

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño y construcción de una planta de producción de
Biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado**

Dispositivos Tecnológicos

Julio Paredes Yépez

Martin Vidal Lovato

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 9 de enero de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Diseño y construcción de una planta de producción de Biodiesel a partir de
aceite vegetal reciclado

Julio Paredes Yépez
Martin Vidal Lovato

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

David Escudero, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 9 de Enero de 2017

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento científico certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Julio Francisco Paredes Yépez

Código: 00109124

Cédula de Identidad: 1716893209

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Martín Sebastián Vidal Lovato

Código: 00109227

Cédula de Identidad: 1716135346

Lugar y Fecha: Quito, 9 de enero de 2017

RESUMEN

Los desperdicios de aceite de las cocinas de la Universidad San Francisco de Quito son aprovechados como base para la producción de Biodiesel. Se diseña y construye una planta de procesamiento de Biodiesel cuyo producto sea apto para el uso inmediato en el transporte universitario. La transesterificación, es el proceso químico base que transforma el aceite en biodiesel crudo utilizando la mezcla de Metanol en presencia de Hidróxido de Sodio, produciendo Biodiesel y Glicerol. La planta posee tanques construidos en acero rolado en frío y acero inoxidable 304, acompañados de un tablero eléctrico desde donde se controla la temperatura y procesamiento de cada lote. El análisis del producto final se lleva a cabo mediante cromatografía de capa fina, donde se obtiene un coeficiente de 0.835 demostrando la existencia de Biodiesel en la muestra. La capacidad energética del biocombustible producido es de 40.05 [MJ/kg]. Al final se define una productividad de 93% de la planta, concluyendo que la planta posee un desempeño óptimo durante el procesamiento. Se realiza un análisis económico local y a nivel mundial, en el cual se demuestra el beneficio de utilizar el biodiesel, reemplazando al combustible a base de materia fósil.

Palabras clave:

Biodiesel

Glicerol

Transesterificación

Hidróxido de Sodio

Cromatografía de Capa Fina

Biocombustible

ABSTRACT

Waste cooking oil from the kitchens of the Universidad San Francisco de Quito is used as a basis for the production of Biodiesel. A Biodiesel processing plant is designed and constructed that produces a biofuel suitable for immediate use in the University transportation. Transesterification is the basic chemical process that transforms the oil into crude biodiesel, using the mixture of Methanol in the presence of Sodium Hydroxide, producing Biodiesel and Glycerol. The plant has three tanks built in cold rolled steel, 304 stainless steel and polyethylene, accompanied by an electric panel from which the temperature and processing of each batch is controlled. The analysis of the final product is carried out by thin layer chromatography, where a coefficient of 0.835 is obtained showing the existence of Biodiesel in the sample. The energy capacity of the biofuel produced is 40.05 [MJ/kg]. In the end, a 93% productivity of the plant is defined, concluding an optimum performance during processing. A local and global economic analysis is carried out, demonstrating the benefit of using biodiesel, replacing fuel based on fossil matter.

Key Words:

Biodiesel

Glycerol

Transesterification

Sodium Hydroxide

Thin Layer Chromatography

Biofuel

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
EL BIODIESEL, UNA MEDIDA ALTERNATIVA PARA LA CONTAMINACIÓN MUNDIAL.....	9
PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE Y ESPECIFICACIONES DE BIODIESEL.....	12
OBJETIVO GENERAL.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
DEFINICIÓN DE PROCESAMIENTO DE BIODIESEL	14
MATERIA PRIMA	14
PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE VEGETAL.....	15
<i>Transesterificación</i>	16
<i>Tipos de catalizadores y concentración</i>	16
DEFINICIÓN DEL PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL.....	17
DISEÑO DE LA PLANTA DE BIODIESEL	20
PARÁMETROS DE DISEÑO	20
CRITERIOS DE DISEÑO.....	23
DIMENSIONAMIENTO.....	23
MODELADO GEOMÉTRICO DE LA PLANTA (CAD).....	24
FABRICACIÓN.....	25
CONEXIONES ELÉCTRICAS.....	25
PROCESOS DE PRODUCCIÓN	27
PURIFICACIÓN Y PRECALENTADO.....	27
DESHIDRATADO DE ACEITE.....	29
TITULACIÓN QUÍMICA.....	32
PREPARACIÓN DEL COMPUESTO QUÍMICO.....	34
CALENTADO Y MEZCLA.....	35
LAVADO.....	38
DESHIDRATACIÓN DE BIODIESEL.....	39
ANÁLISIS DEL PRODUCTO FINAL	40
PRUEBAS ORGANOLÉPTICAS.....	40
PRUEBAS DE LABORATORIO.....	41
COMPARACIÓN DE COSTOS DE INSUMOS ENTRE PAÍSES.....	43
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS	53

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL DIÉSEL DEL PETRÓLEO CON LOS ACEITES	10
TABLA 2. PROPIEDADES DEL BIODIESEL VS. DIÉSEL DEL PETRÓLEO	11
TABLA 3. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE BIODIESEL EN DIFERENTES PAÍSES.....	12
TABLA 4. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE VARIOS TIPOS DE MATERIA PRIMA (LEUNG)	14
TABLA 5. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE RECICLADO	15
TABLA 6. RESUMEN DE TIPOS DE CATALIZADORES TOMADA DE D.Y.C LEUNG (2010).....	16
TABLA 7. COMPARACIÓN DE PROPIEDADES ENTRE AGEM Y AGEE	33
TABLA 8. TIPOS DE LAVADOS PARA EL BIODIESEL	38
TABLA 9. CONSUMO DE LA PLANTA	43
TABLA 10. COSTOS DE PRODUCTOS EN ECUADOR	43
TABLA 11. COSTOS DE PRODUCTOS EN EEUU.....	44
TABLA 12. COSTOS DE PRODUCTOS EN ALEMANIA	45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE PROCESO SIMPLIFICADO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL UTILIZANDO UN CATALIZADOR ALCALINO.	18
FIGURA 2. DIAGRAMA DE PROCESO DE LA PLANTA DE BIODIESEL	21
FIGURA 3. DIAGRAMA DE PROCESO GENERAL DE LA PLANTA DE BIODIESEL	22
FIGURA 4. DIAGRAMA DE PROCESO EN LOS TANQUES	22
FIGURA 5. VISTA FRONTAL DE LA PLANTA.....	24
FIGURA 6. VISTA LATERAL DE LA PLANTA DE BIODIESEL	24
FIGURA 7. VISTA TANQUE A	28
FIGURA 8. VISTA NIQUELINA TANQUE A	29
FIGURA 9. VISTA TANQUE B	30
FIGURA 10. VISTA DE NIQUELINAS TANQUE B	31
FIGURA 11. VISTA MOTORES Y ASPAS TANQUE B.....	32
FIGURA 12. VISTA TANQUE C.....	34
FIGURA 13. VISTA VÁLVULAS Y BOMBA TANQUE C.....	35
FIGURA 14. GLICEROL	37
FIGURA 15. VERIFICACIÓN DE PH EN BIODIESEL	40
FIGURA 16. PLACA DE SILICA	41
FIGURA 17. COSTOS POR GALÓN DE COMBUSTIBLE Y BIOCOMBUSTIBLE EN ECUADOR.....	45
FIGURA 18. COSTOS POR GALÓN DE COMBUSTIBLE Y BIOCOMBUSTIBLE EN ALEMANIA, EEUU Y ECUADOR	46

INTRODUCCIÓN

El Ecuador al ser un país petrolero se ha desinteresado en la investigación y el uso de medios alternativos para la producción de combustibles amigables con el medio ambiente o al uso de productos reciclados para la obtención del mismo. Según el ministerio de electricidad y energías renovables para el 2020 el 86% de la electricidad vendrá de generación hidroeléctrica, el 2% de tecnología renovables mientras que el 9% y 3% restante provendrá de energía termoeléctrica e importaciones respectivamente (Peláez, 2015).

El mundo cada día necesita diversas alternativas de energía, es así que cada país se encuentra en la obligación de solventar sus necesidades basadas en los recursos que disponen. En el Ecuador es necesario crear ventajas para la incursión en nuevas alternativas energéticas, crear políticas que favorezcan a la investigación con soportes económicos para universidades y centros de investigación. (Peláez, 2015)

Se puede evidenciar entonces, que en el país no existe cultura de reciclaje, particularmente de aceite vegetal. La Universidad San Francisco de Quito, por ejemplo, provee de los desechos de aceite vegetal a personas externas a la institución.

El biodiesel, una medida alternativa para la contaminación mundial

El biodiesel es un líquido de color amarillo oscuro, con las características de ser biodegradable, no tóxico y poseer emisiones significativamente menores que el diésel realizado a base de petróleo. (Arangu-Olende, 2007). Un estudio demuestra las propiedades del diésel del Petróleo y diferentes aceites vegetales, como se muestra a

continuación, indicando que el Biodiesel puede mejorar sus propiedades de acuerdo a la materia prima que sea utilizada. (Sarmiento, 2008).

Tabla 1. Comparación de las propiedades del diésel del petróleo con los aceites

Propiedad	Diésel del Petróleo	Aceite de Girasol	Éster metílico de girasol	Aceite de colza	Éster metílico de colza
Densidad (15°C) (kg/l)	0.84	0.92	0.89	0.9	0.833
Punto de ignición (°C)	63	215	183	200	153
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	3.2	35	4.2	39	4.8
Número de cetano	45-50	33	47-51	35-40	52
Calor de combustión(MJ/kg)	44	39.5	40	-	40
Punto de enturbiamiento (°C)	0	-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	-	-

Fuente: Biodiesel Handling And Use Guidelines NREL (2001); Los Biocombustibles (M. Campus y F. Marcos).

Se definen también otro tipo de propiedades para el Biodiesel vs. el Diésel de Petróleo.

Tabla 2. Propiedades del Biodiesel vs. Diésel del petróleo

Propiedades	Biodiesel	Diésel
Norma del combustible	ASTM D975	ASTM PS121
Composición	C12-C22 FAME	C10-C21 HC
Metilester	95.5->98% (normas)	-
Agua (ppm peso)	0.05% max.	161
No. Cetano	48-55	40-55
PCI (KJ/Kg)	37,700	41,860
Punto de inflamación (°C)	100-170	60-80
Punto de ebullición (°C)	182-338	188-343

Fuente: *Biodiesel Handling And Use Guidelines NREL (2001); Los Biocombustibles (M. Campus y F. Marcos).*

Se puede realizar un análisis de todas las propiedades que tanto el biodiesel como el diésel del petróleo presentan. Uno de los valores más importantes de las propiedades entre el biodiesel y el diésel del petróleo es el número cetano, pues este define la capacidad que tiene el combustible para encenderse. (Sarmiento, 2008)

La legislación ecuatoriana determina que el cálculo del número cetano, debe realizarse bajo la Norma INEN 1495, analizada en un rango de 30 a 65, tomando en cuenta que es necesario que sus valores superan a un valor de 40. Es necesario recalcar que mientras mayor sea el número cetano, la inversión para mejorar la calidad es mayor.

Ventajas y desventajas del biodiesel

El Biodiesel presenta valores de temperatura de ignición o inflamación mayores que las del diésel de Petróleo, lo cual indica una mayor facilidad de manejo y almacenamiento. (Sarmiento, 2008). La temperatura de ignición del Biodiesel es de

aproximadamente 150°C mientras que la de diésel a base de petróleo es de 52°C. (Krawczyk, 1996).

Mediante la utilización de este combustible, se puede reducir notablemente los gases de efecto invernadero, de tal forma que el uso de B20 (20% Biodiesel-80% Diésel de petróleo) es capaz de reducir los hidrocarburos un 20%, monóxido de carbono 11% y con 0% de emisión de dióxido sulfúrico. Leung et al., menciona que más del 90% del Biodiesel es biodegradable, y en comparación al diésel a base de petróleo, emite una menor cantidad de gases tóxicos (2010).

Las desventajas del Biodiesel son su alta viscosidad, baja volatilidad y la reactividad de cadenas insaturadas de hidrocarburo (Pryde, 1983). La alta viscosidad puede generar problemas con los motores diésel de inyección directa. (Meher et al., 2006).

Propiedades del combustible y especificaciones de biodiesel

Varios países han determinado sus parámetros de calidad para que el Biodiesel puede ser utilizado en la industria automotriz. De acuerdo a eso se presentan las siguientes tablas donde se especifican los requisitos mínimos para que el combustible pueda ingresar al mercado. (Mittelbach, 1996)

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de biodiesel en diferentes países.

Parámetros	Alemania (DIN)	Austria (ON)	Estados Unidos (ASTM)	Francia (publicación oficial)	Italia (UNI)	Republica Checa (CSN)

Densidad a 15°C g/cm ³	0.875-0.89	0.85-0.89	-	0.87-0.89	0.86-0.90	0.87-0.89
Viscosidad a 40 mm ² /s	3.5-5.0	3.5-5.0	1.9-6.0	3.5-5.0	3.5-5.0	3.5-5.0
Punto de Ignición (°C)	110	100	130	100	100	110
CFPP (°C)	0-10/-20	0/-5	-	-	-	-5
Punto de Vertido (°C)	-	-	-	-10	0/-5	-
Número de Cetano	≥ 49	≥ 49	≥ 47	≥ 49	-	≥ 48
Número de Neutralización (mg KOH/g)	≤0.5	≤0.8	≤0.8	≤0.5	≤0.5	≤0.5
CCR (%)	0.05	0.05	0.05	-	-	0.05

Objetivo general

Diseñar y construir una planta de producción de Biodiesel para la Universidad San Francisco de Quito, mediante la reutilización de aceite vegetal obtenido de los restaurantes universitarios, para el aprovechamiento de desechos y reducción de costos de combustible del autobús universitario.

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema mecanizado de producción de Biodiesel, que cumpla con las normas adecuadas para ser utilizado dentro de la Universidad.
- Producir combustible Diésel de alta calidad y de bajo costo.
- Realizar pruebas de laboratorio para determinar la calidad del Biodiesel y de esta forma prevenir daños que puedan generarse en el motor.
- Implementar un sistema que fomente la conservación del medio ambiente y el consumo de energías alternativas.

DEFINICIÓN DE PROCESAMIENTO DE BIODIESEL

Materia prima

El aceite utilizado para la experimentación y el tratado de Biodiesel corresponde al aceite utilizado en la Universidad San Francisco de Quito. El aceite original utilizado es aceite vegetal fabricado con oleínas de palma y aceite puro de soya. A continuación se presentan algunas características de distintos tipos de aceite

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de varios tipos de materia prima (Leung)

Materia Prima	Viscosidad Cinemática (a 40°C)	Densidad (g/cm ³)	Numero de Saponificación	Numero Cetano	Valor de Calentamiento (MJ/kg)	Temperatura de Reacción (°C)	Periodo de Transesterificación (min)	Relación Molecular de aceite/metanol	Cantidad de Catalizador	Porcentaje de Rendimiento
Soya	4.08	0.885	201	52	40	65	90	1:12	CaO 8 (2.03% H ₂ O en Metanol)	>95%
Palma	4.42	0.86-0.9	207	62	34	Ambiente	584	1:11	K/ZnO 5.52	89.2
Maíz	3.39	0.88-0.89	202	58-59	45	80	60	1:9	KOH 1.5	97.9
Aceite Reutilizado	4	-	-	-	-	60	20	1:7	NaOH 1.1	94.6

Es importante recalcar que los índices de aceites reutilizados no pueden ser generalizados, dado que depende del tipo de materia prima de donde provenga.

La humedad y el índice de saponificación obtenidos para la muestra de aceite de la USFQ fueron obtenidos del Laboratorio Seidla:

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas del aceite reciclado

Ensayos Físico Químicos	Método	Unidad	Resultado
Humedad	INEN 39	%	0.03
Índice de saponificación	INEN 40	mg/g	190.51

Leung et al., menciona que el aceite reciclado reduce significativamente el costo de producción del biodiesel, sin embargo las propiedades físicas y químicas del mismo indican que existe una cantidad considerable de agua, impurezas y ácidos grasos libres. A pesar de ello el costo de la materia prima para producir Biodiesel representa el 60-80 % de su valor. (2010)

Producción de Biodiesel a partir de Aceite Vegetal

Existen varios procesos para la producción del Biodiesel, de los cuales Leung et al., clasifica los cuatro más importantes:

- Uso directo y mezcla
- Micro-emulsiones
- Pirólisis
- Transesterificación

Para el diseño de la Planta se elige el proceso de transesterificación tomando en cuenta que a partir del mismo se obtiene un alto número de cetano, las emulsiones son bajas y produce una alta eficiencia de combustión. (Leung et al., 2010)

Transesterificación

La transesterificación es la reacción por la cual una grasa o un aceite se mezcla con un alcohol, en presencia de un catalizador, para formar ésteres y glicerol. (Leung, 2010). El Biodiesel se obtiene del Aceite Vegetal a partir de la conversión de aceites triglicéridos en ésteres metílicos o etílicos. (Von Wedel, 1999). Lo cual depende directamente del tipo de alcohol que sea utilizado, siendo ésteres metílicos si es que se utiliza metanol y ésteres etílicos si se utiliza etanol en la reacción (López, Bocanegra & Malagón-Romero, 2015)

Tipos de catalizadores y concentración

Existen varios tipos de catalizadores que pueden ser utilizados para la producción de biodiesel:

Tabla 6. Resumen de Tipos de catalizadores tomada de D.Y.C Leung (2010).

Tipo	Ejemplo	Ventajas	Desventajas
Homogéneos	NaOH, KOH	Bajo costo, alta actividad catalítica	Poca cantidad de ácidos grasos libres, saponificación
Heterogéneos	CaO	No corrosivo, reciclable, no genera desperdicios	Alta temperatura y presión de reacción, alto costo.
Enzimas	Rhizomucor mieher lipase	No genera saponificación, fácil purificación	Alto costo, desnaturalización.

Ma et. al (1998) utilizó Metóxido de Sodio (NaOMe) e Hidróxido de Sodio (NaOH) para definir su efecto en la transesterificación. El estudio determinó que el NaOH es significativamente mejor que el NaOMe, a pesar de que previamente se había definido que el NaOH tiene un efecto contraproducente porque al mezclarse con el Metanol

produce cierta cantidad de agua (Liu, 1994). El NaOMe genera pequeñas partículas principalmente de sales sódicas, que dentro del biodiesel deben ser tratadas como desperdicio, para lo cual se necesitaría un aceite de alta calidad para ser tratado. (Ahn, Mittelbach & Marr, 1995).

Debido a dicho desenvolvimiento de los químicos se procede a determinar el proceso de transesterificación como el adecuado para la planta, tomando en cuenta el bajo costo de los reactivos y que el desenvolvimiento de la transesterificación ocurre a bajas temperaturas y presión atmosférica (Leung et al., 2010)

El agua que genera la reacción debe ser desechada debido a la mezcla con los químicos utilizados, mientras que la glicerina generada es apta para ser reciclada.

Definición del proceso para la producción del biodiesel

Leung et al., propone un proceso para la producción de Biodiesel mediante transesterificación, utilizando un catalizador alcalino de la siguiente forma:

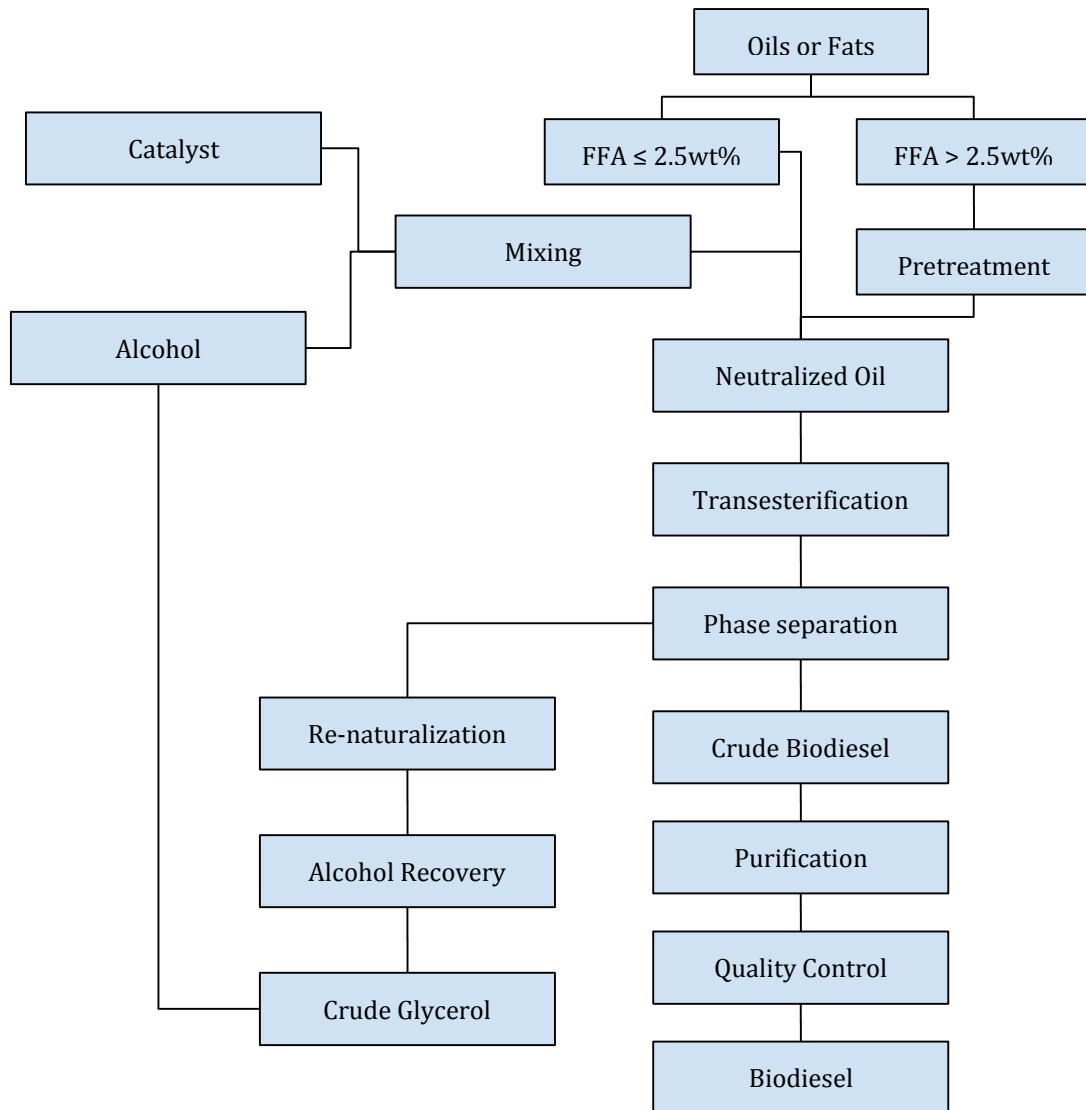


Figura 1. Diagrama de proceso simplificado para la producción de Biodiesel utilizando un catalizador alcalino.

El diagrama de procesos de la Figura 1 resalta la importancia de un tratamiento previo al tipo de materia prima que se utilice en caso de que contenga un porcentaje de ácidos grasos libres mayor a 2.5% en peso. Para la determinación del porcentaje de ácidos grasos libres se mide el índice de acidez utilizando la norma INEN 0038.

Es necesario purificar el aceite debido a la existencia de partículas que pueden afectar el comportamiento del mismo. Se prepara entonces la reacción química para que

al mezclarse con el aceite neutralizado, pueda dar paso al proceso de Transesterificación. Posteriormente se produce una separación de fase en la cual se obtienen como productos finales el Glicerol y el Biodiesel crudo. Finalmente luego de que el biodiesel crudo es purificado, se realiza un control de calidad y se obtiene el biodiesel.

DISEÑO DE LA PLANTA DE BIODIESEL

Parámetros de diseño

La planta debe cumplir con el proceso propuesto previamente que es necesario para la obtención de Biodiesel. Para la producción del combustible se manejan distintas temperaturas que deben ser controladas a cabalidad para garantizar un producto de calidad. Es necesario que la planta utilice materiales que no alteren las propiedades físico químicas tanto de la materia prima como del producto final.

Los residuos de la planta son Glicerol y Agua, siendo el glicerol una sustancia química que puede ser reciclada posteriormente. Por otro lado es estrictamente necesario desechar el agua que entra en contacto con el Biodiesel ya que posee toxicidad que impide la reutilización de la misma.

Se debe garantizar seguridad industrial a lo largo del proceso, debido a que las sustancias que se utilizan para obtener el biodiesel resultan tóxicas y dañinas para la salud. Se definen los siguientes procesos para simplificar el uso de la planta:

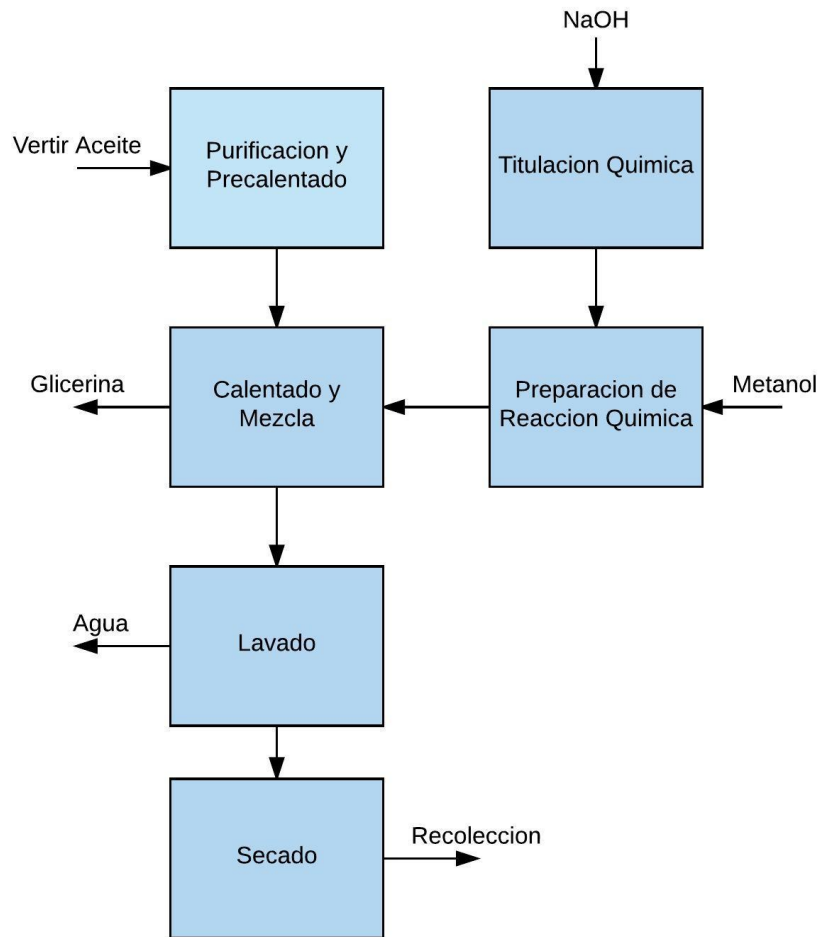


Figura 2. Diagrama de proceso de la Planta de Biodiesel

A partir de ello se define que el diseño de la planta debe contar principalmente con tanques de almacenamiento cuyos materiales sean capaces de mantener las propiedades originales de todos los elementos que intervienen en el proceso, mientras que el transporte de líquidos será diseñada a partir de tubería PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada. Se deben utilizar también bombas de transporte capaces de soportar temperatura y dependiendo del caso, anticorrosivas.

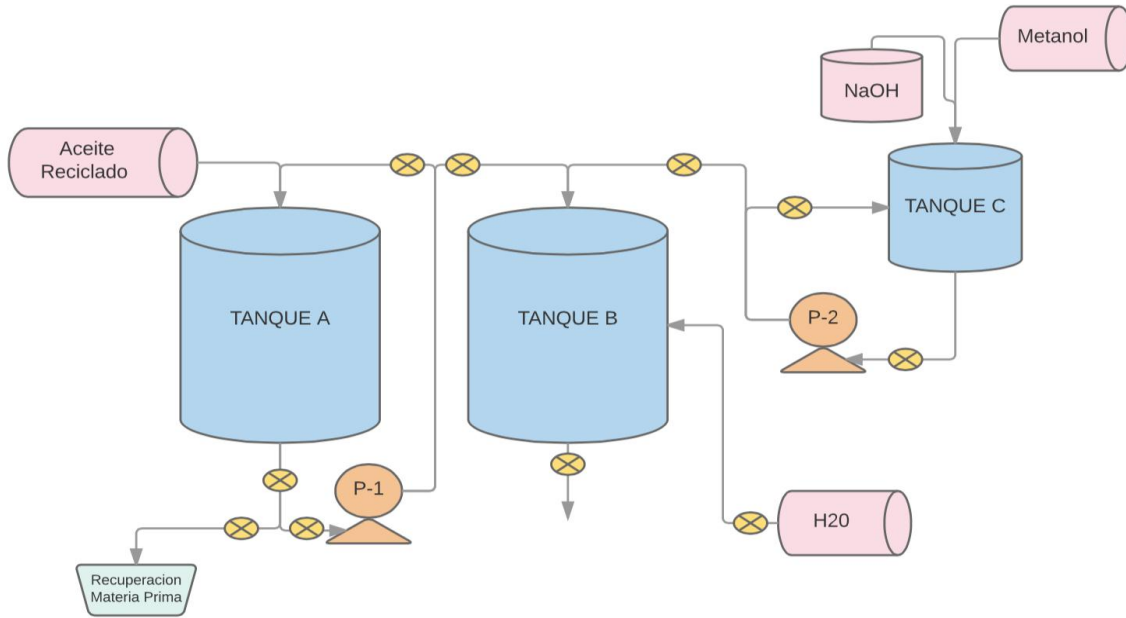


Figura 3. Diagrama de proceso general de la Planta de Biodiesel

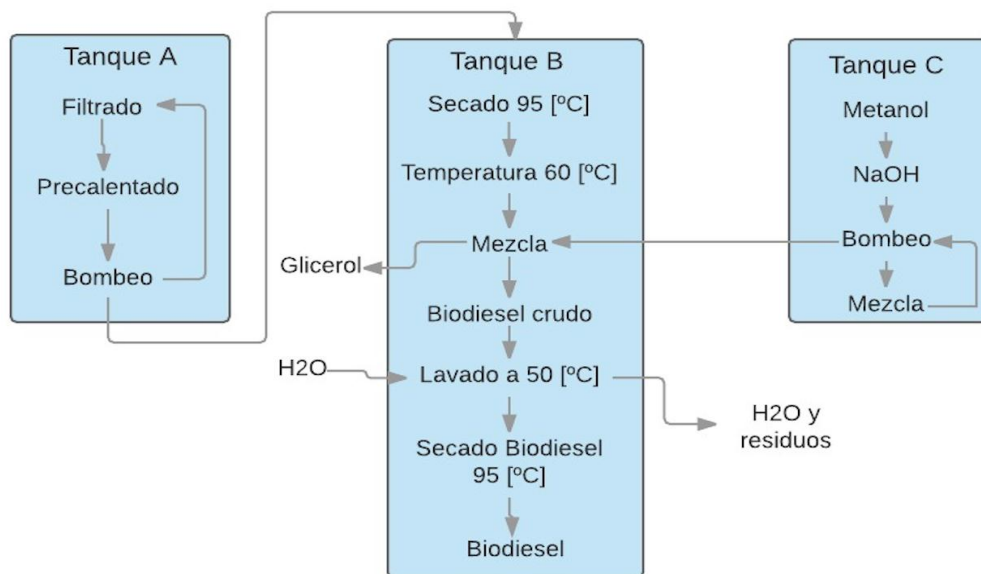


Figura 4. Diagrama de proceso en los tanques

Criterios de diseño

El criterio de diseño está basado en la cantidad de aceite que se puede obtener de las cocinas y restaurantes de la Universidad San Francisco de Quito, el cual tiene un promedio de desecho de 60 a 80 Litros/semana. Se realiza un sobredimensionamiento de la planta para una mayor producción de biodiesel.

Dimensionamiento

La planta puede realizar lotes de biodiesel de 70 litros de materia prima cada 4 días. Es así que el tanque de almacenamiento tiene una capacidad de 120 litros, el tanque de procesamiento tiene una capacidad de 100 litros y el tanque de químicos, a pesar de ser para 20 litros, debido a la inclinación de 15 grados se puede colocar un máximo de 17 litros, véase en la sección de cálculos. La tubería es de media pulgada, por facilidades de adquisición de válvulas y accesorios. El dimensionamiento eléctrico presenta el tablero eléctrico con un contactor de 40 amperios, ya que el consumo de la planta en su punto máximo será de 38 amperios aproximadamente. La planta ocupa un espacio físico de 2 metros 40 centímetros de largo, 80 centímetros de ancho y 1 metro 80 centímetros de alto.

Modelado geométrico de la planta (CAD)

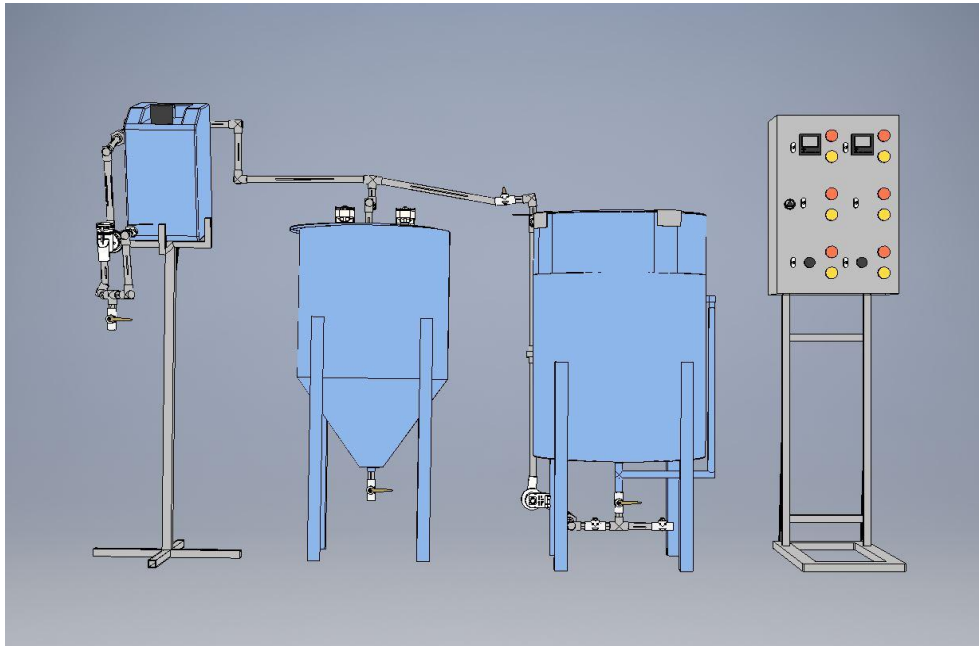


Figura 5. Vista frontal de la planta

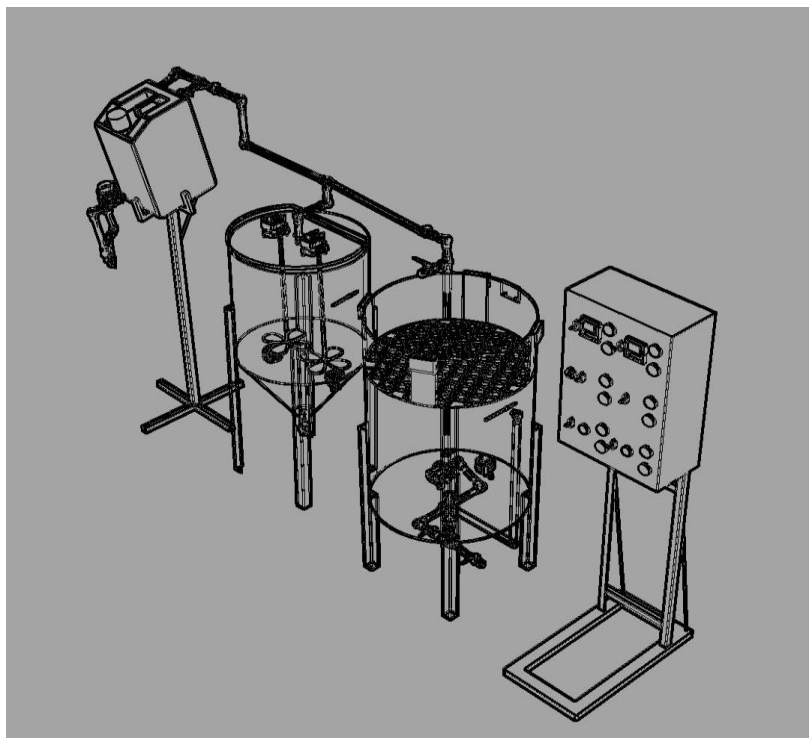


Figura 6. Vista lateral de la Planta de Biodiesel

Fabricación

Se utiliza un tanque reciclado de almacenamiento de aceite, por su pintura anticorrosiva y por costos, dicho tanque es de acero al carbón rolando en frío. Se coloca un medidor de nivel al costado izquierdo de dicho tanque, de plástico, para poder realizar mantenimiento con facilidad. El tanque de reactivos es de acero inoxidable 304, ya que dicho acero es utilizado en la industria alimenticia y farmacéutica. Para la mezcla de químicos se utiliza un tanque de polietileno, para evitar corrosión. Los cables utilizados en el tablero son: Para la distribución del cajetín al tablero, cable sucre 10x3, para las niquelinas se utilizó cable sucre 12x3, para motores y bombas cable sucre 14x3 y para conexiones internas cable 14.

Conexiones eléctricas

El voltaje utilizado en la planta es de 110 VAC por facilidades de los componentes y para realizar una conexión sencilla adaptable en cualquier lugar de la Universidad San Francisco de Quito.

El tablero consta de un contactor (Packard C240B COIL 120VAC 40A), el cual energiza todo el sistema después de activarse mediante una llave de comando.

Posee dos controladores de temperatura programables TQ-A y TQ-B (MYPIN modelo: TA4-RNR 110VAC) cada una con luces de encendido (color verde) y de alarma (color rojo), los mismos que están conectados a relés de estado sólido (SSR-25DA INPUT 3-32VDC LOAD 24-380VAC) para permitir el paso de corriente a las niquelinas (110VAC 1500W). Utilizando un transformador (LLETS 100W INPUT 100-120VAC 2.4A OUTPUT 12VDC 8.4A) se activan dichos relés de estado sólido. La temperatura se mide a través de termocuplas tipo K.

El sistema consta también de dos motores M-1 y M-2 (MERKLE-KORFF INDUSTRIES MOD: 3715UP-250/110VAC/97W/15RPM) y dos bombas, P-1 (ZHENGUAN PSB-B 110VAC 35W >20L/Min), y bomba P-2 (DRAIN PUMP PSB-02 110VAC 35W con capacidad de 20L/Min). La bomba P-2 posee un filtro interno de acero inoxidable. Es importante recalcar que tanto las bombas como los motores presentan luz de encendido (color verde) y apagado (color rojo) marca (LED Indicator Pilot Light AD16-22D AC 110V 20mA), dichas luces son controladas por relé (OMRON LY2N-J 110VAC 10A).

Los motores presentan un controlador de velocidad cada uno (SCR Uniquegoods 50-220VAC 2000W 25A). Finalmente se definen interruptores SPST On/Off Type. Cabe recalcar que para todos los componentes eléctricos, se presentan 3 cables, Verde (Línea), Blanco (Neutro) y Negro (Tierra).

PROCESOS DE PRODUCCIÓN

Purificación y precalentado

El aceite recalentado posee triglicéridos, ácidos grasos libres, agua y otros contaminantes en distintas proporciones (Leung et al. 2010). Por lo cual es necesario realizar una purificación del aceite previa a la producción de biocombustible.

El almacenamiento y precalentado del aceite se lleva a cabo en un tanque de acero al carbón rolado en frío abombado en la zona inferior, que facilite la recolección de la materia prima, recubierto internamente con una pintura de aluminio (SE 1300) de alta temperatura, puesto que es necesario que mantenga el aceite sin alterar sus propiedades durante el precalentamiento.

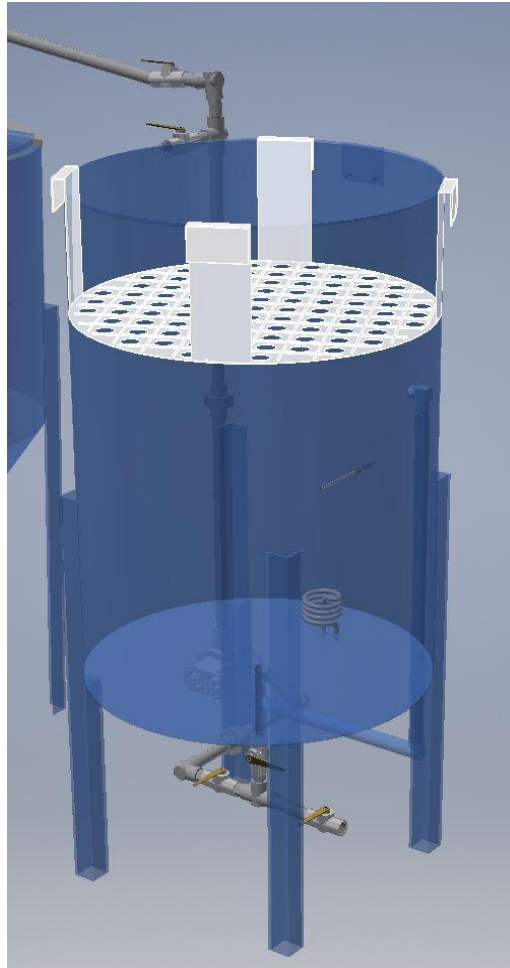


Figura 7. Vista tanque A

El aceite vegetal es filtrado mediante una malla de 80 μm y una tela de algodón con micronizado de polipropileno con el objetivo de retener los sólidos y la mayor cantidad de grasa de la materia prima.

El precalentamiento del aceite busca disminuir su viscosidad para facilitar el transporte del líquido previo al procesamiento. Se utiliza una niquelina de acero inoxidable ubicada en la zona inferior del tanque.



Figura 8. Vista niquelina tanque A

Es estrictamente necesario controlar la temperatura del tanque, por lo que se coloca una termocupla Tipo K, que responde a la señal de un controlador digital. Debido a que es un proceso neto de precalentamiento, se sugiere mantener una temperatura aproximada de 30°C.

Deshidratado de aceite

Para el secado del aceite y procedimientos posteriores es necesario diseñar un tanque que sea anticorrosivo, inoxidable y resistente a las temperaturas de operación de la planta (<115°C). El acero inoxidable AISI 304 (18 % Cr, 8% Ni) responde a las características de anticorrosión necesarias para el calentamiento, tratamiento térmico y mezcla de la materia prima con el compuesto químico. (CENDI, 2003)

Una vez definido el material de fabricación, se diseña el tanque de la siguiente forma:

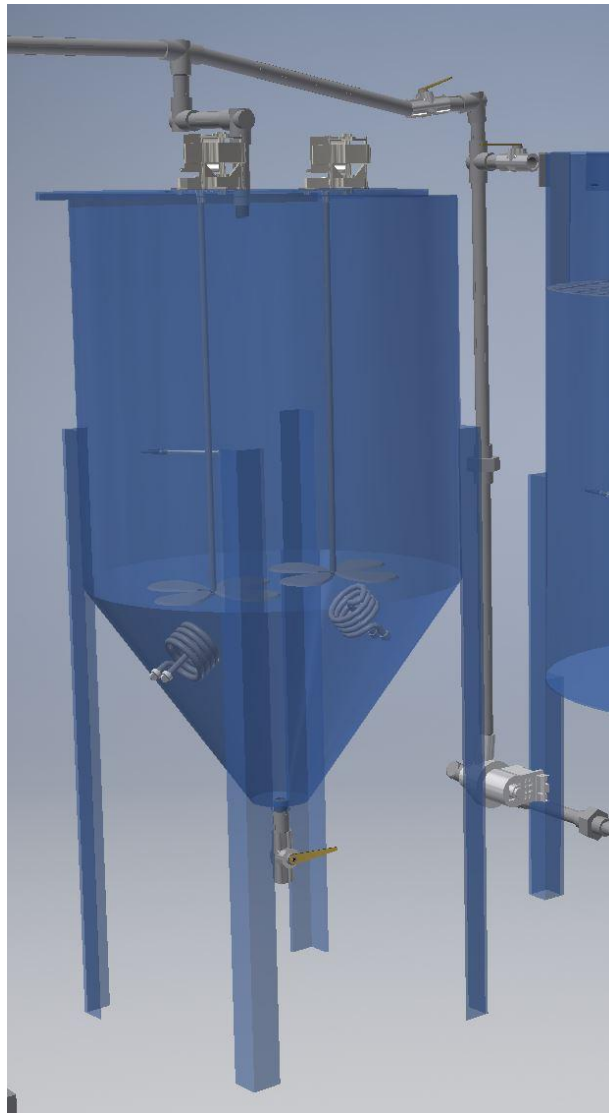


Figura 9. Vista tanque B

Está compuesto por un cilindro en la parte superior y un cono truncado en la parte inferior, adaptado para la entrada de líquido a partir del tanque de almacenamiento y otra entrada para la reacción química.

El proceso de secado corresponde a la elevación de temperatura del tanque que contiene el aceite purificado y precalentado hasta 95°C aprox. para garantizar la

evaporación completa de agua. Para ello se utilizan dos niquelinas adicionales ubicadas en la parte inferior del cono:

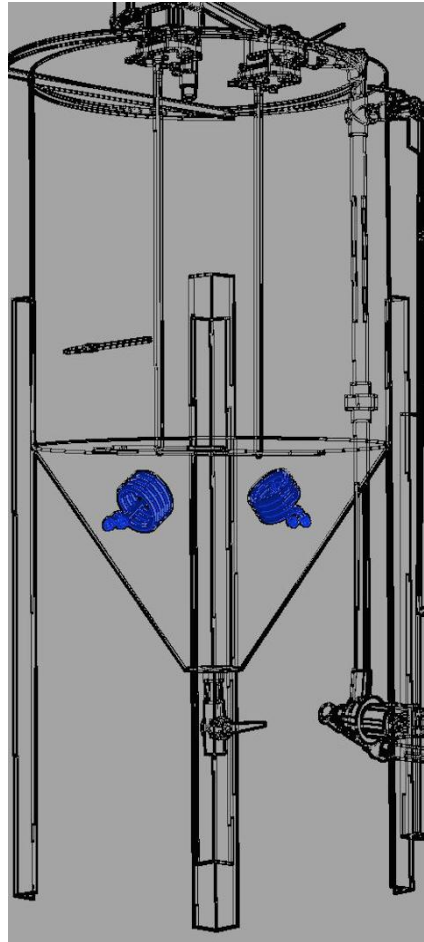


Figura 10. Vista de niquelinas tanque B

Es trascendental mejorar la distribución de calor y optimizar el proceso por lo que se añaden dos motores adaptados con dos aspas fabricadas con el mismo material del tanque.

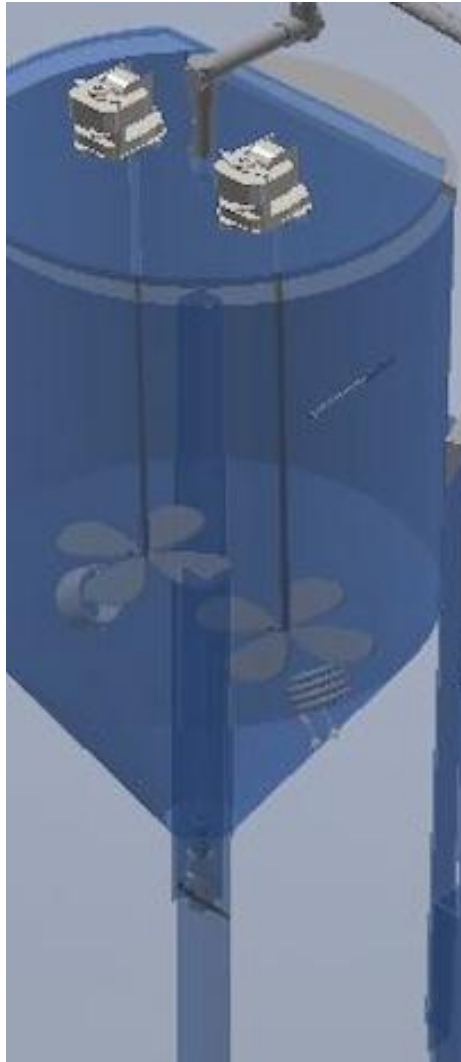


Figura 11. Vista motores y aspas tanque B

Posterior a este proceso es necesario que la temperatura del aceite disminuye hasta 60°C que es la temperatura a la que posteriormente se realiza el proceso de transesterificación.

Titulación química

La titulación determina la cantidad de compuesto químico que es necesario para el proceso de transesterificación, para lo cual se utilizan hidróxido de sodio y Metanol grado analítico. El porcentaje de catalizador representa del 1%-2% de la mezcla en

relación a la masa de aceite (Phan, 2008) y la relación porcentual del alcohol en relación a la capacidad total de la muestra de aceite es de 20% (Burke et al., 2012).

Existen diversas ventajas entre el uso del metanol y el etanol para generar la reacción química. Una de las ventajas del metanol es que tiene mejor capacidad al momento de almacenar el Biodiesel. (Yaakob,2003). Lapuerta et al. (2008), presenta una caracterización del Biodiesel producido con metanol (ácido graso éster metílico, AGEM) y etanol (ácido graso éster etílico, AGEE) que ayudan a definir el adecuado para la reacción.

Tabla 7. Comparación de propiedades entre AGEM y AGEE

Propiedad	Unidades	Referencia	AGEM	AGEE
Densidad a 15°C	<i>kg/m³</i>	834	887	878
Valor superior de calentamiento	MJ/kg	45.54	39.26	39.48
Valor inferior de calentamiento	MJ/kg	42.49	36.59	36.81
Índice de acidez	mg KOH/g	0.10	0.55	0.27
Contenido de agua	Ppm/wt.	57	466	420
Contenido de azufre	Ppm/wt.	34	0	0

Los resultados indican valores favorables para el Biodiesel producido con etanol. Sin embargo, Ma y Hanna (2009), determinan que el Metanol puede reaccionar con triglicéridos de manera rápida y disolver el catalizador alcalino en el de manera rápida.

Finalmente se opta por la utilización de metanol para el proceso de titulación y posteriormente para la preparación del metóxido.

Preparación del compuesto químico

Muchos de los catalizadores utilizados para la reacción química se encuentran en estados sólido y no se disuelven rápidamente en metanol (Leung et al., 2010). Para ello se asigna un tanque de plástico (Polipropileno, alta temperatura) para el desarrollo de la reacción

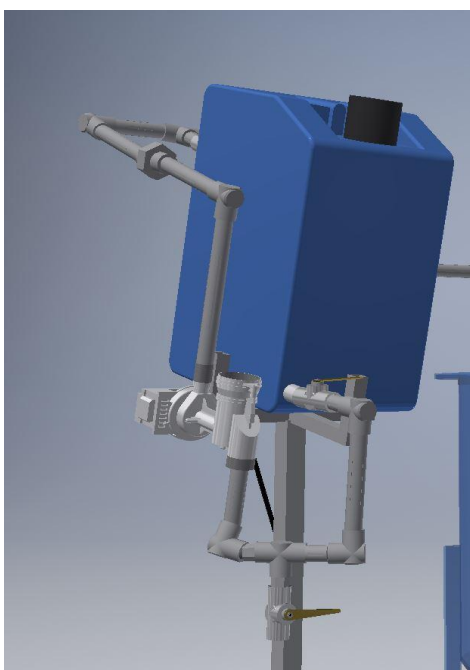


Figura 12. Vista tanque C

La agitación y mezcla del químico es producida por una bomba plástica que genera la recirculación del metanol, mientras el NaOH es vertido al recipiente. Leung recomienda agitar el NaOH sólido previamente en una mezcladora y añadirlo paulatinamente al líquido etílico. (2008).

La parte inferior del tanque posee una adaptación para que pueda recuperarse el residuo perdido por accesorios.



Figura 13. Vista válvulas y bomba tanque C

Cabe recalcar que la extracción constante del líquido genera vacío, por lo cual el ingreso de una mínima cantidad de aire es necesario, pues si existe completa apertura al medio ambiente, se corre el riesgo de que el metanol se evapore.

Calentado y mezcla

El proceso de calentado y mezcla es la base para la transesterificación que da inicio a la producción de Biodiesel. Meher et al. (2006) realiza el proceso de transesterificación para aceite con metanol (6:1) e hidróxido de sodio al 1% a diferentes temperaturas en donde determina que el rendimiento de su mezcla es de 94, 87 y 64% para 60, 45 y 32°C respectivamente.

El coeficiente calorífico del aceite en comparación al agua es MAYOR por lo que luego del primer secado (95°C) puede demorarse un tiempo prudencial en bajar la temperatura (60°C) donde depende de las condiciones físicas a las que el tanque se encuentre expuesto.

Cuando la temperatura haya llegado a los 60°C se procede a añadir la mezcla de NaOH y metanol al tanque de procesamiento. Es necesario regular el flujo del tanque de mezcla, de manera que el compuesto químico se combine homogéneamente con el aceite.

Leung y Guo (2006) determinaron que al calentar el aceite antes de la mezcla se puede incrementar el grado y a su vez disminuir el tiempo de reacción. Es necesario activar los motores mientras ocurre el ingreso de la mezcla química al tanque que se regulan mediante controladores de velocidad. Se debe realizar la mezcla durante un tiempo aproximado de dos horas debido a la geometría del tanque.

Una vez que se ha completado el proceso de mezcla es necesario que el tanque repose hasta que se defina el proceso de transesterificación. La transesterificación genera dos grandes productos, ésteres (biodiesel) y glicerol (Leung et al., 2010), en el cual el glicerol se precipita completamente hacia el cono mientras que el biodiesel se mantiene en la parte superior.

Es trascendental saber que la Glicerina se solidifica al llegar a las 18°C por lo que es necesario definir una temperatura mínima de asentamiento previa al drenaje. De

acuerdo a las condiciones climáticas para este caso, no es posible dejar que la temperatura del tanque disminuya bajo los 40°C.

Al inicio del drenado del tanque se distingue la precipitación de la glicerina, para luego dar paso al biodiesel. La glicerina tiene un aspecto café oscuro viscoso, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Glicerol

Luego de haber cumplido con el proceso, es necesario dejar reposar el tanque para que el resto de partículas de glicerina que no han sido drenadas puedan sedimentarse. Es necesario dejar el tanque en reposo por aproximadamente doce horas.

Schumacher (2007) indica que a pesar de que la glicerina se haya precipitado existen varias partículas de químico contaminantes que se encuentran tanto en el biodiesel como en la glicerina producida. El biodiesel, por ejemplo, contiene partículas del catalizador, agua, alcohol sin reaccionar, glicerol libre y jabones que son generados por la transesterificación. Es por eso que se define al producto de esta etapa como biodiesel crudo y necesita ser todavía lavado y purificado.

Lavado

Existen varios métodos de lavado del biodiesel crudo. Leung et al. (2010) define tres de ellos como los más importantes:

Tabla 8. Tipos de lavados para el biodiesel

Tipo de Lavado	Función	Ventajas	Desventajas	Referencias
Lavado con agua	Elimina grasas libres saturadas. Retarda la emulsión	Muy efectiva	Forma emulsiones, tiempo prolongado	Leung et al., 2010. Mittelbach, 1998.
Lavado en seco	Remueve el glicerol y jabón restante por precipitación	No utiliza agua	No cumple con estándares EN	Cooke et al., 2005
Extracción de Membrana	Remoción de contaminantes	Evita emulsión y disminuye perdidas	Alto costo. Porcentaje bajo de eliminación de contaminante.	Gabelman et al., 1999

El objetivo principal del lavado es la remoción del catalizador utilizado en el proceso de transesterificación. (Glisic & Skala, 2009). Dentro del biodiesel crudo también se encuentran elementos como jabones, glicerol y alcohol que son productos altamente solubles en agua.

Es recomendable que el proceso de lavado se lleve a cabo a una temperatura moderadamente alta (50°C) debido a que el agua caliente, por ejemplo, previene la precipitación de esteres ácidos grasos saturados y disminuye la formación de emulsiones. (Leung, 2010)

Tomando en cuenta las características de diseño de la planta de biodiesel, se opta por el lavado con agua. Sin embargo, es necesario disminuir los riesgos de emulsión y saponificación del lote, por lo que el lavado del aceite se realiza utilizando un nebulizador (COOLNET PRO 5.5 l/h 4 válvulas).

Leung (2010) recomienda el uso de agua destilada caliente o agua descalcificada. Sin embargo, el uso industrial de agua destilada representaría una inversión mayor en comparación con el uso de agua común. A pesar de ello, se puede sustituir el agua caliente, elevando la temperatura del aceite (50°C) y de esta forma garantizar la precipitación de impurezas en el biocombustible. El agua junto con las impurezas desciende al fondo del tanque facilitando su recolección.

Deshidratación de biodiesel

El Biodiesel aparece turbio y al final presenta burbujas, por lo cual se concluye la presencia de agua en la probeta. La deshidratación o secado implica que las moléculas de agua que se encuentran en suspensión en la muestra sean llevadas a la superficie (evaporación); la presencia de agua en la muestra reduce el rendimiento del combustible (Varty & Lishawa, s.f).

El diseño del tanque de procesamiento permite que el aceite sea elevado a altas temperaturas para el secado (95°C) durante tres horas garantizando la evaporación del agua contenida en el aceite. Es necesaria una re-circulación lenta del aceite para garantizar una completa deshidratación.

ANÁLISIS DEL PRODUCTO FINAL

Pruebas organolépticas

Son pruebas económicas, sencillas de realizar y tienen que ver con la revisión sensorial del producto final. Es el primer paso a seguir antes de realizar pruebas de laboratorio. Se realizó pruebas de pH y textura, como viscosidad y color.



Figura 15. Verificación de pH en biodiesel

El valor pH que se debe obtener para demostrar que el proceso se ha llevado a cabo adecuadamente es de 7 tanto para el agua como para el Biodiesel, de esta forma se garantiza que existe la reacción química se llevo a cabo y ambas sustancias son neutras. El color del Biodiesel responde a un color amarillo-pálido y debe ser transparente en el mejor de los casos, sin embargo esto responde a la materia prima utilizada para la producción de biocombustible. Dicho esto se espera un biodiesel transparente con un color similar al aceite reutilizado. Finalmente la viscosidad del biodiesel debe responder a las características de un combustible común, el cual es muy liquido en comparación al aceite original.

Pruebas de laboratorio

La primera prueba de laboratorio para determinar la existencia de biodiesel, es la cromatografía de capa fina, la cual consiste en la preparación de una placa de Silica sumergida en un solvente (éter de petróleo, éter metílico y ácido acético). La placa es revelada en una cámara de Yodo, donde se indican dos manchas referentes al Biodiesel producido en la planta y a un Biodiesel producido en laboratorio a partir de Aceite de Soya, respectivamente.

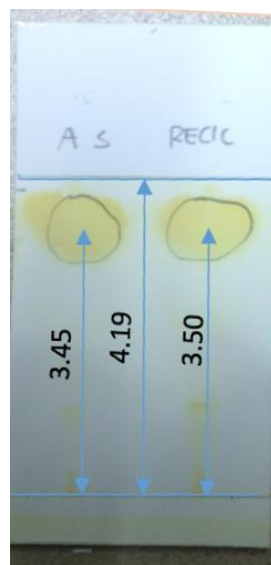


Figura 16. Placa de silica

Las manchas ubicadas a una altura similar tomando en cuenta un eje de referencia y el frente disolvente comprueban Biodiesel, siempre y cuando el coeficiente resultante tomado a partir de las distancias tenga un valor aproximado a 0.82 que es el valor de referencia.

Se realiza una prueba en una bomba calorimétrica para demostrar la capacidad calorífica del producto. El ensayo se realiza utilizando un calorímetro IKA-C200, a partir de la cual se obtiene un valor de 6995 J/K. De acuerdo a la densidad del Biodiesel (859.62

g/L), se obtiene el valor teórico de 41.63 [MJ/kg]. (Demirbas,2009)., el valor experimental final de capacidad energética es de 40.05 [MJ/kg] (ASTM D240), que define un valor adecuado dentro de un rango de 33.3 a 45 [MJ/kg].

ANÁLISIS ECONÓMICO

El consumo total de la planta para lotes de 30 litros es 15.35 [kW]. Los costos son calculados para los mismos lotes de 30 litros de aceite, mediante lo cual se busca obtener 28 litros de biodiesel semanales.

Tabla 9. Consumo de la planta

Equipo consumo eléctrico en kW	Tiempo [h]	Total [kW]
Tanque Almacenamiento: 1.7 [kW]	1	1.7
Tanque Procesamiento: 3.4 [kW]	4	13.6
Tanque Químico: 0.05 [kW]	1	0.05

Comparación de costos de insumos entre países

Ecuador:

Tabla 10. Costos de productos en Ecuador

Producto	Costo
Metanol 99%:	6.25 [US\$ por litro]
Metanol industrial:	1.5 [US\$ por litro]
Hidróxido de Sodio:	19 [US\$ por Kg]
Costo electricidad:	0.091 [US\$ por kWh]
Costo de diésel:	0.27 [US\$ por litro]
Costo de diésel sin subsidio:	0.50 [US\$ por litro]

Costos para 1 lote de 30 litros de aceite:

Costo para 28 [l] de biodiesel con metanol al 99%: 42.54 [US\$]

Costo para 28 [l] de biodiesel con metanol industrial: 14.04 [US\$]

Estados Unidos de Norteamérica:

Tabla 11. Costos de productos en EEUU

Producto	Costo
Metanol 99.9%:	3.65 [US\$ por litro]
Metanol industrial:	0.29 [US\$ por litro]
Hidróxido de Sodio:	13 [US\$ por 907.19 g]
Costo electricidad:	0.07 [US\$ por kWh]
Costo de diésel:	0.64 [US\$ por litro]

Costos para 1 lote de 30 litros de aceite:

Costo para 28 [l] aprox de biodiesel con metanol al 99.9%: 25.72 [US\$]

Costo para 28 [l] aprox de biodiesel con metanol industrial: 5.56 [US\$]

Europa Alemania.

Tabla 12. Costos de productos en Alemania

Producto	Costo
Metanol 99.85%:	6.4 [EUR por litro]- 6.81 [US\$ por litro]
Metanol industrial:	0.21 [US\$ por litro]
Hidróxido de Sodio:	5.75 [EUR por Kg]- 6.12 [US\$ por Kg]
Costo electricidad:	0.12 [US\$ por kWh]
Costo de diésel:	1.21 aprox. [US\$ por litro]

Costos para 1 lote de 30 litros de aceite:

Costo para 28 [l] aprox de biodiesel con metanol al 99.85%: 43.88 [US\$]

Costo para 28 [l] aprox de biodiesel con metanol industrial: 4.28 [US\$]

Para poder entender de mejor manera se expresa el valor de biodiesel y diésel por unidad de galón.

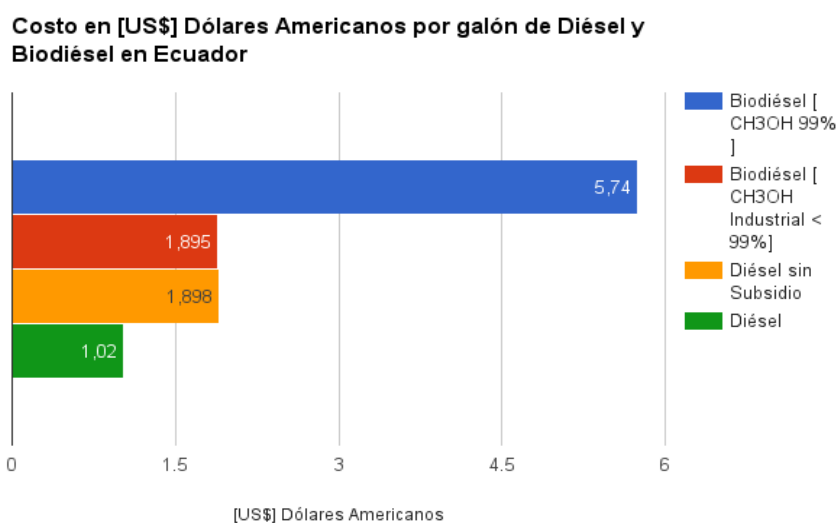


Figura 17. Costos por galón de combustible y biocombustible en Ecuador

Se puede apreciar que el valor para la producción de biodiesel utilizando metanol analítico, es decir del 99% o superior de pureza, triplica al valor de producción de metanol industrial, menor al 99% y superior al 96% de pureza. Por otra parte dentro del país el costo de diésel es 1,02 aproximadamente, dependiente de la gasolinera podría variar hasta 1,04, este valor es para el diésel comercial, el cual es subsidiado por el gobierno ecuatoriano. El valor del precio sin subsidio asciende hasta 1,9 aproximadamente. Por el momento, producir biodiesel es más costoso que adquirir diésel, la baja de precio del crudo y el subsidio que existe en el país, muestra la diferencia de costos. Si se llega a eliminar el subsidio los costos de producción de biodiesel serian iguales o inferiores al diésel internacional. Por otra parte es bueno acotar que el biodiesel podría ser una alternativa a los combustibles fósiles, el beneficio de reciclar aceite, para la producción de un combustible, el cual es amigable con el medio ambiente, haría la gran diferencia al cuidado del medioambiente.

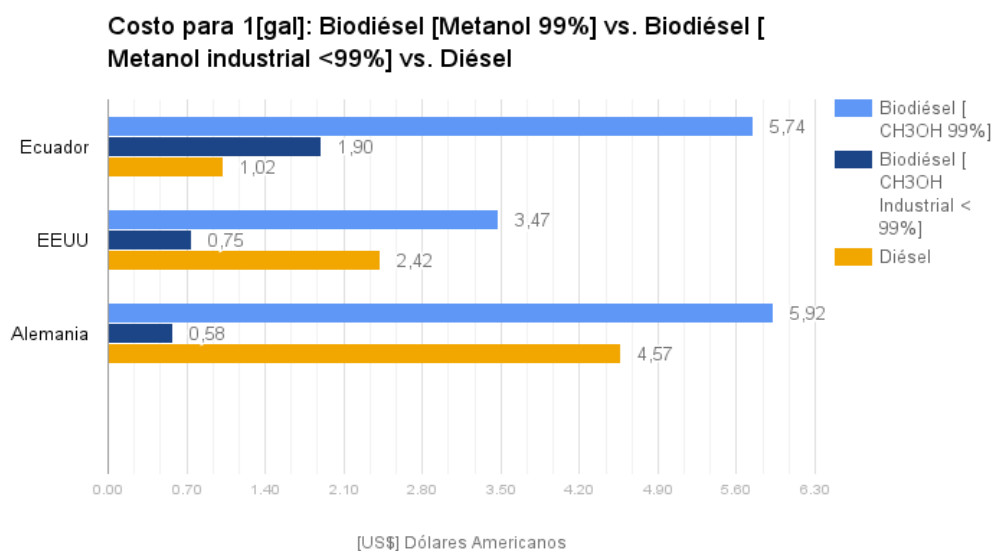


Figura 18. Costos por galón de combustible y biocombustible en Alemania, EEUU y Ecuador

A nivel mundial apreciamos el valor de producción de biodiesel con metanol analítico se vuelve muy costoso, por otra parte para Estados Unidos y Alemania producir biodiesel con metanol industrial sería beneficioso.

CONCLUSIONES

La planta tiene una productividad aproximada del 93%. Es necesario recalcar que el modelo cumple las normas necesarias para ser utilizadas dentro del campo universitario.

Si es que se toma en cuenta el precio actual del crudo, la producción de un combustible a base de petróleo implica un costo menor en comparación al biodiesel. Sin embargo es trascendental saber que este precio puede variar debido al subsidio gubernamental.

Como medida de control se realizó un monitoreo de la planta durante 72 horas para poder garantizar su funcionamiento. Durante dicho tiempo se hizo trabajar a la planta para ver la acción de todos sus componentes los cuales no presentaron problemas eléctricos, ni problemas de pérdidas, garantizando así su confiabilidad de diseño.

El aspecto del aceite reciclado es bastante oscuro debido a que es un aceite muy oxidado, por lo cual se puede inferir que la materia prima debe ser optimizada. El biodiesel producido dentro de la Universidad San Francisco de Quito implementa una idea de reciclaje y conservación del medio ambiente para beneficio propio.

RECOMENDACIONES

Es necesario realizar lotes de hasta [70] litros de materia prima, debido a la capacidad del tanque de almacenamiento y mezcla de materiales químicos. Para lo cual es estrictamente necesario seguir las indicaciones explicadas en el manual de operaciones donde se especifica la trascendencia de utilizar equipo necesario para la manipulación y transporte de Metanol por su alta toxicidad.

El proceso químico puede ser optimizado si se realizan mínimo 3 lavados para obtener un producto final más limpio que pueda ser utilizado directamente como combustible. Al igual que la necesidad de lavar el aceite base antes de que ingrese al proceso para que tenga un mejor aspecto y cumpla los estándares organolépticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Demirbas A.(2009)., "Prediction of Higher Heating Values for Biodiesels from Their Physical Properties," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, no. 8, pp. 633–638.
- El Comercio,. (2016). 5 632 industrias con nueva tarifa eléctrica a partir de este mes. Obtenido de <http://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador-industrias-tarifa-electricidad-negocios.html>
- El Comercio,. (2016). Gasto en subsidios a los combustibles se redujo en 80% en Ecuador. Obtenido de <http://www.elcomercio.com/actualidad/gasto-subsidios-combustibles-petroleo-gasolina.html>
- El Universo,. (2015). La eliminación del subsidio al diésel preocupa al agro. Obtenido de <http://www.eluniverso.com/noticias/2015/11/10/nota/5232620/eliminacion-subsidio-diésel-preocupa-agro>
- EMLAB REPRESENTACIONES - equipos laboratorio. (2016). IRMA CACERES. Obtenido 26 Diciembre 2016, de <http://www.emlabrepresentaciones.com>
- Es.globalpetrolprices.com. (2016). Los precios del diésel en todo el mundo, 26-dic-2016 GlobalPetrolPrices.com. [online] Disponible en: http://es.globalpetrolprices.com/diesel_prices/ [Accessed 26 Dec. 2016].
- Faccini, C. S., Da Cunha, M. E., Moraes, M. S. A., Krause, L. C., Manique, M. C., Rodrigues, M. R. A., ... Caramão, E. B. (2011). Dry washing in biodiesel purification: A comparative study of adsorbents. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 22(3), 558–563. <http://doi.org/10.1590/S0103-50532011000300021>
- Fallon, W., Kirkpatrick, N., Gaudreau, K., & Turcotte, I. (2005). The Design and Construction of a Small-Scale Biodiesel Plant. *Bellairs Research Institute*.
- Felizardo, P., Neiva Correia, M. J., Raposo, I., Mendes, J. F., Berkemeier, R., & Bordado, J. M. (2006). Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Management*, 26(5), 487–494. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.02.025>
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405–416. [http://doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80288-7](http://doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80288-7)
- Garrido, S. M. (2010). Tecnología, territorio y sociedad. Producción de biodiesel a partir de aceites usados. *Íconos. Revista de Ciencias Sociales*, 37, 75–86. <http://doi.org/10.17141/iconos.37.2010.422>
- Geris, R., Alessandra, N., Amaral, B. A., Maia, I. D. S., Dourado, V., Roque, J., ... Ba, S. (2007). *Educação*, 30(5), 1369–1373.
- Glišić, S. B., & Skala, D. U. (2009). Design and optimisation of purification procedure for biodiesel washing. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 15(3), 159–168. <http://doi.org/10.2298/CICEQ0903159G>
- Guerrero F., C. A., Guerrero-romero, A., & Sierra, F. E. (2010). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil. *Biodiesel - Feedstocks and Processing Technologies*, 7(12), 23. <http://doi.org/10.5772/25313>
- Hidróxido de Sodio. (2016) (1st ed.). Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia17.pdf>

- HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD PARA SUSTANCIAS QUÍMICAS. (1997) (1st ed.). Monterrey. Obtenido de <http://itsva.edu.mx/archivos/usuarios/5/archivo697.pdf>
- HOJA DE SEGURIDAD II HIDROXIDO DE SODIO. (2016) (1st ed.). Obtenido de <http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/2hsnaoh.pdf>
- Jacobson, K., Gopinath, R., Meher, L. C., & Dalai, A. K. (2008). Solid acid catalyzed biodiesel production from waste cooking oil. *Applied Catalysis B: Environmental*, 85(1-2), 86–91. <http://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.07.005>
- La Nación,. (2012). La realidad de los precios de la electricidad. Obtenido de http://www.nacion.com/archivo/realidad-precios-electricidad_0_1273272816.html
- Leung, D. Y. C., & Guo, Y. (2006). Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, 87(10), 883–890. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.06.003>
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Lishawa, S. C., Manuel, T., & Fernández, A. (n.d.). Haciendo Biodiesel de Aceite Vegetal Usado.
- López, L., Bocanegra, J., & Malagón-Romero, D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. *Ingeniería Y Universidad*, 19(1), 155–172. <http://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-1.sprq>
- Ma, F., & Hanna, M. a. (1999). Biodiesel production: a review. *Journal Series #12109, Agricultural Research Division, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska–Lincoln*. *Bioresource Technology*, 70, 1–15. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)
- Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248–268. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- Methanol | Sigma-Aldrich. (2016). [Sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?term=methanol&interface=All&N=0&mode=match%20partialmax&lang=en®ion=US&focus=product). Obtenido 26 Diciembre 2016, de <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?term=methanol&interface=All&N=0&mode=match%20partialmax&lang=en®ion=US&focus=product>
- Mittelbach, M., & Koncar, M. (1998). steam distillation patent US5849939.pdf.
- Nada E.M. Elsolh. (2011). The Manufacture of Biodiesel from the used vegetable oil, 131.
- Patil, P. D. (2012). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Sulfuric Acid and Microwave Irradiation Processes. *Journal of Environmental Protection*, 03(01), 107–113. <http://doi.org/10.4236/jep.2012.31013>
- Pricing | Methanex Corporation. (2016). [Methanex.com](https://www.methanex.com/our-business/pricing). Obtenido 26 Diciembre 2016, de <https://www.methanex.com/our-business/pricing>
- Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. (2003) (1st ed.). Obtenido de http://www.iminox.org.mx/downloads/publicaciones/manual_resistencia_a_la_corrosion.pdf
- Rinaldi, R., Garcia, C., Marciniuk, L. L., Rossi, A. V., & Schuchardt, U. (2007). Síntesis de biodiesel: Uma proposta contextualizada de experimento para laboratório de química geral. *Quimica Nova*, 30(5), 1374–1380. <http://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500054>
- TAMBORES DE ACERO | ELSA ENVASES Y LAMINADOS. (2016). [Elsamex.mx](http://www.elsamex.mx/products/acero/). Obtenido 26 Diciembre 2016, de <http://www.elsamex.mx/products/acero/>

- TECNICO. (2016). Laboratorio Cevallos. Obtenido 26 Diciembre 2016, de <http://labcevallos.com/productos/tecnico/>
- To, H. O. W., Your, S., Biodiesel, O. W. N., & Program, F. (2012). Waste cooking oil to fuel program, 1–40.
- Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86(10), 1097–1107. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>
- Wedel, R. Von, & Ph, D. (1999). Technical Handbook for Marine Biodiesel In Recreational Boats by Point Richmond , CA Second Edition. Retrieved from [http://www.cytoculture.com/Biodiesel Handbook.htm](http://www.cytoculture.com/Biodiesel%20Handbook.htm)
- Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., & Sopian, K. (2013). Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184–193. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.016>
- Yimer, S., & Sahu, O. (2011). Optimization of biodiesel production from waste cooking oil. *Sustainable Energy*, 2(3), 81–84. <http://doi.org/10.12691/rse-2-3-1>
- Zhang, Y., Dubé, M. A., McLean, D. D., & Kates, M. (2003). Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, 89(1), 1–16. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00040-3](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00040-3)

ANEXOS

A1. Cálculos

Nomenclatura para cálculos:

Diámetro: D

Diámetro Mayor: DM

Diámetro Menor: DN

Largo: L

Constante Pi: π

Sumatoria: Σ

Volumen: V

Error: E

Cálculos para obtener el volumen de un cilindro:

$$V = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi \times L$$

Cálculos para obtener el volumen de un Cono:

$$V = \frac{1}{3} \times \pi \times L \times \left(\left(\frac{DM}{2}\right)^2 + \left(\frac{DN}{2}\right)^2 + \left(\frac{DM}{2} \times \frac{DN}{2}\right) \right)$$

Porcentaje de Error:

$$E = \frac{|valor\ teórico - valor\ experimental|}{valor\ teórico} \times 100$$

Conversión centímetros cúbicos a litros

$$1 [cm^3] = 0.001 [l]$$

Cálculos dimensiones capacidad tanque de almacenamiento:

Sección Cilíndrica: D: 56.8 [cm]

L: 60 [cm]

Sección Medida: D: 2.54 [cm]

L: 55.5 [cm]

Volumen sección cilíndrica:

$$V = \left(\frac{56.8}{2}\right)^2 \times \pi \times 60$$

$$V = 152033 [cm^3]$$

Volumen sección medida:

$$V = \left(\frac{2.54}{2}\right)^2 \times \pi \times 55.5$$

$$V = 281.22 [cm^3]$$

$$V_{total} = \Sigma V$$

$$V_{total} = 152314 [cm^3]$$

$$152314 [cm^3] = 152.31 [l]$$

Cálculos dimensiones capacidad malla purificación:

Sección Cilíndrica: D: 56.8 [cm]
L: 20 [cm]

$$V = \left(\frac{56.8}{2}\right)^2 \times \pi \times 20$$

$$V = 50677.7 [cm^3]$$

$$50677.7 [cm^3] = 50.68 [l]$$

Cálculos dimensiones capacidad tanque de reactivos:

Sección Cilíndrica: D: 50 [cm]
L: 50 [cm]
Sección Cónica: DM: 50 [cm]
DN: 8 [cm]
L: 30 [cm]

Volumen sección cilíndrica:

$$V = \left(\frac{50}{2}\right)^2 \times \pi \times 50$$

$$V = 98174.8 [cm^3]$$

Volumen sección cónica:

$$V = \frac{1}{3} \times \pi \times 30 \times \left(\left(\frac{50}{2}\right)^2 + \left(\frac{8}{2}\right)^2 + \left(\frac{50}{2} \times \frac{8}{2}\right) \right)$$

$$V = 23279.2 [cm^3]$$

$$V_{total} = \Sigma V$$

$$V_{total} = 121454 [cm^3]$$

$$219.34 [cm^3] = 121.45 [l]$$

Cálculos dimensiones capacidad tanque de Químicos:

Capacidad Almacenamiento: 20 [L]

Cálculos capacidad inclinación a 15 grados:

Largo: 28 [cm]

Ancho: 23 [cm]

Alto: 31 [cm]

Volumen : 19.96 [L]

Volumen a 15 grados: 17.5 [L]

Cálculos por pérdidas de aceite por accesorios

Tanque almacenamiento-Tanque de reactivo

Tubería: D: 1.27 [cm]

L: 100 [cm]

Bomba sección carcasa: D: 5.14 [cm]

L: 3 [cm]

Bomba sección de succión: DM: 3.3 [cm]

DN: 1.5 [cm]

L: 2.6 [cm]

Bomba sección de descarga: D: 2.4 [cm]

L: 4 [cm]

Volumen en tubería:

$$V = \left(\frac{1.27}{2}\right)^2 \times \pi \times 100$$

$$V = 126.68 [cm^3]$$

Volumen en carcasa:

$$V = \left(\frac{5.14}{2}\right)^2 \times \pi \times 3$$

$$V = 62.25 [cm^3]$$

Volumen sección de succión:

$$V = \frac{1}{3} \times \pi \times 2.6 \times \left(\left(\frac{3.3}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{3.3}{2} \times \frac{1.5}{2}\right) \right)$$

$$V = 12.31 [cm^3]$$

Volumen en descarga:

$$V = \left(\frac{2.4}{2}\right)^2 \times \pi \times 4$$

$$V = 18.1 [cm^3]$$

Volumen Total:

$$V_{total} = \Sigma V$$

$$V_{total} = 219.34 [cm^3]$$

$$219.34 [cm^3] = 0.22 [l]$$



Fig A1-1 . Aceite recolectado por pérdidas de tubería

Error porcentual:

Valor Teórico: 0.22[L]

Valor Experimental: 0.225 [L]

$$E = \frac{|0.22 - 0.225|}{0.22} \times 100$$

$$E = 2.27\%$$

Cálculos por pérdidas de reactivo por accesorios

Tanque Químico-Tanque de reactivo

Tubería: D: 1.27 [cm]

L: 88 [cm]

Bomba sección carcasa: D: 6.1 [cm]

L: 1.6 [cm]

Bomba sección de succión: D: 3.5 [cm]

L: 2.5 [cm]

Bomba sección de succión filtro: D: 4.7 [cm]

L: 4.3 [cm]

Bomba sección de succión tubería: D: 2.1 [cm]

L: 7 [cm]

Bomba sección de descarga: D: 1.95 [cm]

L: 3.1 [cm]

Volumen en tubería:

$$V = \left(\frac{1.27}{2}\right)^2 \times \pi \times 88$$

$$V = 111.47 [cm^3]$$

Volumen en carcasa:

$$V = \left(\frac{6.1}{2}\right)^2 \times \pi \times 1.6$$

$$V = 46.76 [cm^3]$$

Volumen sección de succión:

$$V = \left(\frac{3.5}{2}\right)^2 \times \pi \times 2.5$$

$$V = 24.05 [cm^3]$$

Volumen sección de succión filtro:

$$V = \left(\frac{4.7}{2}\right)^2 \times \pi \times 4.3$$

$$V = 74.6 [cm^3]$$

Volumen sección de succión tubería:

$$V = \left(\frac{2.1}{2}\right)^2 \times \pi \times 7$$

$$V = 24.25 [cm^3]$$

Volumen en descarga:

$$V = \left(\frac{1.95}{2}\right)^2 \times \pi \times 3.1$$

$$V = 9.26 [cm^3]$$

Volumen Total:

$$V_{total} = \Sigma V$$

$$V_{total} = 290.4 [cm^3]$$

$$290.4 [cm^3] = 0.29 [l]$$



Fig A1-2 . Químico recolectado por pérdidas de tubería

Error porcentual:

Valor Teórico: 0.29[L]

Valor Experimental: 0.3 [L]

$$E = \frac{|0.29 - 0.3|}{0.29} \times 100$$
$$E = 3.45\%$$

A2. Manual de operaciones

A3. Planos CAD

A4. Diagrama Eléctrico