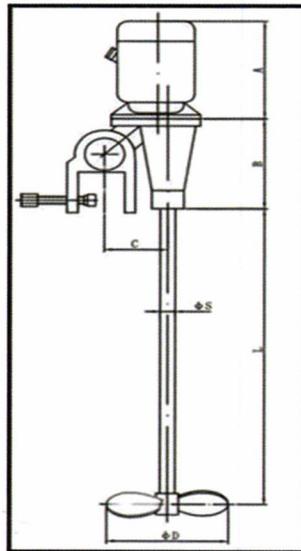


Figura 4.8: Impulsor del motor agitador

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

El procedimiento de cálculo de la potencia del motor necesaria para que se logre la agitación, consiste en determinar el número de Reynolds (Re), el número de potencia (Np) y por último, la potencia en hp.

Calcular número de Reynolds

Datos:

N = Velocidad nominal del motor = 1800 rpm = 30 rps

ρ = Densidad del aceite = 0.92 g/cm³ = 920 kg/m³

D = Diámetro del impulsor = 7 cm = 0.07 m

μ = Viscosidad del fluido = 626 cSt = 6.26 cm²/s

Al inicio de la agitación aceite – metóxido, se incrementa considerablemente la viscosidad de la mezcla. Además, la viscosidad del aceite cambia con respecto a la temperatura. Para tener un cálculo que abarcara estas problemáticas, se dictaminó utilizar el valor de viscosidad de la glicerina. Glicerina y biodiesel se encuentran mezclados al final de la agitación, de los cuales, la glicerina tiene una mayor viscosidad.

Calcular potencia del motor

$$P = N_p \rho N^3 D^5$$

$$P = 1.8(920)(30)^3 (0,07)^5$$

$$P = 75,1475W$$

$$P = 75,1475W \left(\frac{1hp}{745.7W} \right) = 0,100774hp = \frac{1}{10} hp$$

4.9.2.5 Válvulas solenoide

El diseño general del prototipo contempla el uso de válvulas solenoide para permitir el flujo de aceite, metóxido y en la separación de glicerina y biodiesel.

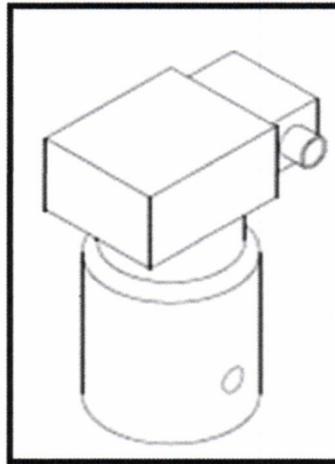


Figura 4.9: Válvula solenoide

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

La elección de la válvula se realizó tomando en cuenta los siguientes parámetros:

Presión diferencial. Se llama presión diferencial o caída de presión o pérdida de carga, a la diferencia de presiones estáticas entre la entrada y la salida de la válvula. El símbolo para indicarla es ΔP .

Máxima presión diferencial. Es la que se establece cuando la válvula está cerrada. Cuando esta presión supera el valor máximo indicado para cada modelo de válvula, ésta no puede operar.

Mínima presión diferencial. En las válvulas servo-operadas es necesaria una presión diferencial mínima para abrir y permanecer abiertas. En cambio las de acción directa y ancladas prescinden de este requisito.

Como se mencionó anteriormente, la válvula seleccionada presenta una ΔP mínima de 0 bar y una ΔP máxima de 0.1 bar. Si la caída de presión en alguna de las válvulas instaladas, rebasa el valor de 1 bar, ésta no funcionaría. Motivado por esta circunstancia, se calculó la caída de presión máxima para cada válvula, con la finalidad de garantizar el buen funcionamiento.

- **Cálculo de caída de presión en cada válvula**

La realización de estos cálculos se hizo empleando la ecuación

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2$$

Dónde:

ΔP = Caída de presión en bar

γ = Peso específico del líquido en g/cm³

Q = Caudal volumétrico en m³/h

Kv = Coeficiente de flujo de la válvula en m³/h

Para hacer los cálculos de la caída de presión, habría que conocer el caudal volumétrico, dato que se encontró utilizando dos ecuaciones, la primera es de acuerdo al teorema de Torricelli:

$$V_2 = \sqrt{2g_1a}$$

Dónde:

V_2 = Velocidad a la salida del recipiente

g_1 = Aceleración de la gravedad

a = Altura del líquido o fluido

La segunda ecuación es la definición del caudal:

$$Q = AV^2$$

Dónde:

Q = Caudal volumétrico

A = Área de sección transversal por donde pasa el fluido

V_2 = Velocidad del fluido

Para todos los casos, el área de sección transversal a la que hace referencia la ecuación, es el área interna del tubo de 3/8 in. En donde el diámetro interno es de 9.52 mm (3/8 in)

Se consideró tomar la máxima altura del líquido en el recipiente o reactor, según corresponda el caso.

- **Reactor principal**

$$V_2 = \sqrt{2g_1 a} = \sqrt{2(9,81)(0,28)} = 2,34384 \frac{m}{s}$$

$$Q = AV_2 = \frac{\pi(0,00952)^2}{4} (2,3438) = 0,000167 \frac{m^3}{s} = 0,167 \frac{l}{s}$$

- **Recipiente del aceite**

$$V_2 = \sqrt{2g_1 a} = \sqrt{2(9,81)(0,25)} = 2,21 \frac{m}{s}$$

$$Q = AV_2 = \frac{\pi(0,00952)^2}{4} (2,21) = 0,000157 \frac{m^3}{s} = 0,157 \frac{l}{s}$$

- **Recipiente del metóxido**

$$V_2 = \sqrt{2g_1 a} = \sqrt{2(9,81)(0,18)} = 1,879 \frac{m}{s}$$

$$Q = AV_2 = \frac{\pi(0,00952)^2}{4} (1,879) = 0,000134 \frac{m^3}{s} = 0,134 \frac{l}{s}$$

Después de determinar el valor del caudal volumétrico a la salida de cada componente, se continuó con la valoración de la caída de presión, contemplando: El peso específico y del aceite es de 0.92 g/cm^3 ; para el alcohol etílico o metílico es de 0.79 g/cm^3

El coeficiente de flujo de la válvula seleccionada es de 2.35 (adimensional)

- **Reactor principal**

El peso específico empleado es el del aceite, debido a que es el mayor entre el aceite y el alcohol.

$$Q = 0,167 \frac{l}{s} \left(\frac{1m^3}{1000l} \right) \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 0,6012 \frac{m^3}{h}$$

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{Q}{K_v} \right) = 0,92 \left(\frac{0,6012}{2,35} \right)^2 = 0,06012 bar$$

- **Recipiente de aceite**

$$Q = 0,157 \frac{l}{s} \left(\frac{1m^3}{1000l} \right) \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 0,5652 \frac{m^3}{h}$$

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{Q}{K_v} \right) = 0,92 \left(\frac{0,5652}{2,35} \right)^2 = 0,05321 bar$$

- **Recipiente del metóxido**

$$Q = 0,157 \frac{l}{s} \left(\frac{1m^3}{1000l} \right) \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 0,4824 \frac{m^3}{h}$$

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{Q}{K_v} \right) = 0,92 \left(\frac{0,4824}{2,35} \right)^2 = 0,03328 bar$$

En cada una de las válvulas situadas a la salida del reactor, recipiente de aceite y recipiente de metóxido; la caída de presión no supera el valor

máximo permisible por el modelo de válvula seleccionado. Con esto se asegura que la válvula opere correctamente.

4.9.2.6 Resistencia eléctrica de calentamiento

Se designó hacer uso de dos resistencias eléctricas de calentamiento en el diseño del prototipo. Una de ellas se encarga de realizar un precalentamiento del aceite, la otra mantiene la reacción en un rango de temperatura.

El siguiente paso consistía en seleccionar el tipo de resistencia, así como la energía calorífica que deba suministrar, esto se hace mediante un cálculo de la potencia eléctrica.

La resistencia usada para calentar la reacción, es de tipo banda y se determinó posicionarla alrededor del diámetro externo del reactor. Se justifica esta determinación debido a no disponer de espacio dentro del reactor, por la incrustación del agitador. En lo que se refiere al precalentamiento del aceite, puede ocuparse de una resistencia sumergible, sin embargo por cuestiones de presupuesto, se optó emplear la resistencia de una cafetera eléctrica, la cual es externa de forma circular plana. Esta resistencia se planeó colocarla en la parte inferior del recipiente contenedor de aceite.

- Para un precalentamiento del aceite de 20 a 40 °C, la mezcla aceite-metóxido tendría un calentamiento de 40 a 60 °C, es decir, en ambos casos existiría un incremento de 20 °C. El tiempo en alcanzar la temperatura: 12 minutos. Menor tiempo, mayor es la potencia requerida, por ende, mayor es el costo de la resistencia.

- Dos diferentes materiales se van a calentar. Un material es el de construcción del reactor, el otro es la mezcla aceite-metóxido.
- El calor específico del acero inoxidable, material de construcción del reactor, es distinto al del aceite, tomado como referencia en la mezcla aceite-metóxido. Por lo cual, se harán dos cálculos de la potencia eléctrica y se sumarán sus resultados para obtener una potencia total

En el mercado existen resistencias de 500 y 600 W, por seguridad se eligió una resistencia eléctrica de calentamiento de 600 W.

4.9.2.7 Armadura de soporte

La armadura de soporte fue diseñada para ser construida con perfil laminado de acero, conocido como ángulo de piernas iguales. La sección transversal se muestra en la figura 4.10.

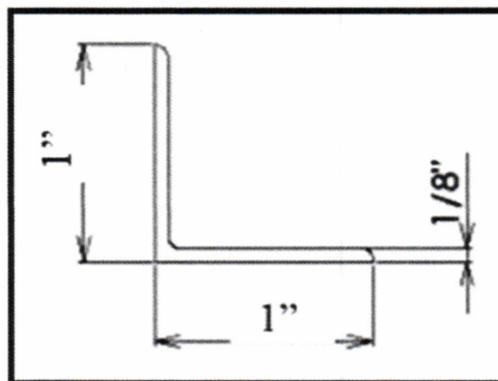


Figura 4.10: Ángulo estructural

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

La consideración hecha acerca del suministro de las sustancias por efecto de la gravedad, dictaminó el diseño de la armadura de soporte.

La posición de los componentes quedó distribuida dentro de la armadura de soporte de tal manera que agrupara, en un espacio reducido, todas las partes del prototipo. La armadura de soporte se puede apreciar en la figura 4.11.

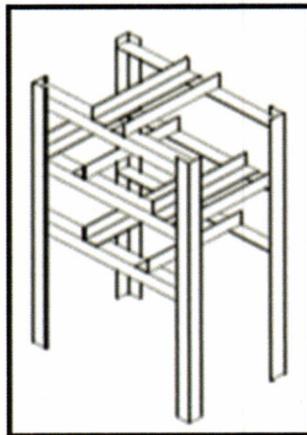


Figura 4.11: Armadura de soporte

Fuente: Berzart Smith Joseph "Diseños aplicados para combustibles", editorial Montreal 2da. Edición, 2013

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

4.10 Pruebas de funcionamiento

Habiendo terminado la construcción y armado del prototipo, se realizaron diferentes pruebas de su funcionamiento variando las condiciones de operación y volúmenes de producción de biodiesel.

Las pruebas de funcionamiento deben atestiguar que se estén realizando cada una de las etapas del proceso y que se obtengan resultados

favorables en la obtención de biodiesel. De esta manera, los pasos que se verificaron en cada una de las pruebas fueron:

1. Comprobar la parte de la evaluación llamada, falta de aceite y/o metóxido.
2. Con los volúmenes necesarios de aceite y metóxido, arrancar la prueba accionando el interruptor de inicio.
3. Verificar lo siguiente, de acuerdo a las etapas del proceso:
 - a. Iniciar con un Pre calentamiento, observar en el multímetro que la temperatura se encuentre en el rango de 40-41°C
 - b. Cuando alcance la temperatura deseada, pasará a la etapa de Vertiendo el aceite y encenderá el led correspondiente
 - c. Continuará con Vertiendo el metóxido
 - d. Agitación y Calentamiento se activarán al mismo tiempo
 - e. Visualizar en el cronómetro que el tiempo agitación sea de 25 minutos
 - f. Cumplido los 25 minutos, empezará la Separación
 - g. A los 3 minutos, se abrirá la válvula de la mirilla, para observar la precipitación de la glicerina
 - h. Después de 4 horas de estar en reposo, se abrirá la válvula a la salida del reactor. Se estará drenando la glicerina.

i. Cuando cense que ha pasado toda la glicerina, se iluminará el led de Cambio de recipiente

j. Cambiar de recipiente para contener al biodiesel producido. A partir de estar drenando el biodiesel, el led de cambio de recipiente parpadeará, haciendo la alusión a que el proceso ha concluido y apagar el interruptor de inicio.

Se hicieron un total de 3 pruebas de funcionamiento, utilizando aceite. Ver tabla 4.10. Las primeras pruebas también fueron útiles para afinar ligeros detalles.

Prueba	Aceite (ml)	Alcohol (ml)	Catalizador (g)	Biodiesel (ml)	Glicerina (ml)	Densidad biodiesel	Ph biodiesel	Temp. °C
1	Soya	Metanol 600	Sosa 13.125	3180	360	0.88	9.5	59-60
2	Coco	Metanol 600	Sosa 13.125	3080	400	0.875	9.5	44-45
3	Higuerilla	Metanol GT 800	Sosa 17.5	4350	500	0.88	9.5	48-50

Tabla 4.10: Pruebas de funcionamiento del prototipo

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

Cabe hacer mención que, con estas pruebas se comprobó la existencia de un escalamiento, en las cantidades de los reactivos usados. En la etapa de experimentación, de este trabajo de tesis, se emplearon volúmenes de 100 y 200 ml de aceite, por 20 y 40 ml de metóxido. A la misma relación aceite-metóxido, en las pruebas de funcionamiento, se elevaron estos volúmenes en 30 y 40 veces.

4.11 Uso del biodiesel obtenido, en un motor diesel

Se llevó a cabo una prueba usando biodiesel al 100% en un motor diesel de un bus urbano de transporte público en Quito. El biodiesel utilizado fue obtenido a partir de aceite en el prototipo construido. El biodiesel se lavó antes de ser incorporado al motor diesel.

El motor diesel empleado para la prueba, es un motor Hino - Mavesa fase 2 del año de 2000. La prueba se efectuó durante 1 hora, observando un arranque correcto del motor, un menor número de revoluciones, con respecto al funcionamiento del motor con diesel de petróleo; el sonido del motor bajó de intensidad y el humo en el escape fue casi incoloro.

4.11.1 Eficiencia del biodiesel en un motor diesel

Por no contar con los instrumentos de medición necesarios, no fue posible valorar la potencia, torque y revoluciones por minuto del motor, usando el biodiesel obtenido en el prototipo construido.

Sin embargo, en la literatura se reportan datos de estudios comparativos en el funcionamiento del motor diesel, empleando biodiesel al 100%, con respecto al diesel del petróleo. Se compararon el comportamiento de los parámetros del motor, al funcionar con diesel y biodiesel, a una velocidad de rotación de 1450 rpm, punto donde llegan a ser máximas las diferencias. Sus resultados denotan que al emplear biodiesel, el torque disminuye un 9.63%, así mismo, la potencia efectiva es menor en un 9.22%. El consumo horario de

biodiesel aumenta un 12.43% con respecto al diesel. El rendimiento del motor, empleando biodiesel, es menor en un 12.33%, que al emplear diesel.

4.12 Cálculos del reactor de biodiesel

El material empleado para la fabricación del reactor de biodiesel fue AISI 304 (acero inoxidable austenítico), debido a la apropiada compatibilidad con las sustancias empleadas en la producción de biodiesel según se muestra en la tabla 4.11.

Material	KOH	Metanol	Glicerina	Ácidos grasos	Sulfato férrico	Diesel
AISI 304	Buena	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Excelente

Tabla 4.11: Compatibilidad de algunos materiales con las sustancias que intervienen en la producción de biodiesel

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

Este material tiene la ventaja de ser una opción económicamente intermedia respecto a otros materiales; además presenta buenas propiedades mecánicas, que lo hace seguro para el diseño tanto de recipientes a presión como para recipientes que contengan fluido. Las propiedades mecánicas del AISI 304 son las siguientes:

Resistencia de fluencia: $\sigma_f = 30000lb / pulg^2 \approx 205N / mm^2$

Resistencia última: $\sigma_f = 7000lb / pulg^2 \approx 480N / mm^2$

4.12.1 Cálculos

Se diseña para operar a la temperatura de 55 - 60°C y a la presión de 4 bar, de acuerdo a su máxima capacidad. Para efectos de cálculo, se consideró que el reactor debe tener un mismo espesor de pared en el cilindro y el cono. Además, se consideró como presión de diseño “P diseño” a la presión de prueba hidrostática que es 1,5 veces la presión de operación. Esta, considera la presión del fluido y de cualquier otra sustancia contenida en el recipiente.

$$P_{operacion} = 3,5 \text{ bar}$$

$$P_{diseño} = 1,5 \times P_{operacion} = 5 \text{ bar} \approx 72,52 \text{ psi}$$

4.12.1.1 Cálculo del espesor del reactor (cilindro y cono)

A continuación, se calculará el mínimo espesor de pared que deben tener las partes del reactor para soportar la presión de diseño y la cantidad de mezcla a contener, para así determinar y luego seleccionar un espesor de pared adecuado. Según la Teoría Membranal, los esfuerzos circunferencial “ σ_{cp} ” y meridional “ σ_{cp} ” que se originan en el recipiente, son máximos en la unión cono-cilindro. Siendo los valores de los esfuerzos máximos los siguientes:

En la parte cónica del recipiente:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{diseño} \times R}{t} + \frac{\gamma \times h_1 \times R}{t}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{P_{diseño} \times R}{2 \times t \times \cos a} + \frac{\gamma \times R}{2 \times t} \left(\frac{h_1}{\cos a} + \frac{R}{3 \operatorname{sena}} \right)$$

En la parte cilíndrica del recipiente:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_{diseño} \times R}{t} + \frac{\gamma \times h_1 \times R}{t}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{P_{diseño} \times R}{2 \times t} + \frac{\gamma \times R}{2 \times t} \left(h_1 + \frac{R}{3} \operatorname{ctga} \right)$$

En la parte cónica del recipiente

$$\sigma_{cp} = \frac{0,5 \times 125}{t \times 0,707} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 260 \times 125}{t \times 0,707} = \frac{88,4}{t} + \frac{0,40}{t} = \frac{88,80}{t}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{0,5 \times 125}{2 \times t \times 0,707} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 125 \times 125}{2 \times t} \left(\frac{260}{0,707} + \frac{125}{2,12} \right) = \frac{44,2}{t} + \frac{29,01}{t} = \frac{73,21}{t}$$

En la parte cilíndrica del recipiente

$$\sigma_{cp} = \frac{0,5 \times 125}{t} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 260 \times 125}{t} = \frac{62,5}{t} + \frac{0,29}{t} = \frac{62,79}{t}$$

$$\sigma_{mp} = \frac{0,5 \times 125}{2 \times t} + \frac{8,81 \times 10^{-6} \times 125}{2 \times t} \left(260 + \frac{125 \times 1}{3} \right) = \frac{31,25}{t} + \frac{0,16}{t} = \frac{31,41}{t}$$

Entonces, el valor del esfuerzo crítico es:

$$\frac{88,80}{t}$$

Luego, aplicando la teoría del máximo esfuerzo cortante y considerando un factor de seguridad igual a 1.5, debe cumplir:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{A/S\ 304}}{1,5} \geq \sigma_{op} = \frac{88,80}{t}$$

$$t \geq \frac{1,5 \times 88,80}{110}$$

$$t \geq 1,21\text{mm}$$

Elegimos: plancha espesor = 1,2 mm de acero inoxidable tipo 304.

4.12.1.2 Esfuerzos en el casco cilíndrico

Nos interesa conocer el estado de esfuerzos en el casco cilíndrico al nivel de los apoyos del recipiente, para hacer un análisis con el esfuerzo que se añade debido a la fuerza originada en los apoyos.

Se consideró que los esfuerzos en el casco cilíndrico situados al nivel de los apoyos (que son originados por la presión del aire comprimido y parte del líquido contenido), son iguales a los máximos esfuerzos que se obtiene en la superficie del cilindro.

Por lo tanto:

$$\sigma_{op} = \frac{62,79}{t} = \frac{62,79}{1,2} = 52,32\text{N/mm}^2 \approx 6124,94\text{lb/pulg}^2$$

$$\sigma_{mp} = \frac{31,41}{t} = \frac{31,41}{1,2} = 26,17\text{N/mm}^2 \approx 3795,63\text{lb/pulg}^2$$

4.12.1.3 Cálculo de la tapa del reactor (cabeza torisférica)

Debido a que la tapa del reactor soporta presión constante en toda su superficie, se calculó el mínimo espesor de pared que debe tener la tapa del reactor para soportar la presión de diseño. Su valor es:

$$t_{\text{mínima}} = \frac{P_{\text{diseño}} \times F \times M}{2 \times \sigma_{\text{AISI 304}} \times U - 0,2 \times P_{\text{diseño}}}$$

Siendo:

$P_{\text{diseño}} = 72,52 \text{ lb / pulg}^2$	$U = 0,55$	$R = 7,87 \text{ pulg.}$
$F = 15 \text{ pulg.}$	$1,125 \text{ pulg.}$	$M = 1,65$

Para ver los valores de U y M determinados, respectivamente. Reemplazando valores:

$$t_{\text{mínima}} = \frac{72,52 \times 15 \times 1,65}{2 \times 15700 \times 0,55 - 0,2 \times 72,52} = 0,100 \text{ pulg.}$$

Se selecciona un disco con espesor de $t_{\text{seleccionado}} = 5 \text{ mm } 0,196 \text{ pulg.}$, que será bombeado y pestañado para formar la geometría torisférica.

Entonces, el cálculo de la máxima presión que puede soportar la tapa torisférica con el espesor de pared seleccionado es:

$$P_{\text{máx}} = \frac{2 \times \sigma_{\text{AISI 304}} \times U \times t_{\text{seleccionado}}}{F \times M + 0,2 \times t_{\text{seleccionado}}} = \frac{2 \times 15700 \times 0,55 \times 0,196}{15 \times 1,65 + 0,2 \times 0,196} = 136,5 \text{ psi} = 9 \text{ bar}$$

4.12.1.4Diseño de soportes

Se realizó considerando que el esfuerzo debido a las fuerzas que se originan en el apoyo, en combinación con los esfuerzos de trabajo del depósito, no deberá ser mayor que el esfuerzo admisible permitido en el depósito.

La fuerza sobre cada apoyo se asumió vertical debido a la simetría existente de los componentes ubicados sobre el reactor y la posición vertical del mismo. Y será igual al peso total que soportan dividido entre el número de cartelas de los apoyos a colocar, que en este caso son 8. Siendo:

$W_{motor} = 1,5kg$	$W_{tapa} = 0,5kg$	$W_{tubo} = 1,3kg$
$W_{liquido} = 10kg$	$W_{accesorios} = 4kg$	$W_{cono} = 0,5kg$

$$F = \frac{Pesototal}{No.cartelas} = \frac{1,5+10+4+0,5+1,3+0,5}{8} = \frac{17,8}{8} = 2,22kg = 4,88lb$$

El momento "M_t" sobre la sección del depósito debido a la fuerza aplicada sobre el apoyo es:

$$F_1 = F \times \cos\theta = 0$$

$$F_2 = F \times \text{sen}\theta = 4,88lb$$

$$M_t = a \times F_2 + b \times F_1 = 1,5 \times 4,88 + 0 = 7,32lb.pulg$$

El ancho efectivo del recipiente "e" en cada lado del apoyo es:

$$e = \frac{\sqrt{t \times r_c}}{2} = \frac{\sqrt{0.114 \times 8}}{2} = 0,477 \text{ pulg}$$

4.12.1.5 Cálculo de cordones de soldadura

Se realizó el cálculo de los cordones de soldadura, estos tendrán propiedades mecánicas equivalente al AISI304. A continuación se muestra el análisis de cálculo de dos de las partes críticas del reactor:

Soporte del reactor: en este caso se trata de cordones frontales longitudinales con un espesor de 3 mm. El valor de las cargas máximas actuantes sobre los cordones son las siguientes:

$$F = 2,22 \text{ kg} = 19,61 \text{ N}$$

$$M_t = 7,32 \text{ lb.pulg} = 0,83 \text{ N.m}$$

En este caso, como condición crítica, estos cordones también tendrán que soportar una fuerza de corte "F_e" originada por el torque del motor, que es máxima momentáneamente en el arranque, "T_a"

Siendo:

$D_e = 9,84" = 250 \text{ mm}$	$T_a = 8,3 \text{ N.m}$
--------------------------------	-------------------------

Puesto que son cuatro apoyos, entonces:

$$T_a = 4F_c(D_e/2)$$

$$F_c = \frac{T_a}{2D_e} = \frac{8,3}{2 \times 250 \times 10^{-3}} = 16,6 N$$

Las cargas varían en el tiempo, ya que cuando termina el proceso el motor deja de funcionar y existe una descarga total del fluido, entonces la carga mínima se halla quitando el peso del líquido y haciendo la fuerza de corte “F_e” igual a cero.

Carga mínima	$F = 13,73 N$	$M_t = 0,58 N.m$	$F_c = 0$
Carga máxima	$F = 19,61 N$	$M_t = 0,83 N.m$	$F_c = 16,6 N$

El cálculo se realizó considerando al reactor como elemento estructural.

Siendo:

$L_1 = 100 mm$	$a = 3 mm$	$c = 50 mm$
----------------	------------	-------------

$$I = \frac{a.L_1^3}{12} = 25 \times 10^4 mm^4$$

$$A = 4.a.L_1 = 1200 mm^2$$

Se realizó el cálculo por resistencia en el punto crítico de uno de los cuatro cordones de soldadura.

CARGA	$m = \frac{M_{l,c}}{1}$ (N/mm ²)	$t_a = \frac{F}{A}$ (N/mm ²)	$t_n = \frac{F_C}{A}$ (N/mm ²)	$\sigma = \frac{m+t_n}{\sqrt{2}}$ (N/mm ²)	$\tau_m = \frac{m+t_n}{\sqrt{2}}$ (N/mm ²)	$\tau_a = t_a$ (N/mm ²)
Máxima	1,196	0,131	0,011	0,85	0,84	0,131
Mínima	0,82	0,088	0	0,58	0,58	0,088

Resistencia: Con los esfuerzos máximos obtenidos, se verifica si cumple con la carga estática.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3(\tau_m + \tau_a^2)} \leq \sigma_{adm} = \frac{\sigma_b}{\beta\gamma}$$

Reemplazando valores:

$$\sigma_{eq} = 1,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm} = \frac{480}{0,8 \times 1,5} = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$400 \geq 1,7 \dots \text{cumple!}$$

Fatiga: Del diagrama de resistencia a la fatiga según Haigh, debe cumplir:

$$\sigma_{A'} = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_{Alt}'} + \frac{\sigma_{eq_m}}{\sigma_{eq_a}} \left(\frac{1}{\sigma_b} \right)} \sigma_{eq_a}$$

Se calcula el esfuerzo medio y el esfuerzo alternante como la semisuma y la semidiferencia entre los esfuerzos mínimo y máximo respectivamente.

Esfuerzo medio (N/mm^2)	Esfuerzo alterante (N/mm^2)
$\sigma = 0,715$	$\sigma = 0,135$
$\tau_m = 0,71$	$\tau_m = 0,13$
$\tau_a = 0,11$	$\tau_a = 0,22$

$$\sigma_{eq_m} = 1,44n/mm^2$$

$$\sigma_{eq_a} = 0,27n/mm^2$$

Cumple:

$$\sigma_{Alt} = \frac{\sigma_b}{2} = 240N/mm^2$$

De tablas	$\nu_1 = 0,35$	$\nu_2 = 0,8$
-----------	----------------	---------------

$$\sigma_{Alt}' = \frac{\nu_1 \nu_2}{FS} \sigma_{Alt} = \frac{0,35 \times 0,8}{1,5} \times 240 = 44,8N/mm^2$$

Entonces, reemplazando valores:

$$\sigma_A' = \frac{1}{\frac{1}{44,8} + \frac{1,44}{0,27} \left(\frac{1}{480} \right)} = 30 \text{ N / mm}^2$$

$$\sigma_A' > \sigma_{eq_a} \dots \text{cumple}$$

4.13 Cálculo estructural

La estructura, se compone de tres partes; la estructura base (sobre la cual va el reactor con todos sus elementos), la estructura superior (que sirve de base del soporte del motorreductor) y el soporte del motorreductor (que va unido a un motorreductor de orientación vertical). La unión entre estos tres elementos estructurales es atornillada.

Los elementos críticos a analizar son el soporte de motorreductor y la estructura base. Para el análisis de estos elementos, se inició realizando el cálculo de las fuerzas externas para posteriormente analizar el estado de esfuerzos de cada elemento.

Las cargas muertas sobre la estructura son las siguientes: el peso total de los reactores con su capacidad máxima de fluido y el motorreductor:

$$W_{\text{motorreductor}} = 1,5 \text{ kg} \approx 9,80 \text{ N}$$

$$W_{\text{metóxido}} = 2 \text{ kg} \approx 16,61 \text{ N}$$

$$W_{\text{transesterificación}} = 10 \text{ kg} \approx 98,06 \text{ N}$$

4.13.1 Cálculo del soporte del motorreductor

Se realizó el cálculo de resistencia de la plancha considerando a las cargas sobre el soporte como puntales y a la plancha como empotrada en sus

extremos (debido a su unión soldada con las cartelas y la plancha inferior que sirve como base).

El motorreductor origina tres cargas sobre la plancha que servirá como soporte.

Las cargas son las siguientes:

- Peso del motorreductor:

$$W_{\text{motorreductor}} = 9,80 \text{ N}$$

- Al trasladar el peso del motorreductor al centro geométrico de la plancha se genera un momento, cuyo valor es:

$$M_W = \text{Distancia} \times W_{\text{motorreductor}} = 90 \text{ mm} \times 9,80 \text{ N} = 0,88 \text{ N.m}$$

- El torque nominal del motorreductor:

$$T_n = 1,3 \text{ N.m}$$

El estado de cargas en la sección transversal de la plancha, origina esfuerzos normales " σ_{T_n} " (debido al torque nominal), esfuerzos cortantes " τ_w " (debido al peso del motorreductor) y esfuerzos de corte " τ_w " (debido al momento torsor generado por el peso del motorreductor).

Se calculó los esfuerzos originados mencionados, para así hallar el esfuerzo equivalente según Von Misses cuyo valor debe ser menor que el esfuerzo de fluencia disminuido por un factor de seguridad.

$$\sigma_{T_n} = \frac{T_n \times a/2}{I_y}$$

El esfuerzo cortante tiene su valor máximo en los bordes de la sección transversal, al nivel del eje neutro.

$$\tau_w = \frac{W_{\text{motorreductor}} \times Q}{I_x \times a} = \frac{1,5 \times W_{\text{motorreductor}}}{A}$$

El esfuerzo cortante máximo se presenta en un punto de la sección transversal que esté menos distante del eje central de la flecha. En el caso particular de una sección rectangular maciza, se presenta en el punto medio de cada lado mayor.

$$\tau_{M_w} = \frac{M_w \times (3a + 1,8b)}{8a^2b^2}$$

Dónde:

$$A = ab \quad I_y = \frac{a^3b}{12}$$

Entonces:

$$\sigma_{T_n} = \frac{1,3 \times 10^3 \times (10 / 2)}{(10^3 \times 150 / 12)} = 0,52 \text{ N / mm}^2$$

$$\tau_w = \frac{1,5 \times 9,80}{10 \times 150} = 0,1 \text{ N / mm}^2$$

$$\tau_{M_w} = \frac{0,88 \times 10^3 \times (3 \times 10 + 1,8 \times 150)}{8 \times 10^2 \times 150^2} = 0,015 \text{ N / mm}^2$$

Por lo tanto, según Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{T_n}^2 + 3(\tau_w^2 + \tau_{M_w}^2)}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0,52^2 + 3(0,25^2 + 0,37^2)} = 0,93 \text{ N / mm}^2$$

Luego, debe cumplir:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{FLUENCIA}}{2} \geq \sigma_{eq}$$

$$125 \geq 0,93 \dots OK !$$

Se realizó el cálculo de la deflexión de la placa (flecha máxima “ $Y_{m\acute{a}x.}$ ” considerando únicamente la deflexión originada por el torque del motorreductor “ T_n ”, ya que para evitar la deflexión debido a la carga del peso del motorreductor se colocó una cartela de refuerzo en el centro de la plancha. La fórmula de la deformación de la plancha debido al torque del motorreductor es

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{1}{6EI} (3M_1x^2 - R_1x^3)$$

Dónde:

I: Momento de inercia de la sección transversal.

E: Módulo de elasticidad del acero estructural ASTM A36.

$l = 374mm$	$a = l/2 = 187mm$	$M_0 = T_n = 1,3N.m$
$E = 200000 \text{ N / mm}^2$	$I = \frac{1}{12} \times 150 \times 10^3 = 12500mm^2$	

$$M_1 = \frac{M_0}{l^2}(4la - 3a^2 - l^2)$$

$$M_1 = \frac{1,3 \times 10^3}{374^2}(4 \times 374 \times 187 - 3 \times 187^2 - 374^2) = -325 \text{ N.mm}$$

$$M_2 = \frac{M_0}{l^2}(2la - 3a^2)$$

$$M_2 = \frac{1,3 \times 10^3}{374^2}(2 \times 374 \times 187 - 3 \times 187^2) = 325 \text{ N.mm}$$

$$R_1 = -6 \frac{M_0}{l^3}(al - a^2)$$

$$R_1 = -\frac{6 \times 1,3 \times 10^3}{374^3}(374 \times 187 - 187^2) = -5,21 \text{ N}$$

$$R_2 = -6 \frac{M_0}{l^3}(al - a^2)$$

$$R_2 = -\frac{6 \times 1,3 \times 10^3}{374^3}(374 \times 187 - 187^2) = -5,21 \text{ N}$$

$$x = l - \frac{2M_2}{R_2} = 374 - \frac{2 \times 325}{5,21} = 249,24 \text{ mm}$$

Para utilizar esta fórmula se consideró empotrado los extremos de la placa, asimismo que la parte inferior de la placa no está soldada con la plancha horizontal y por lo tanto queda libre en toda su longitud.

Entonces:

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{1}{6 \times 20000 \times 12500} (3 \times 325 \times 249,24^2 - 5,21 \times 249,24^3)$$

$$y_{m\acute{a}x} = 1,34 \times 10^{-3} \text{ mm} \dots \text{OK!}$$

4.13.2 Cálculo de la estructura base

Para el cálculo de la estructura se define lo siguiente:

- Se utilizó perfiles L 1"x1"x1/8". El material de la estructura es acero estructural calidad ASTM A370, Grado A36 cuyo esfuerzo de fluencia es:

$$\sigma_{FLUENCIA} = 2530 \text{ kg} / \text{cm}^2 \approx 250 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Motor de Transesterificación: se realizó el cálculo de la fuerza axial al perfil estructural "F_c" originada por el torque del motor de Transesterificación "T_n" de la siguiente manera:

$D_e = 9,84" = 250 \text{ mm}$	$T_a = 3,78 \text{ N.m}$
--------------------------------	--------------------------

Puesto que son cuatro apoyos, como se ve en la figura, entonces:

$$T_a = 4F_c(D/2)$$

$$F_c = \frac{T_a}{2D_e} = \frac{3,78}{2 \times 250 \times 10^{-3}} = 7,55 \text{ N}$$

Amplificando la fuerza en 25%

$$7,55 \times 1,25 = 9,44 \text{ N}$$

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El biodiésel se obtuvo por transesterificación, proceso ácido: base. Se usó metanol como reactivo e hidróxido de sodio como catalizador. En porcentajes del 20 y 0,035% respectivamente.
- Este proceso fue escogido debido a que es el menos costoso y también porque los tiempos de reacción son cortos.
- La temperatura de trabajo se fijó en 55 °C y una agitación de 300 rpms por minuto.
- Este combustible tiene características para que sea considerado como alternativo para su uso en motores de combustión interna en una mezcla B 20. Como subproducto se obtuvo glicerina que puede ser usada en aplicaciones industriales como la cosmética.

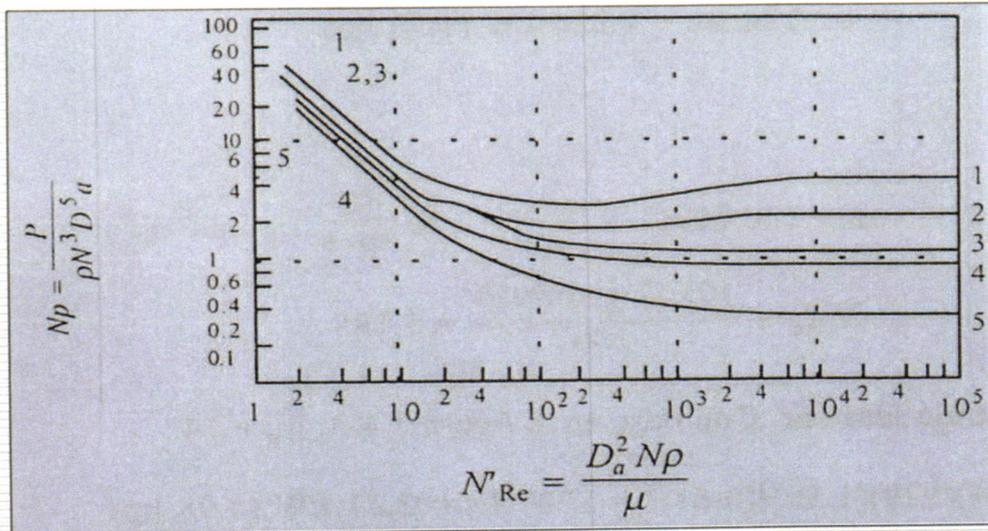
5.2 Recomendaciones

- La transesterificación es un proceso bastante sensible y se recomienda usar las cantidades correctas de los reactivos para que se pueda dar la separación de fases.

- Es necesario abrir el tapón del fondo del tanque a medida que avanza la reacción y dejar salir una pequeña cantidad de producto para constatar la separación de fases.
- Recomendamos cambiar el motor del agitador y colocar un motorreductor para acelerar el proceso de transesterificación del reactor.
- Revisar constantemente la temperatura del reactor para comprobar el correcto funcionamiento del mismo, ya que si sube la temperatura de 65° no se podría dar la separación de fases en la producción.

ANEXOS

Anexo 1: Número de Reynolds



Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores (véase las dimensiones D_a , D_t , J y W).

Curva 1. Turbina de seis aspas planas; $D_a/W = 5$; cuatro deflectores cada uno con $D_t/J = 12$.

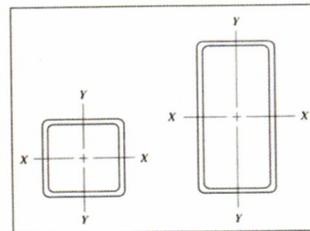
Curva 2. Turbina abierta de seis aspas planas; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.

Curva 3. Turbina abierta de seis aspas a 45° ; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.

Curva 4. Propulsor; inclinación $2D_a$; cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para el mismo propulsor en posición angular y desplazado del centro sin deflectores.

Curva 5. Propulsor; inclinación = D_a . Cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para un propulsor en posición angular desplazada del centro sin deflectores.

Anexo 2: Propiedades de tubería estructural de acero



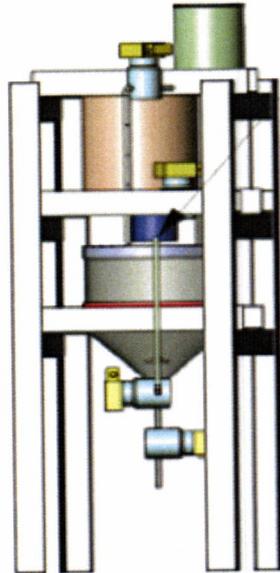
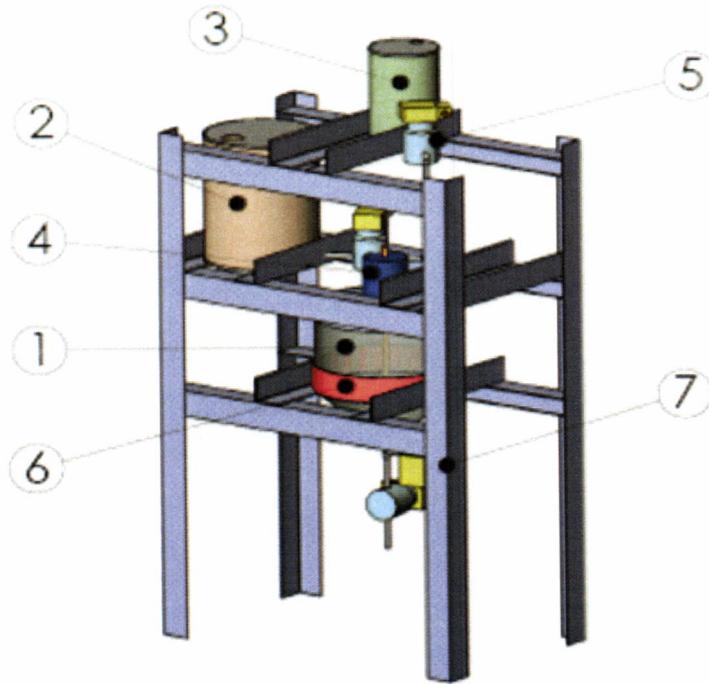
A-9 Propiedades de tubería estructural de acero Cuadrada y rectangular*

Tamaño	Área (plg ²)	Peso por pie (lb)	Eje X-X			Eje Y-Y		
			I (plg ⁴)	S (plg ³)	r (plg)	I (plg ⁴)	S (plg ³)	r (plg)
8 x 8 x 1/4	14.4	48.9	131	32.9	3.03	131	32.9	3.03
8 x 8 x 3/8	7.59	25.8	75.1	18.8	3.15	75.1	18.8	3.15
8 x 4 x 1/4	10.4	35.2	75.1	18.8	2.69	24.6	12.3	1.54
8 x 4 x 3/8	5.59	19.0	45.1	11.3	2.84	15.3	7.63	1.65
8 x 2 x 1/4	4.59	15.6	30.1	7.52	2.56	3.08	3.08	0.819
6 x 6 x 1/4	10.4	35.2	50.5	16.8	2.21	50.5	16.8	2.21
6 x 6 x 3/8	5.59	19.0	30.3	10.1	2.33	30.3	10.1	2.33
6 x 4 x 1/4	4.59	15.6	22.1	7.36	2.19	11.7	5.87	1.60
6 x 2 x 1/4	3.59	12.2	13.8	4.60	1.96	2.31	2.31	0.802
4 x 4 x 1/4	6.36	21.6	12.3	6.13	1.39	12.3	6.13	1.39
4 x 4 x 3/8	3.59	12.2	8.22	4.11	1.51	8.22	4.11	1.51
4 x 2 x 1/4	2.59	8.81	4.69	2.35	1.35	1.54	1.54	0.770
3 x 3 x 1/4	2.59	8.81	3.16	2.10	1.10	3.16	2.10	1.10
3 x 2 x 1/4	2.09	7.11	2.21	1.47	1.03	1.15	1.15	0.742
2 x 2 x 1/4	1.59	5.41	0.766	0.766	0.694	0.766	0.766	0.694

*Datos tomados de varias fuentes. Los tamaños relacionados son una pequeña muestra de los tamaños disponibles.

Ejemplo de tamaño: $6 \times 4 \times \frac{1}{4}$
 6 = peralte vertical (plg), 4 = ancho (plg), $\frac{1}{4}$ = espesor de pared (plg)
 I = momento de inercia, S = módulo de sección, r = radio de giro

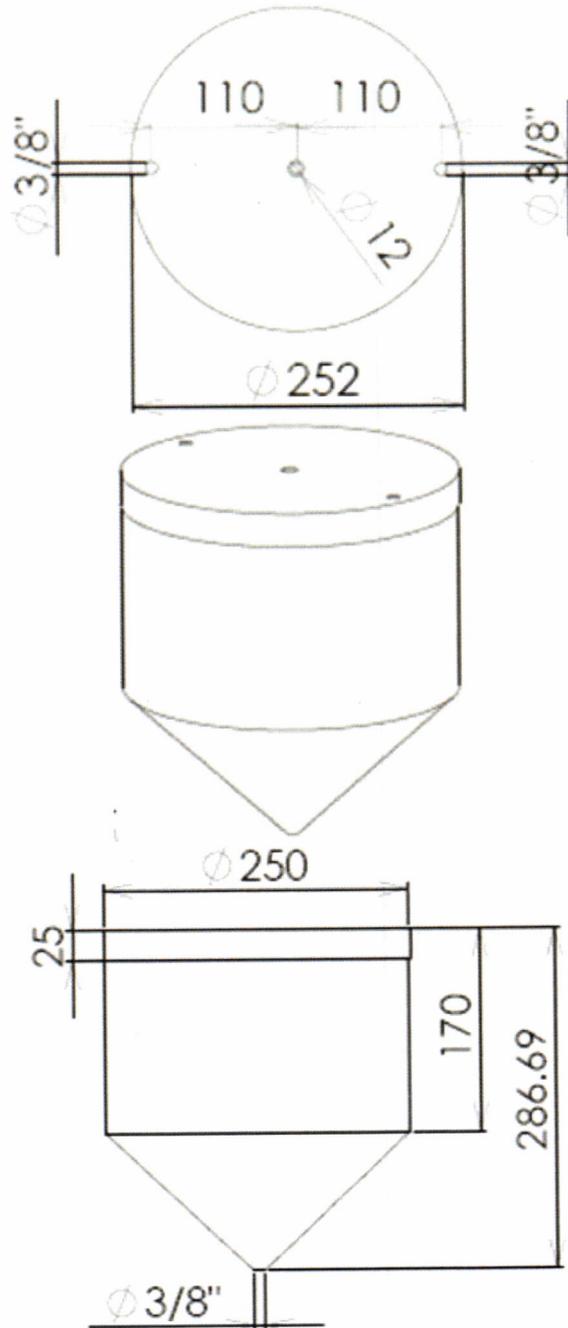
Anexo 3: Diseño general del prototipo



 <p>UIDE UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR</p>	Prototipo	Cantidad: 1	Material: Diverso
	Fabián Abad y Santiago Ortiz		
	Acotación: mm	Escala: 1:10	Fecha: 04/04/14
	Observaciones: Diseño de prototipo para producir biodiesel		

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

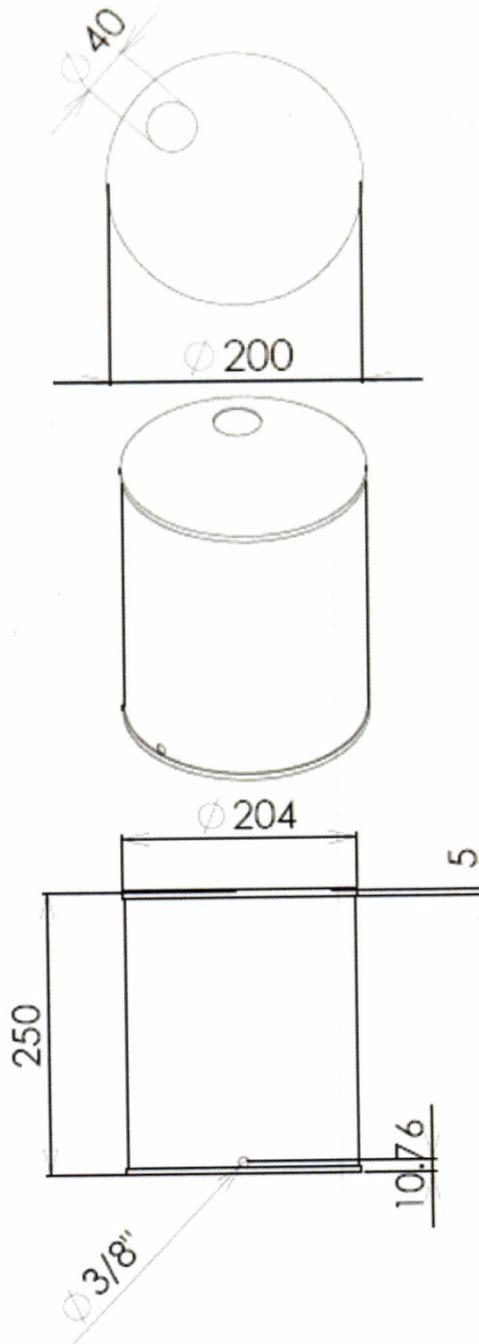
Anexo 4: Diseño del reactor



	Pieza No: 1	Cantidad: 1	Material: A. Inox.
	Fabián Abad y Santiago Ortíz		
	Acotación: mm	Escala: 1:4	Fecha: 04/04/14
	Observaciones: Diseño de prototipo para producir biodiesel		

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortíz

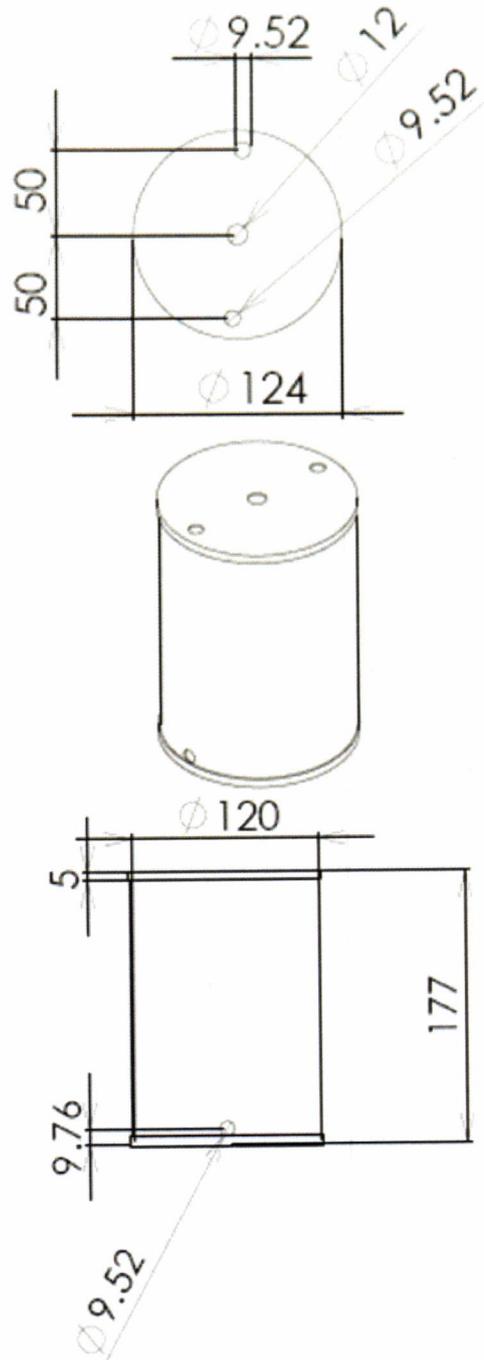
Anexo 5: Diseño del recipiente del aceite



	Pieza No: 2	Cantidad: 1	Material: A. Inox.
	Fabián Abad y Santiago Ortíz		
	Acotación: mm	Escala: 1:4	Fecha: 04/04/14
	Observaciones: Diseño de prototipo para producir biodiesel		

Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortíz

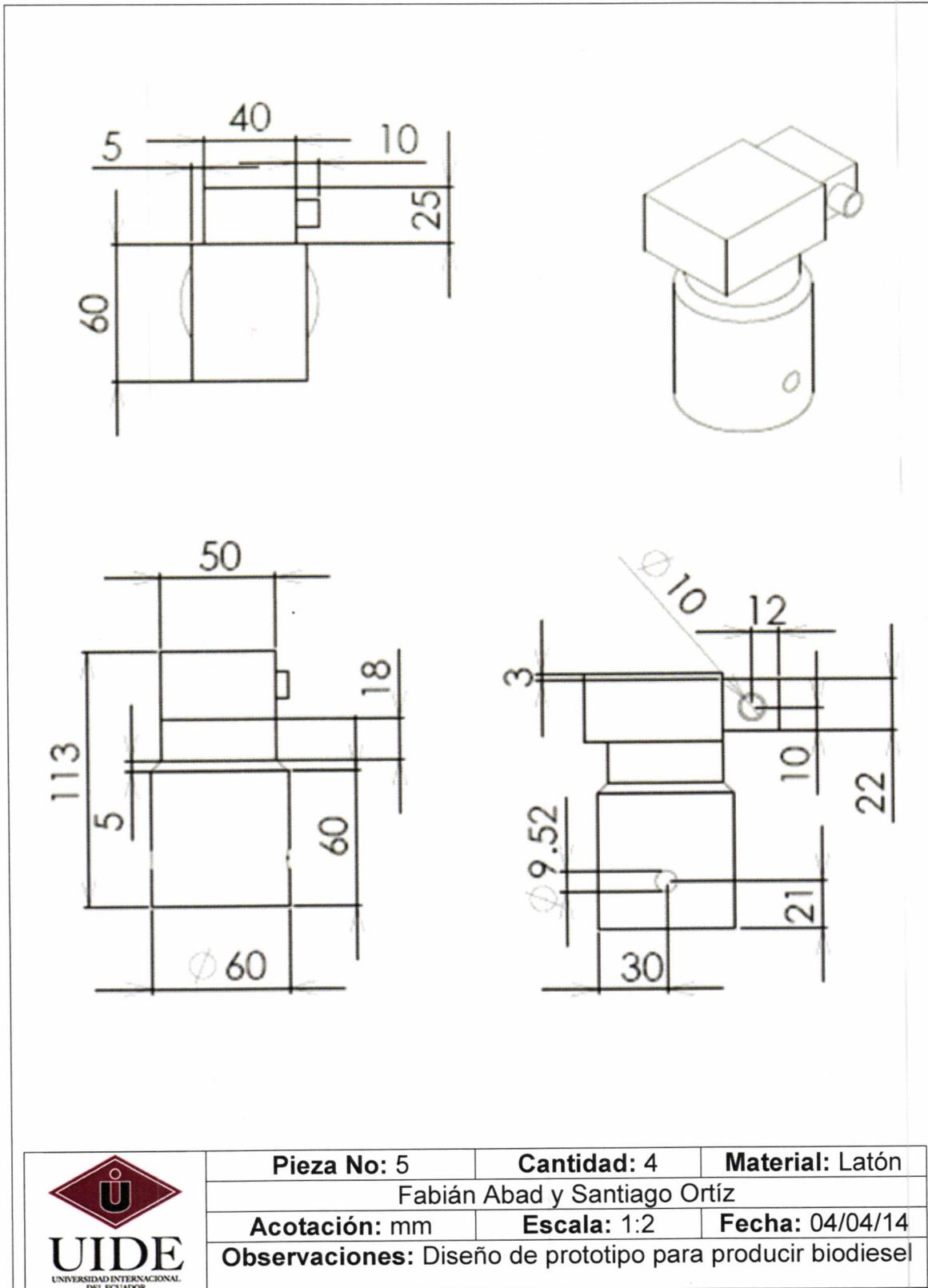
Anexo 6: Diseño del recipiente de metóxido



	Pieza No: 3	Cantidad: 1	Material: A. Inox.
	Fabián Abad y Santiago Ortíz		
	Acotación: mm	Escala: 1:3	Fecha: 04/04/14
	Observaciones: Diseño de prototipo para producir biodiesel		

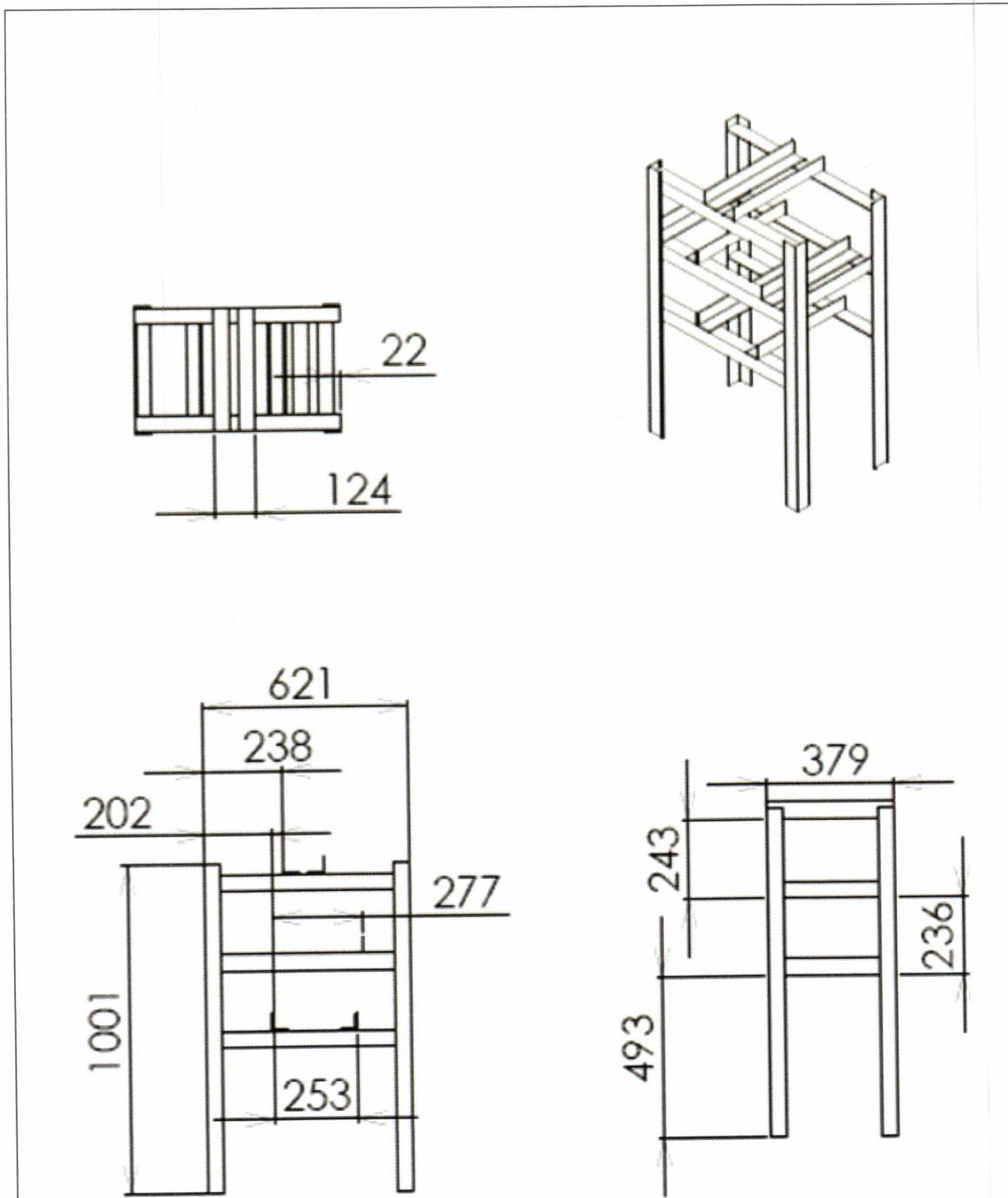
Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortíz

Anexo 7: Diseño de la válvula solenoide



Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

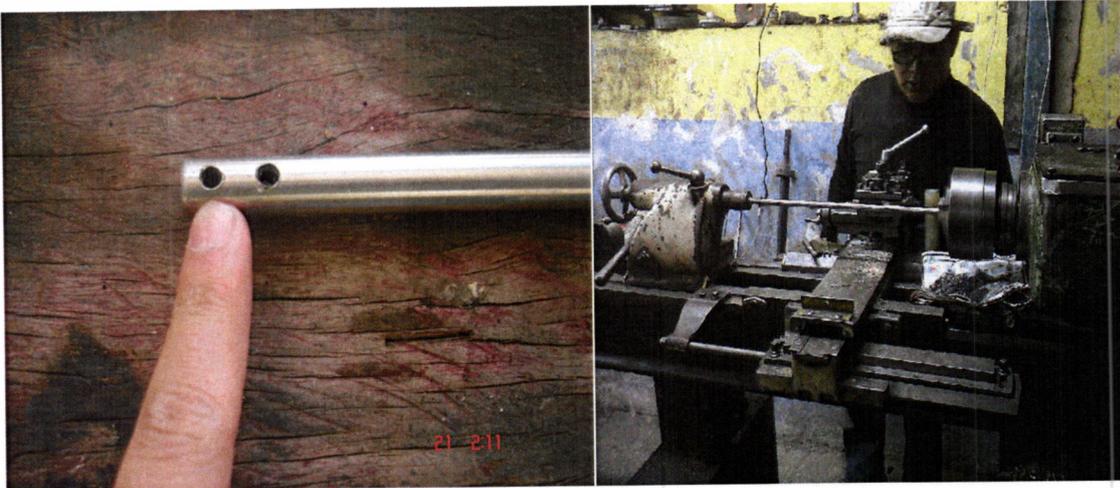
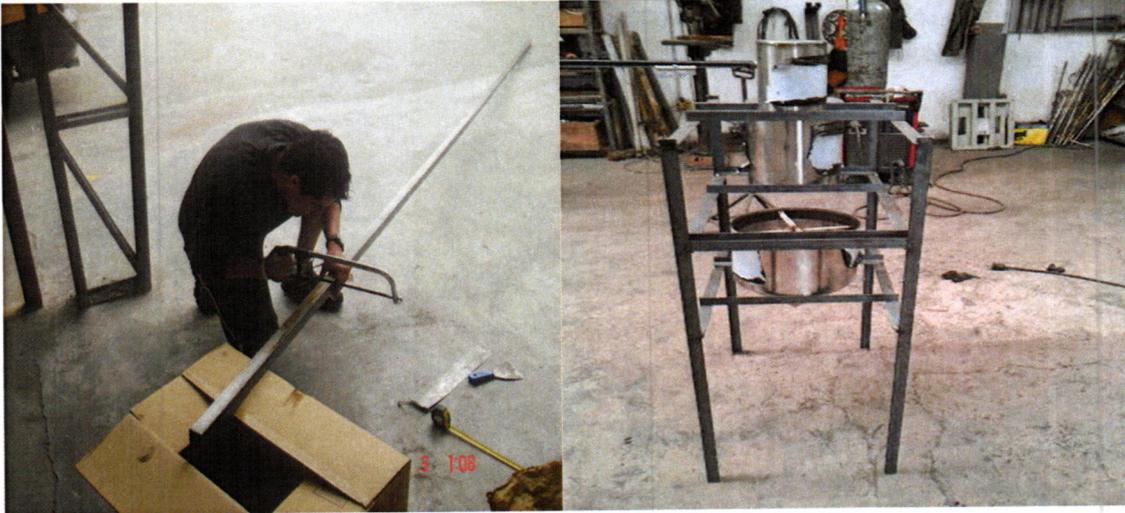
Anexo 8: Diseño de la armadura del soporte



 <p>UIDE UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR</p>	Pieza No: 7	Cantidad: 1	Material: Acero
	Fabián Abad y Santiago Ortiz		
	Acotación: mm	Escala: 1:15	Fecha: 04/04/14
	Observaciones: Diseño de prototipo para producir biodiesel		

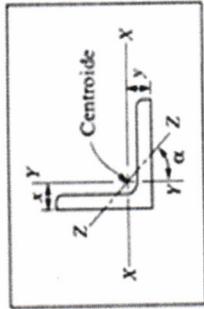
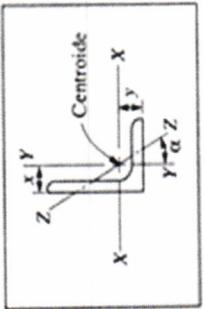
Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

Anexo 9: Elaboración del proyecto



Elaborado por: Fabián Abad y Santiago Ortiz

Anexo 10: Propiedades de los ángulos de acero



A-5 Propiedades de ángulos de acero
Patas iguales y patas desiguales
Perfiles L*

Designación	Área (plg^2)	Peso por pie (lb)	Eje X-X			Eje Y-Y			Eje Z-Z		
			I (plg^4)	S (plg^3)	y (plg)	I (plg^4)	S (plg^3)	x (plg)	r (plg)	α (grados)	
L8 x 8 x 1	15.0	51.0	89.0	15.8	2.37	89.0	15.8	2.37	1.56	45.0	
L8 x 8 x 1/2	7.75	26.4	48.6	8.36	2.19	48.6	8.36	2.19	1.59	45.0	
L8 x 4 x 1	11.0	37.4	69.6	14.1	3.05	11.6	3.94	1.05	0.846	13.9	
L8 x 4 x 1/2	5.75	19.6	38.5	7.49	2.86	6.74	2.15	0.859	0.865	14.9	
L6 x 6 x 1/2	8.44	28.7	28.2	6.66	1.78	28.2	6.66	1.78	1.17	45.0	
L6 x 6 x 1	4.36	14.9	15.4	3.53	1.64	15.4	3.53	1.64	1.19	45.0	
L6 x 4 x 1/2	6.94	23.6	24.5	6.25	2.08	8.68	2.97	1.08	0.860	23.2	
L6 x 4 x 1	3.61	12.3	13.5	3.32	1.94	4.90	1.60	0.941	0.877	24.0	
L4 x 4 x 1/2	3.75	12.8	5.56	1.97	1.18	5.56	1.97	1.18	0.782	45.0	
L4 x 4 x 1	1.94	6.6	3.04	1.05	1.09	3.04	1.05	1.09	0.795	45.0	
L4 x 3 x 1/2	3.25	11.1	5.05	1.89	1.33	2.42	1.12	0.827	0.639	28.5	
L4 x 3 x 1	1.69	5.8	2.77	1.00	1.24	1.36	0.599	0.896	0.651	29.2	
L3 x 3 x 1/2	2.75	9.4	2.22	1.07	0.932	2.22	1.07	0.932	0.584	45.0	
L3 x 3 x 1	1.44	4.9	1.24	0.577	0.842	1.24	0.577	0.842	0.592	45.0	
L2 x 2 x 1/2	1.36	4.7	0.479	0.351	0.636	0.479	0.351	0.636	0.389	45.0	
L2 x 2 x 1	0.938	3.19	0.348	0.247	0.592	0.348	0.247	0.592	0.391	45.0	
L2 x 2 x 1/4	0.484	1.65	0.190	0.131	0.546	0.190	0.131	0.546	0.398	45.0	

* Datos tomados de varias fuentes. Los tamaños relacionados son una pequeña muestra de los tamaños disponibles.

Ejemplo de designación: L4 x 3 x 1/2

4 = longitud de la pata más larga (plg), 3 = longitud de la pata más corta (plg), 1/2 = espesor de las patas (plg)

Z-Z es el eje del momento de inercia mínimo (I) y el radio de giro (r)

I = momento de inercia, S = módulo de sección, r = radio de giro

Anexo 11: Propiedades acero inoxidable

A-14 Propiedades representativas de aceros inoxidables y metales no ferrosos

Material y condición	Resistencia última, s_u		Resistencia a la cedencia, s_y		Porcentaje de alargamiento	Densidad		Módulo de elasticidad, E		
	ksi	MPa	ksi	MPa		lb/plg ³ ¹	kg/m ³	lb/plg ² × 10 ⁻⁶	GPa	
<i>Aceros inoxidables</i>										
AISI 301 recocido	110	758	40	276	60	0.290	8030	28	193	
AISI 301 duro	185	1280	140	965	8	0.290	8030	28	193	
AISI 430 recocido	75	517	40	276	30	0.280	7750	29	200	
AISI 430 duro	90	621	80	552	15	0.280	7750	29	200	
AISI 501 recocido	70	483	30	207	28	0.280	7750	29	200	
AISI 501 OQT 1000	175	1210	135	931	15	0.280	7750	29	200	
17-4PH H900	210	1450	185	1280	14	0.281	7780	28.5	197	
PH 13-8 Mo H1000	215	1480	205	1410	13	0.279	7720	29.4	203	
<i>Cobre y sus aleaciones</i>										
Cobre C14500	suave	32	221	10	69	50	0.323	8940	17	117
	duro	48	331	44	303	20				
Cobre C17000	suave	175	1210	150	1030	5	0.298	8250	19	131
	duro	215	1482	200	1379	2				
Bronce C54400	suave	68	469	57	393	20	0.318	8800	17	117
	duro	75	517	63	434	15				
Latón C36000	suave	49	338	18	124	53	0.308	8530	16	110
	duro	68	469	45	310	18				
<i>Magnesio-fundido</i>										
ASTM AZ 63A-T6	40	276	19	131	5	0.066	1830	6.5	45	
<i>Zinc-fundido ZA 12</i>										
	58	400	47	324	5	0.218	6030	12	83	
<i>Aleación de titanio</i>										
Ti-6Al-4V envejecido	170	1170	155	1070	8	0.160	4430	16.5	114	

¹Esta se puede usar como peso específico o como densidad de masa en lb./plg³.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Fernando, Castro Paula, Cortijo Elsa, Serie Manuales 37, Manual de construcción y uso de reactor para producción de biodiesel a pequeña escala, p. 11, Medidas del tanque y cono; Distancias de la circunferencia para formar el cono.

Acosta Fernando, Castro Paula, Cortijo Elsa, Serie Manuales 37, Manual de construcción y uso de reactor para producción de biodiesel a pequeña escala, Fórmula volumen del cilindro, Fórmula volumen del cono.

ANCUPA-SIGAGRO (2005). Elaboración: SIGAGRO, Tabla 2.3 Producción de biodiesel en el Ecuador.

Efrén, Coello Serrano. Ediciones América, (2004), El Multímetro, p. 5, Definiciones de Amperio, de Ohmio, de Voltio.

García Camús Juan Manuel, García Laborda José Ángel, Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol, p. 56, Tabla 2.4 Propiedades de los Esteres Metílicos Derivados de Aceites.

Gil Martínez, D. Hermógenes. (2004), Manual del automóvil, reparación y mantenimiento, p. 590-594, Definiciones de voltaje, de wattio, generación de trabajo con corriente eléctrica.

Hewitt, Paul G. Física Conceptual. p. 545, Fórmula de potencia.

Hewitt, Paul G. Tercera Edición. Física Conceptual. Capítulo 21 Temperatura, calor y expansión. p. 316, Cálculo del trabajo de la termoresistencia.

Hewitt, Paul G. Tercera Edición. Física Conceptual. Ley de Ohm. p. 537, Ley de Ohm.

Mehlenbacher, V. Análisis de Grasas y Aceites. Madrid: Urmo, (1977), Tabla 2.1 Propiedades del biodiesel.

Smith, C. México: Limusa, (1995), Control Automático de Procesos. 2^a.ed., Fórmula diámetro del agitador.