



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DEMOSTRATIVO
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELÉCTRONICO**

PRESENTA:

OSCAR HUMBERTO MARTÍNEZ AGUIRRE



DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

MÉXICO D.F.

2013

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: DR. VÍCTOR RODRÍGUEZ PADILLA

VOCAL: DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

SECRETARIO: DR. ARTURO GUILLERMO REINKING CEJUDO

PRIMER SUPLENTE: M.C. EDGAR SALAZAR SALAZAR

SEGUNDO SUPLENTE: M.I. JUAN CARLOS CEDEÑO VÁZQUEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Éste trabajo se realizó en el Posgrado de la Facultad de Ingeniería en la División de Ingeniería Eléctrica de la UNAM.

Se agradece el apoyo que otorga DGAPA en los proyectos PAPIME en especial al 100810: “Prototipos de sistemas de bioenergía y biocombustibles”. En esta parte del proyecto se apoyó en el diseño de la planta de biodiésel. Asimismo a la empresa Biofuels se agradece por la donación de la planta de biodiésel bajo el convenio DGAJ-SPI-081111-492.

ASESORA DEL TEMA: Dra. Alejandra Castro González

SUSTENTANTE: Martínez Aguirre Oscar Humberto

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que siempre me apoyaron en todo incondicionalmente y me animaron en los momentos más difíciles de la carrera, éste trabajo se los dedico a ustedes, los amo.

A mi hermana que siempre me apoyó durante la carrera y más que nada, quiero ser un ejemplo para ella.

A mi abuela Esperanza Fuentes Rodríguez q.e.p.d que en vida fue un gran ejemplo y siempre estuvo al pendiente de mí.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM por haberme brindado todas las herramientas y conocimientos para forjarme como un profesionista competitivo.

A la Dra. Alejandra Castro González por apoyarme en éste trabajo hasta el final, fuí afortunado en haberla tenido como profesora y como tutora de ésta tesis.

El uso de aceites vegetales para combustible puede parecer insignificante hoy, pero tales aceites pueden llegar a ser, en el curso del tiempo, tan importantes como el petróleo y los productos de alquitrán de la actualidad.

Rudolf Diesel, 1912

ÍNDICE

Índice de tablas.....	iii
Índice de figuras.....	iv
Resumen.....	v
Introducción.....	vi
Objetivo.....	vi
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES	1
1.1 GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	1
1.2 EMISIONES POR EL USO DE TRANSPORTE.....	2
1.3 BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS.....	4
1.3.1 Etanol.....	4
1.3.2 Biodiésel.....	5
1.4 USO DEL BIODIÉSEL.....	6
1.5 EL BIODIÉSEL EN EL MUNDO.....	6
1.5.1 Europa.....	6
1.5.2 EE.UU.....	8
1.5.3 Países de tercer mundo.....	8
1.6 BIODIÉSEL EN EL FUTURO.....	9
1.7 COMBUSTIÓN DEL BIODIÉSEL.....	10
1.8 EMISIONES DEL BIODIÉSEL.....	10
1.9 RENDIMIENTO DEL BIODIÉSEL.....	10
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS	12
2.1 ACEITES VEGETALES.....	12
2.2 POTENCIAL DEL ACEITE DE COCINA USADO PARA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.....	13
2.3 PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL.....	13
2.3.1 Proceso de transesterificación.....	13
2.3.2 Proceso de catalizado con álcali.....	14
2.3.3 Proceso de catalizado con ácido.....	14
2.3.4 Proceso de catalizado con enzimas.....	14
2.3.5 Proceso de biox no catalizado.....	14
2.3.6 Proceso supercrítico no catalizado.....	14
2.4 PROPIEDADES DEL ACEITE USADO EN COCINA.....	15
2.5 CARACTERÍSTICAS DE LA EFICIENCIA EN SU COMBUSTIÓN Y EMISIÓN DE UN MOTOR QUE UTILIZA BIODIÉSEL.....	16
2.6 AVANCES EN EL DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL...	17

2.7 DISEÑO DE EQUIPOS PRODUCTORES DE BIODIÉSEL.....	18
2.7.1 Modelos termodinámicos.....	18
2.7.2 Operaciones unitarias de una planta de biodiésel.....	18
2.7.3 Ejemplos de equipos demostrativos para la producción de biodiesel.....	21
2.8 NORMAS DE SEGURIDAD DE UNA PLANTA DE BIODIÉSEL.....	22
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	27
3.1 PLANTA DE BIODIÉSEL.....	27
3.1.1 Manejo de la materia prima.....	28
3.1.2 Manejo del biodiésel producido.....	29
3.2 SERVICIOS COMPLEMENTARIOS.....	29
CAPITULO IV: RESULTADOS.....	30
4.1 PLANEACIÓN DE LA PLANTA DE BIODIÉSEL.....	30
4.1.1 Materia prima en Ciudad Universitaria.....	30
4.1.2 Lugar de instalación.....	32
4.1.3 Materiales y equipos.....	33
4.1.4 Instalaciones hidráulicas.....	34
4.1.5 Otras instalaciones.....	37
4.2 CONFIGURACIÓN DE LA PLANTA DE BIODIÉSEL.....	38
4.2.1 Cálculos de eficiencia.....	38
4.2.2 Tiempos de producción.....	38
4.2.3 Mejoras.....	39
4.3 DISEÑO GLOBAL DE LA PLANTA DE BIODIÉSEL.....	40
4.3.1 Plano General.....	40
4.3.2 Especificaciones.....	41
4.3.3 Normatividad a seguir.....	41
4.3.4 Balance de materia y energía.....	43
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	45
Acrónimos.....	46
Referencias bibliográfica.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Potencial de efecto invernadero y permanencia en la atmosfera de los GEI.....	2
Tabla 1.2	Emisiones totales de GEI en el año 2006.....	3
Tabla 1.3	Principales países productores y consumidores de etanol.....	5
Tabla 1.4	Líderes de producción de biodiésel anual en el oeste de Europa.....	7
Tabla 1.5	Líderes de producción de biodiésel anual en el este de Europa.....	7
Tabla 1.6	Otros países europeos productores de biodiésel.....	7
Tabla 1.7	Países tercermundistas productores de biodiésel.....	8
Tabla 1.8	Comparación del biodiésel B20 con el diésel en un motor convencional.....	11
Tabla 2.1	Tipos de aceite y producción por hectárea.....	12
Tabla 2.2	Ventajas y desventajas del aceite vegetal.....	15
Tabla 2.3	Características físicas y químicas del diésel y aceites comestibles.....	16
Tabla 2.4	Propiedades físicas y químicas del biodiésel y diésel según la norma americana.....	17
Tabla 2.5	Propiedades físicas y químicas del biodiésel y diésel según la norma europea.....	18
Tabla 3.1	Tipo de almacenamiento de la materia prima.....	28
Tabla 4.1	Aceites en cafeterías y barras durante el periodo escolar.....	30
Tabla 4.2	Aceites en cafeterías y barras durante el periodo vacacional.....	30
Tabla 4.3	Total de aceites en cafeterías y barras durante el periodo II-2009.....	31
Tabla 4.4	Total anual de aceite.....	31
Tabla 4.5	Materia prima disponible.....	31
Tabla 4.6	Áreas de importancia en planta piloto.....	32
Tabla 4.7	Características de los materiales de construcción de las principales unidades para la planta de biodiésel.....	33
Tabla 4.8	Características del acero.....	34
Tabla 4.9	Características principales de la bomba de ¾ hp.....	35
Tabla 4.10	Tiempos de producción.....	38
Tabla 4.11	Costos de la obra civil de la planta de biodiésel	41

Tabla 4.12	Permisos para la eliminación de aguas residuales	42
Tabla 4.13	Emisiones de CO ₂ producidas por la quema de combustible.....	44
Tabla 4.14	Emisiones de CO ₂ por dos lotes de la planta de biodiésel.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1	Emisiones de CO ₂ en el mundo y Latinoamérica.....	2
Fig. 1.2	Emisiones de CO ₂ hasta el año 2035.....	3
Fig. 2.1	Aceite de jatrofa para biodiésel.....	12
Fig. 2.2	Consumo de aceite en el mundo.....	13
Fig. 2.3	Reacción de transesterificación.....	13
Fig. 2.4	Potencia versus mezcla de biodiésel / diésel.....	16
Fig. 2.5	Porcentaje de opacidad versus el tipo de mezcla.....	17
Fig. 2.6	Diagrama de flujo de una planta para la producción de biodiésel.....	20
Fig. 2.7	Equipo de producción de biodiésel.....	21
Fig. 2.8	Equipo de producción de biodiésel.....	22
Fig. 3.1	Etapas del proceso para la producción de biodiésel.....	27
Fig. 4.1	Prototipo de planta piloto.....	32
Fig. 4.2	Piezas hidráulicas de la planta de biodiésel.....	33
Fig. 4.3	Fotografía del material armafex como aislamiento térmico flexible.....	35
Fig. 4.4	Proceso de recirculación.....	36
Fig. 4.5	Etapa final del proceso de recirculación.....	36
Fig. 4.6	Diagrama eléctrico propuesto para la planta de biodiésel.....	37
Fig. 4.7	Plano general de la propuesta de la planta de biodiésel.....	40

Resumen

La sustitución total de combustibles fósiles por biocombustibles no es factible en México debido a la falta de infraestructura económica y de insumos para la fabricación de biocombustibles para satisfacer la demanda que se tiene del combustible fósil, la intención de este trabajo de tesis, es considerar el uso de biocombustibles para lograr la reducción del combustible fósil, y a su vez reducir los gases de efecto invernadero que tanto nos afectan.

En Ciudad Universitaria se generan 300 L/semana de aceite comestible de desecho (ACD) que proviene de los restaurantes y barras. Estos aceites, comúnmente se descargan al drenaje y a su vez se dirigen a la planta de tratamiento de aguas residuales de la UNAM. La presencia de aceites en el agua residuales provoca dificultades en el proceso de tratamiento biológico y físico de éstas aguas. Si los ACD se utilizaran para la generación de biodiésel, se pudiera abastecer al PUMABÚS de Ciudad Universitaria con el biodiésel en un 30% y 70% diésel (mezcla B30). La implementación de B30 disminuiría en un 30%, las emisiones gases efecto invernadero que actualmente generan estos autobuses con este tipo de mezcla en Ciudad Universitaria. En este trabajo se diseñó una planta prototipo para la conversión de los ACD en biodiésel.

La planta diseñada fue para un rendimiento de 200 litros por día. El tipo de reacción química que se eligió fue la de transesterificación alcalina con los reactivos hidróxido de sodio (NaOH) y metanol. Se hace una mezcla (metóxido) con estos reactivos, por cada litro de aceite se mezcla 20% de metanol y 1% de NaOH. El aceite es previamente calentado a 65°C con una resistencia de inmersión de 5500 watts para poder empezar la reacción. Se vierte el aceite calentado (150 litros) al reactor de acero inoxidable y el metóxido (30 litros de metanol y 630gr de NaOH) posteriormente, se hace recircular por medio de una bomba de $\frac{3}{4}$ hp durante 90 minutos para que la reacción de transesterificación se lleve a cabo.

Finalmente se extrae el glicerol por gravedad, que es el subproducto que se obtiene de la transesterificación y posteriormente el biodiésel. El biocombustible se pasa a través de un filtro por medio de una bomba de $\frac{3}{4}$ hp para remover impurezas, para almacenarlo y esté listo para su uso. Este diseño de la planta prototipo de biodiésel es de fácil manejo indicando paso a paso cada proceso para la obtención de un biodiésel de calidad grado automotriz.

Introducción

En México y en el mundo, uno de los mayores problemas de las grandes ciudades es la contaminación, ya sea por basura, ruido, gases de efecto invernadero, etc. Los gases de efecto invernadero afectan nuestra capa de ozono permitiendo que los rayos UV entren directamente a la superficie del planeta, esto provoca año con año el llamado calentamiento global afectando flora y fauna. Sólo en México, los principales agentes contaminantes son las emisiones causadas por los vehículos, el cual representa el 65% de las emisiones anuales de contaminantes en el país. Éstos gases son expulsados por la quema de combustibles ya sea en fábricas, en plantas carboeléctricas, medios de transporte que utilizan gasolina o diésel. Ahora existen varias alternativas para frenar la contaminación y así detener el calentamiento global.

Ya hay varias soluciones para producir electricidad, con plantas nucleoeeléctricas, con aerogeneradores, celdas solares, etc. También existe la alternativa para combustibles de los medios de transporte, sustitutos de gasolina y diésel que contaminan menos y que sería una gran ayuda para nuestro planeta. Ésta alternativa es la construcción de reactores que produzcan biodiésel a partir de aceites vegetales o animales. El biodiésel ha sido investigado al menos en 28 países alrededor del mundo. Existen 85 plantas de biodiésel en 21 países. Así se puede reducir la contaminación generada por motores diésel. Este método se llama transesterificación y consiste en convertir estos aceites en un combustible tan seguro como el diésel. Una segunda ventaja al tomar aceite vegetal usado para la producción de combustible es que se evita la contaminación del agua, ya que todo el aceite usado de cocina de ciudades y pueblos se va al drenaje o al suelo. Además al realizarse la transesterificación a parte del producto deseado se obtiene glicerol, que es utilizado en la industria del cosmético.

Es por ello la originalidad de este trabajo, ya que en Ciudad Universitaria en cafeterías y barras de comida se generan aproximadamente 300 L/sem de aceites comestibles de desecho (ACD) que se arrojan al drenaje o al suelo contaminando seriamente. Esta materia prima se está desechando sin ser aprovechada como combustible. Al producir biodiésel se puede reducir el consumo de combustibles derivados del petróleo en CU, ya que existe un sistema de transporte y así contribuir con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además se puede utilizar para fines didácticos, principalmente para alumnos de licenciatura y maestría que quieran aprender sobre biocombustibles y las ventajas que estos nos ofrecen.

OBJETIVO

Diseñar técnicamente un prototipo para construirse en Ciudad Universitaria para la producción de biodiésel a partir de Aceite Comestible de Desecho a nivel demostrativo obteniendo una calidad grado automotriz.

ANTECEDENTES

1.1 Gases de efecto invernadero

Se denominan gases de efecto invernadero a los gases cuya presencia en la atmósfera contribuyen al efecto invernadero. Los más importantes están presentes en la atmósfera de manera natural, aunque su concentración puede verse modificada por la actividad humana, pero también entran en este concepto algunos gases artificiales, producto de la industria.

Vapor de agua (H_2O): Es un gas que se obtiene por ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo. Es el que más contribuye al efecto invernadero debido a la absorción de los rayos infrarrojos. Es inodoro e incoloro.

Dióxido de carbono (CO_2): Es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Su fórmula química es CO_2 . La principal fuente de emisión de dióxido de carbono a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles y biomasa (gas natural, petróleo, combustibles, leña) en procesos industriales, transporte, y actividades domiciliarias (cocina y calefacción). Los incendios forestales y de pastizales constituyen también una fuente importante de CO_2 atmosférico.

Metano (CH_4): Es un gas compuesto por cuatro átomos de hidrogeno y uno de carbono. Es incoloro e inodoro y apenas soluble en agua en su fase líquida. En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas. Este proceso natural se puede aprovechar para producir biogás. Es muy peligroso ya que es fácilmente inflamable y explosivo. El metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente que contribuye al calentamiento global del planeta Tierra.

Óxidos de nitrógeno (NO_x): El término óxidos de nitrógeno se aplica a varios compuestos químicos gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno. El proceso de formación más habitual de estos compuestos inorgánicos es la combustión a altas temperaturas, proceso en el cual habitualmente el aire es el comburente. El monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno constituyen dos de los óxidos de nitrógeno más importantes toxicológicamente, ninguno de los dos es inflamable.

Los óxidos de nitrógeno son liberados al aire desde el escape de vehículos motorizados (sobre todo diésel), de la combustión del carbón, petróleo o gas natural y durante procesos tales como la soldadura por arco y detonación de dinamita.

Ozono (O_3): El ozono, es una sustancia cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno, formada al disociarse los 2 átomos que componen el gas de oxígeno. Cada átomo de oxígeno liberado se une a otra molécula de oxígeno (O_2), formando moléculas de Ozono. A temperatura y presión ambientales el ozono es un gas de olor acre y generalmente incoloro, pero en grandes concentraciones puede volverse ligeramente azulado. Si se respira en grandes cantidades, es tóxico y puede provocar la muerte.

Clorofluorocarbonos (artificiales): Denominados también CFC's es cada uno de los derivados de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de flúor y/o cloro principalmente. Debido a su alta estabilidad fisicoquímica y su nula toxicidad, han sido muy usados como líquidos refrigerantes, agentes extintores y propelentes para aerosoles. Los CFC's poseen una capacidad de supervivencia en la atmósfera, de 50 a 100 años (Graedel y Crutzen, 2003).

La Tabla 1.1 muestra el potencial de efecto invernadero y permanencia en la atmósfera de estos gases.

Tabla 1.1 Potencial de efecto invernadero y permanencia en la atmósfera (IPCC, 2007; Brühl, 2004).

Gas	Potencial Efecto Invernadero	Permanencia en la atmósfera
Dióxido de carbono CO ₂	1 (referencia)	5 a 200 años
Metano CH ₄	23	12 años
Óxidos de nitrógeno NO _x	296	114 años
Clorofluorocarbonos	5,700	50 años
Hidrofluorocarbonos	12,000	2 años

1.2 Emisiones por uso del transporte

La contaminación atmosférica es cualquier cambio en el equilibrio de estos componentes, lo cual altera las propiedades físicas y químicas del aire. En México, la contaminación atmosférica aparece con más frecuencia en las zonas de alta densidad demográfica o industrial. Los principales agentes contaminantes son las emisiones causadas por los vehículos, el cual representa el 65% de las emisiones anuales de contaminantes en el país. Las emisiones de CO₂ son las principales por el uso de transporte, se encuentran en el segundo lugar. La Figura 1.1 muestra las emisiones de CO₂ en el mundo y en Latinoamérica

De los gases más tóxicos se encuentran el dióxido de sulfuro y dióxido de nitrógeno, que son dos de los agentes más perjudiciales para la salud, son desde irritación de ojos, nariz y garganta hasta infecciones respiratorias, como bronquitis y neumonía. Y a largo plazo puede significar infecciones respiratorias crónicas, cáncer de pulmón, problemas cardíacos e incluso daño cerebral y en el sistema nervioso. El Banco Mundial clasificó la ciudad de México como una de las más altas en la emisión de las sustancias tóxicas antes mencionadas (Alvarado, 2002).

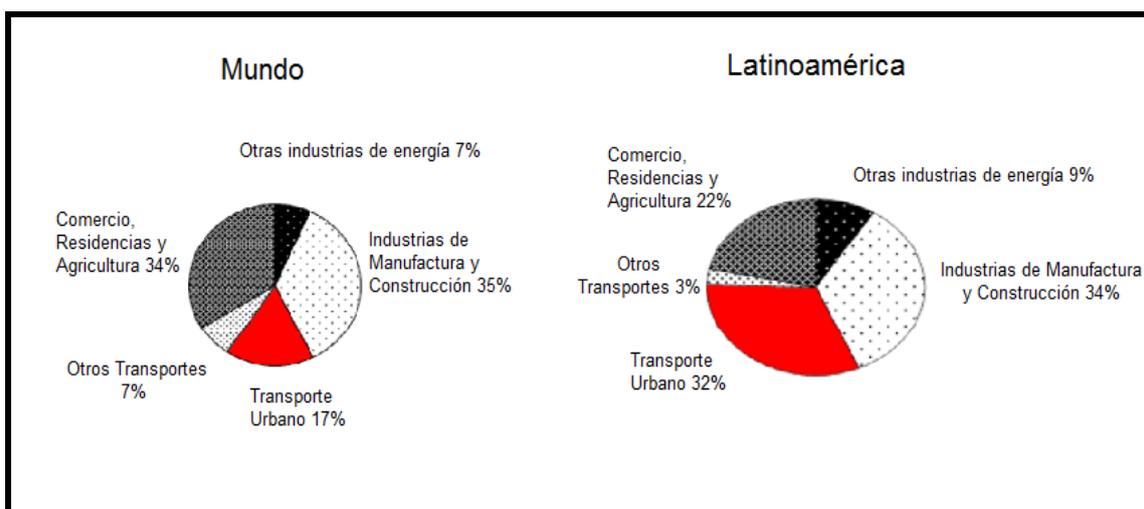


Figura 1.1 Emisiones de CO₂ en el mundo y Latinoamérica (Vera, 2002)

Los principales combustibles consumidos en el mundo son el carbón, los combustibles líquidos y el gas natural. En la Figura 1.2 se muestra la cantidad de emisiones de CO₂ estimada hasta el 2035.

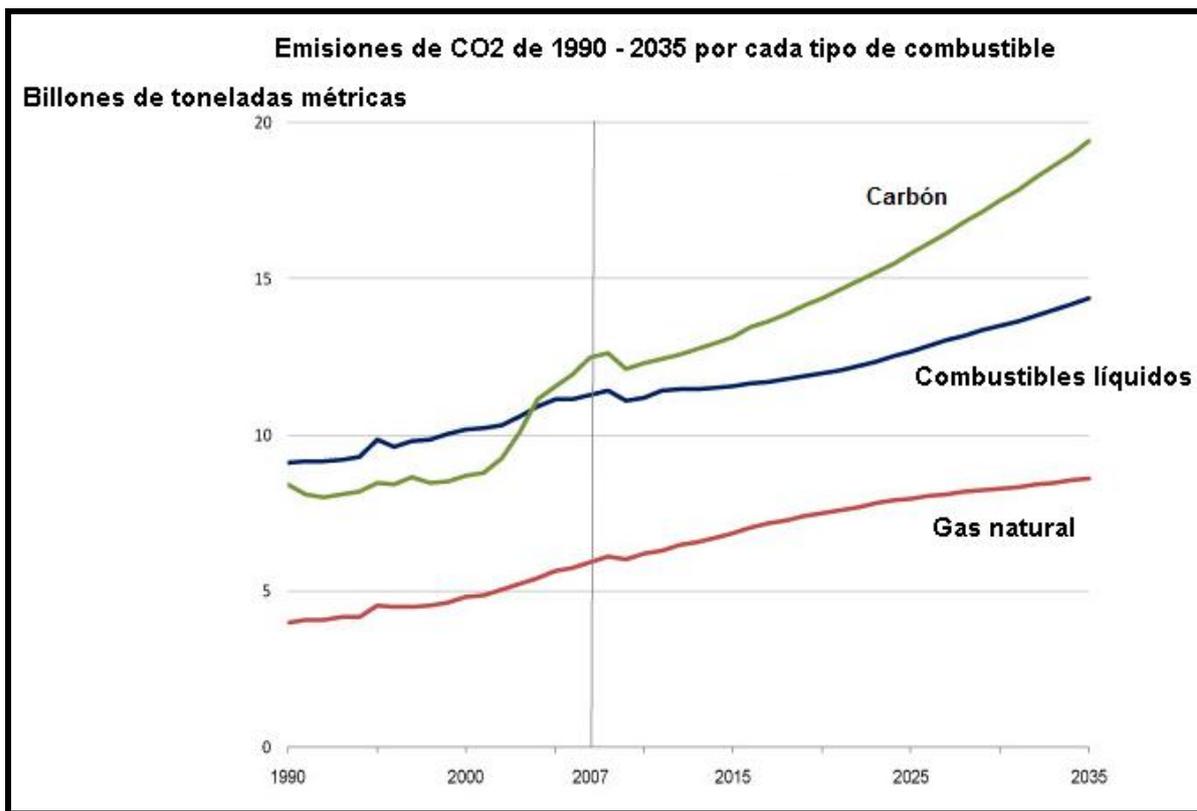


Figura 1.2 Emisiones de CO₂ hasta el año 2035 (EIA, 2011)

De acuerdo con datos de la Tercera Comunicación Nacional presentada por México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, y el Inventario Nacional de Emisiones 1990-2002, México contribuye con cerca del 1.5% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), estimándose en poco más de 643 millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono, con lo que se ubica en el lugar 12 entre los países con mayores emisiones a escala mundial. De esta contribución se ha estimado que la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) aporta el 6.7% de las emisiones nacionales de GEI.

Se estimó que en el año 2006 en la ZMVM se generaron: por el consumo de energéticos (gasolinas, diésel, gas natural y gas licuado de petróleo), por la descomposición de la basura en los rellenos sanitarios y por los incendios forestales, 37.7 millones de toneladas de CO₂, 250,900 toneladas de CH₄ y 1,419 toneladas de N₂O. En la Tabla 1.2 se muestra las emisiones totales de GEI en el 2006 (INEGEI, 2002).

Tabla 1.2 Emisiones totales de GEI en el año 2006 (INEGEI, 2002)

SECTOR	Emisiones de GEI (ton/año)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Industrial	10,345,252	223	29
Comercial - servicios	972,601	19	2
Residencial / habitacional	4,233,924	102	7
Transporte carretero	21,139,856	3,760	1,315
Otras fuentes	1,069,149	246,796	66
Total	37,760,782	250,900	1,419

1.3 Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles son combustibles orgánicos primarios y/o secundarios derivados de la biomasa. Estos pueden ser sólidos, gaseosos o líquidos (FAO, 2001).

Los biocombustibles son una fuente de energía renovable ya que proceden de fuentes agrícolas (semillas, caña de azúcar, oleaginosas), además de biomasa forestal y otras fuentes de materia orgánica. Son usados de forma aislada o añadidos en mezclas con combustibles fósiles (Herrero y col., 2003).

1.3.1 Etanol

El alcohol es producido por fermentación de productos azucarados como la caña de azúcar. También puede obtenerse de los granos de cereales como trigo, la cebada y el maíz, previa hidrólisis o transformación en azúcares fermentables del almidón contenido en ellos. El bioetanol se utiliza en vehículos como sustituto de la gasolina. Casi toda la gasolina vendida en los EE.UU. ahora contiene un poco de etanol. Alrededor del 99% del etanol, combustible que se consume en los EE.UU. se añade a la gasolina en mezclas de hasta el 10% de etanol y 90% de gasolina. Cualquier motor de gasolina en los EE.UU. puede utilizar E10 (gasolina con un 10% de etanol), pero sólo determinados tipos de vehículos pueden utilizar mezclas con más del 10% de etanol. La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. dictaminó en octubre de 2010, que los automóviles y camionetas de modelos del año 2007 y más nuevos pueden utilizar E15. A diferencia de la gasolina, el etanol puro no es tóxico y es biodegradable, que rápidamente se descompone en sustancias inofensivas si se derrama. Sin embargo, desnaturalizantes químicos se añaden al combustible de etanol (en cantidades relativamente pequeñas) para que sea potable. Similar a la gasolina, el etanol es un líquido altamente inflamable y deben ser transportados cuidadosamente. Mezclas de etanol y gasolina de combustión más limpia y tiene mayor octanaje que la gasolina pura, pero tienen una mayor "de las emisiones por evaporación" de los tanques de combustible y equipos de dosificación. Estas emisiones por evaporación contribuyen a la formación de los dañinos, el ozono troposférico y el smog. La gasolina requiere un procesamiento adicional para reducir las emisiones por evaporación antes de que sea mezclada con etanol. El etanol puede ser considerado como neutro en carbono ya que las plantas que se utilizan para la producción de etanol combustible (como el maíz y la caña de azúcar) absorben el CO₂ a medida que crecen y pueden compensar las emisiones de CO₂, ésto pasa cuando el etanol se produce y se quema. En los EE.UU., el carbón y el gas natural se utilizan como fuentes de calor en el proceso de fermentación para producir etanol combustible. El impacto del uso de etanol en las emisiones netas de dióxido de carbono depende de cómo el etanol está hecho. Además, el cultivo de plantas para el combustible es objeto de controversia, como la tierra, los fertilizantes ya que la energía utilizada para producir cultivos para biocombustibles podría ser utilizada para el cultivo de alimentos (EIA, 2010).

En 2006, la producción mundial total de etanol en todos sus grados fue de 51.061 millones de litros y los dos principales productores mundiales son EE.UU. y Brasil, que juntos producen el 70% del total de etanol, seguidos por China, India y Francia. Incentivos del mercado han provocado el desarrollo de crecientes industrias en países como Tailandia, Filipinas, Guatemala, Colombia, y República Dominicana. En Europa, tanto Alemania como España han incrementado considerablemente su producción de etanol. En la Tabla 1.3 se muestran los principales países productores y consumidores de etanol en el mundo entre el año 2004 y 2006 (RFA, 2012).

Tabla 1.3 Principales países productores y consumidores de etanol (RFA, 2012)

Clasificación mundial	País	Año 2006	Año 2005	Año 2004
		litros	litros	litros
1	Estados Unidos	18,378,117	16,140,945	13,381,389
2	Brasil	17,000,231	16,000,885	15,099,960
3	China	3,849,751	3,800,541	3,649,125
4	India	1,900,270	1,699,644	1,748,854
5	Francia	950,135	908,496	829,002
6	Alemania	764,650	431,535	268,763
7	Rusia	647,303	749,509	749,509
8	Canadá	579,166	230,909	230,909
9	España	461,818	352,042	299,046
10	Sudáfrica	386,110	389,896	416,394
11	Tailandia	352,042	299,046	280,119
12	Reino Unido	280,119	348,256	401,252
13	Ucrania	268,763	246,051	249,836
14	Polonia	249,836	219,553	200,626
15	Arabia Saudita	196,840	121,132	299,046
	Otros países	4,796,102	4,054,164	2,664,922
	TOTAL	51,061,253	45,992,610	40,768,758

1.3.2 Biodiésel

Es un combustible alternativo renovable que se produce a partir de materia orgánica de fuentes agrícolas (aceites y grasas vegetales) y animales (sebo, manteca). Según la American Society of Testing and Materials (ASTM), el biodiésel técnicamente se define como: Un combustible compuesto por mono-alquil ésteres de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas de origen vegetal y animal (NBB, 2007).

El biodiésel es un combustible con características físicas y químicas semejantes al diésel (gasóleo, petrodiesel) obtenido de la refinación del petróleo, pero presenta varias ventajas sobre éste, ya que es renovable, biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y aromáticos, por lo que resulta ser un combustible limpio al tener en general menos emisiones contaminantes. Por lo anterior, su principal aplicación es como biocombustible en motores para automóviles (Larosa 2004).

Actualmente es producido y utilizado en toda Europa y ha ido ganando popularidad mundial como energía renovable debido a sus muchas ventajas, pues con el consumo de biodiésel se reducen las emisiones de CO₂, de sulfuros, el humo visible y los gases nocivos. Uno de los principales beneficios del biodiésel es su bajo contenido de azufre y que, debido a la presencia de oxígeno en su composición química, su combustión es más completa, reduciendo la emisión de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, entre otros contaminantes (Larosa, 2003).

Por otro lado, durante su proceso de producción se obtiene un subproducto altamente valorado, como es el caso de la glicerina, la cual luego de su purificación puede ser utilizada, en múltiples usos, en la industria farmacéutica y cosmética, donde cuenta con una gran demanda (Castro y col., 2006).

1.4 Uso del biodiésel

Además de su utilización como combustible de automóviles, tiene otros usos. Se muestran a continuación:

- Se utiliza para calentadores, linternas y estufas.
- Puede ser utilizado como sustituto de combustible de aviación en el modelo de motores de aviones con bujías incandescentes.
- Puede ser utilizado como solvente para la pintura automotriz, pintura en spray y otros productos químicos adhesivos.
- Es un excelente limpiador de partes de los componentes de un motor. Piezas que se dejaron en un recipiente con biodiésel durante la noche suelen ser limpiados por la mañana.
- Puede ser utilizado como lubricante de maquinaria de uso general.
- Se puede utilizar para limpiar derrames de aceite de petróleo en tierra o en agua.

Las mezclas de biodiésel y diésel convencional basada en hidrocarburos son los productos más habitualmente distribuidos para su uso en el mercado. Gran parte del mundo utiliza un sistema conocido como la "B", factor que indica la cantidad de biodiésel en cualquier mezcla de combustible: el combustible que contiene 20% de biodiésel tiene la etiqueta B20, mientras que el biodiésel puro se denomina B100. Las mezclas con 80% de biodiésel y 20% de diésel B80 se pueden utilizar en general en motores diésel sin modificar. El biodiésel también puede ser utilizado en su forma pura B100, pero puede requerir algunas modificaciones del motor para evitar problemas de mantenimiento y rendimiento.

Para el combustible usado en sistemas de calefacción y calderas se permite hasta un 5% de biodiésel. Esto es que las mezclas B5 se traten de la misma manera que el diésel (Tickell, 2003).

1.5 El biodiésel alrededor de mundo

El biodiésel ha estado creciendo desde 1980 hasta hoy en Estados Unidos de América y en el extranjero. Muchas universidades incluyendo la Universidad de Idaho, la Universidad de Missouri y la Universidad de Graz han investigado y probado el biodiésel. Hay más de 1,000 estaciones de biodiésel en Alemania, en Italia se utiliza como combustible de calefacción en los hogares, en EE.UU. la mayoría de los autobuses escolares funcionan con biodiésel y en otras partes del mundo también. El biodiésel ha sido investigado al menos en 28 países alrededor del mundo. Existen 85 plantas de biodiésel en 21 países. Europa genera 2/3 partes del biodiésel mundial, mientras que EE.UU. y el resto del mundo genera 1/3 parte (Tickell, 2003).

1.5.1 Europa

Han sido dos factores que han permitido a la Unión Europea convertirse en los líderes en la producción de biodiésel. La primera tiene que ver con una Política Agrícola en Común (CAP) que está orientada a una política de cultivos de los miembros de la Unión Europea en donde se promovió el subsidio a los productores de granos, oleaginosas y cultivos proteínicos que dedicaran un 10% de sus tierras para la producción de insumos para obtener el biodiésel.

El segundo factor son los altos impuestos en los combustibles, que han permitido establecer subsidios directos a los biocombustibles a partir de una parcial o total exención de impuestos, tan sólo en el año de 1994 el Parlamento Europeo exento en un 90% los impuestos al biodiésel, en Alemania el biodiésel está exento al 100% de impuestos (CONAE, 2007).

- En el oeste de Europa se encuentran 45 plantas de biodiésel de las cuales están 11 en Italia.
- En el este de Europa se encuentran 29 plantas de biodiésel, de las cuales 16 plantas están en República Checa.
- Suiza, Noruega, Yugoslavia, Portugal y Grecia producen biodiésel a pequeñas escalas (Pahl 2005).

Las Tablas 1.4, 1.5 y 1.6 muestran los países líderes de producción de biodiésel anual en Europa.

Tabla 1.4 Líderes de producción de biodiésel anual en el oeste de Europa (Pahl, 2005)

País	Producción hasta el 2003
Alemania	696,413, 770 litros
Francia	392,134, 522.8 litros
Italia	224,995, 218 litros
Austria	26,785, 145 litros

Tabla 1.5 Líderes de producción de biodiésel anual en el este de Europa (Pahl, 2005)

País	Producción hasta el 2003
República Checa	53,570,290 litros
Eslovaquia	535,702.9 a 1,607,108.7 litros

Tabla 1.6 Otros países europeos productores de biodiésel (Pahl, 2005)

País	Datos
España	Produjo 428,562,320 litros en el año 2010
Bélgica	Dos plantas que producen 107,140,580 litros
Dinamarca	Produjo 10,714,058 litros en el año 2002
Reino Unido	Produjo 535,702,900 litros en el año 2005
Escocia	Produjo 53,570,290 litros en el año 2005
Polonia	Produjo 7,499,840.6 litros para el año 2004

1.5.2 Estados Unidos de América (EE.UU.)

La producción anual de biodiésel en este país fue de aproximadamente 570 millones de litros en 2004, 80% a partir de la soya, 19% de grasa amarilla (aceite vegetal con grasa animal) y un 1% de otros cultivos. En enero de 1999 sólo algunas flotas utilizaban biodiésel, para septiembre de 2001, el número se incrementó en más de un 100%. La principal aplicación vehicular que se tiene del biodiésel en este país está en las flotas vehiculares del ejército así como de agencias gubernamentales, sin embargo los gobiernos estatales y el Ministerio de Energía han venido trabajando en expandir el mercado del biodiésel con base en reconocimiento que obtuvo el empleo de biodiésel (B100) como combustible alternativo. Entre los gobiernos estatales más activos en promover el uso del biodiésel se encuentra el de Minnesota; que a partir del año 2005 promovió un mandato para que el diésel destinado al autotransporte contenga un 2% de biodiesel (CONAE, 2007).

Estados Unidos de América en el biodiesel se considera (Tickell, 2003; Pahl, 2005):

- Cuenta con 7 plantas de biodiésel.
- Genera 11.3 billones de litros de aceite usado al año, utilizándose la mitad de este aceite para fabricar biodiésel, representaría el 2.5% del mercado de petrodiesel.
- 1/5 parte del aceite utilizado en Nueva York podría funcionar para todo el sistema de transporte público de autobuses de esa ciudad.

1.5.3 Países de tercer mundo

Para los productores actuales y potenciales de biocombustibles en América Latina, Asia y África, un escenario de exportación de biocombustibles en gran escala implicaría que buena parte de las tierras agrícolas, dedicadas actualmente a la producción de alimentos, serían utilizadas para cultivar materias primas para la producción de combustibles. En un mundo que cuenta con más de 850 millones de hambrientos, este modelo resulta extremadamente excluyente, pues pondría en mayor peligro la soberanía alimentaria y la salud de los ecosistemas en diversas partes del planeta, sobre todo en el área subdesarrollada. Bajo este esquema, los países del Tercer Mundo aportarían la tierra y su fertilidad, mano de obra barata y se quedarían con todos los daños ambientales provocados por las grandes plantaciones de las que se extraerán los biocombustibles (CIEM, 2006).

La Tabla 1.7 muestra la producción de biodiésel de los países tercermundistas.

Tabla 1.7 Países tercermundistas productores de biodiésel (Pahl, 2005)

País	Datos
Sudáfrica	Cada año produce 278,565,508 litros
Brasil	Cada año produce 14,999,681.2 litros
Paraguay	Produjo 64,284,348 litros para el año 2002
Argentina	Tiene 14 proyectos para producir biodiésel en pequeñas escala
Colombia	Planea una planta de biodiésel que produzca 228,209.4354 litros

1.6 Biodiésel en el futuro

Existe un proyecto llamado “green diesels”. Consiste en la fabricación de motores nuevos, estos motores diesel se han desarrollado recientemente, no requieren de nuevas instalaciones de fabricación, alcanzan un nivel de contaminación inferior comparando con los motores de gasolina actuales, y la eficiencia del combustible es doble. Algo muy importante el costo de esta nueva tecnología Diésel es comparable con la producción normal de los diseños con motores de gasolina (Tickell, 2003).

Para nuestro país se sugiere una estrategia gradual de introducción del biodiésel. De manera inmediata, la introducción del biodiésel podría basarse sobre todo en el uso de materias primas de bajo costo como aceites y grasas recicladas. En el mediano plazo se requerirán esquemas de incentivos para la introducción del biodiésel de manera masiva a fin de permitir la sustitución de entre el 2% y 5% del diésel de petróleo después del 2012. Para lograr estas metas se necesita un plan de desarrollo del mercado de éste combustible que contemple aspectos como: establecer de manera inmediata el marco legal –por ejemplo, una directiva de biodiésel con metas claras, estándares nacionales para éste combustible e incentivos a la producción agrícola y comenzar a desarrollar una industria nacional de producción de biodiésel, incluyendo actividades de capacitación y de investigación y desarrollo. Asimismo, se necesita aumentar de manera muy significativa el área de cultivos oleaginosos, puesto que nuestro país no cubre actualmente ni siquiera la demanda de aceites comestibles.

Para llegar a sustituir un 5% del diésel de petróleo en el país será necesario instalar 10 plantas industriales con capacidad de 100.000 t/año cada una o más de 140 plantas pequeñas con capacidad de 5,000 t/año cada una. Para optimizar el suministro de los cultivos agrícolas, y reducir el costo de distribución de biodiésel y sus subproductos, las plantas de producción deben instalarse en las cercanías de refinerías o de las plantas productoras de aceites vegetales. Desde el punto de vista logístico, la mejor opción son plantas integradas de producción de aceites vegetales y biodiésel. Las inversiones estimadas para llegar al escenario de 5% de biodiésel alcanzan \$3,100 millones de pesos, puesto que cada planta industrial de gran escala tiene un costo unitario de \$311 millones de pesos. Aunque la producción de biodiesel estaría orientada al mercado nacional, el combustible podría también exportarse ocasionalmente a otros mercados como Europa o los Estados Unidos.

Las ventajas de un programa nacional de biodiésel serían muy importantes. Desde el punto de vista ambiental, la sustitución de diésel de petróleo por biodiésel permitiría ahorrar alrededor de 7.5 millones de toneladas de CO₂/año hacia el 2014. La producción a gran escala de biodiésel en México requiere de un esfuerzo importante en investigación y desarrollo. Las actividades que deberían enfatizarse son, por ejemplo, el establecimiento de investigación agrícola para mejorar la productividad de cultivos energéticos, especialmente para ampliar las variedades de las diferentes especies, y el establecimiento de nuevos sistemas de cultivo.

Otra medida necesaria sería la creación de centros de investigación y desarrollo regional sobre biodiésel/biocombustibles y aportar continuamente fondos. Las industrias privadas deberían ser bienvenidas a participar, pero los fondos básicos deberían ser aportados por el Gobierno para asegurar la disponibilidad de la información relevante de los interesados. Estos fondos de base podrían ser aportados a través de un módico impuesto estatal sobre los biocombustibles. En estos centros deberían llevarse a cabo programas de alcance institucional y de asistencia técnica y parte de éste esfuerzo podría ser combinado con los centros existentes de investigación y tecnología agrícola operados por Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura en el Banco de México FIRA (SENER, 2006).

1.7 Combustión del biodiésel

La combustión del biodiésel tiene ventajas comparadas con las del diésel. Al fabricar combustible con aceites vegetales transesterificados, mejora notablemente las combustiones, haciéndolas menos contaminantes de la atmósfera, por no contener azufre. El azufre presente en los combustibles derivados del petróleo, luego de la combustión se transforma en ácido sulfúrico.

Otro aspecto importante es lo referente al famoso efecto invernadero, este efecto es responsable de un lento pero sostenido incremento de las temperaturas medias de todo el planeta, debido a la masiva contaminación de CO₂ en la atmósfera terrestre. El CO₂ desprendido en la combustión del biodiésel no posee este inconveniente, ya que en todo caso es un combustible con carbono que ya forma parte de la corteza terrestre. Los derivados de petróleo vienen debajo de ella, resultando más CO₂ en la superficie después de la combustión (Algorta, 2006).

1.8 Emisiones del biodiésel

Las emisiones del biodiesel son sustancialmente mas bajas que las del diésel. A continuación se muestran las reducciones en la combustión del biodiésel (Tickell, 2003).

- Reducción de las emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) en un 100%
- Reducción de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) en un 100%
- Reducción de las emisiones de monóxido de carbono (CO) de un 10% - 50%
- Reducción de las emisiones de hidrocarburos de un 10% - 50%
- Reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de un 5% - 10% dependiendo el año del vehículo y el ajuste del motor.

1.9 Rendimiento del biodiésel

Engelman y col. (1978) reportaron que el biodiésel proveniente del aceite de soya en proporción de 10-50%, mezclado con diésel minimiza los depósitos de carbón en la cámara de combustión. Quick (1980) se basó en 30 diferentes aceites vegetales para operar un motor de compresión y reportaron que el uso de combustibles de aceite vegetal crudo puede llegar a tener fallas prematuras en el motor. Se encontró que los aceites mezclados con diésel es un método para reducir el atascamiento y alargar la vida del motor.

Sims y col. (1981) indicaron que pruebas cortas en motores con una mezcla B50 no tuvo efectos adversos sobre el motor. Se encontró que los depósitos de carbono sobre los componentes de la cámara de combustión son muy similares a los que se obtienen con el uso de diésel al 100%.

Singh (2010) menciona el uso de diferentes aceites, tales como aceite de cacahuete, algodón, girasol y soya, en mezclas con diésel que están siendo probadas. German y col. (1985) reportaron que los depósitos de carbón sobre los componentes internos fueron más altos para el tractor cuando se alimento con una mezcla B50 (aceite de girasol) que con la B25 (aceite de girasol). Sapaun y col. (1996) reportaron que la potencia estimada cuando se utiliza aceite de palma B100 o mezclado con diésel es muy similar a la obtenida cuando se maneja al diésel al 100%. Además se observó que utilizando el aceite de palma por periodos cortos de tiempo, no se observan adversidades en el motor.

Pestes y Stanislaw (1984) utilizaron gradualmente, mezclas de aceite vegetal con diésel para estudiar la cantidad de depósitos sobre los anillos del pistón que provocaba el porcentaje de aceite mezclado. Se observó que los anillos se atascaron por los depósitos de carbón que se formaron cuando la cantidad de aceite vegetal iba aumentando en la mezcla, así que ellos recomendaron la adición de un aditivo a la mezcla, o ésta última con un bajo porcentaje de aceite vegetal.

McDonnell y col. (2000) estudiaron el comportamiento de un aceite de colza semirrefinado como combustible, y los resultados arrojaron que el aceite de colza alarga la vida del motor, mezclado en un 25% con combustible diésel. En la Tabla 1.8 se muestran características generales que se tomaron en cuenta para la prueba del biodiésel B20 y diésel en un motor de un camión convencional.

Se concluyó que los fabricantes de motores diésel, mantienen sus garantías sobre los mismos cuando se utiliza biodiésel B20, ya que implican suficiente evidencia de que el uso de B20 en motores diésel existentes permite una durabilidad similar a la del diésel y puede a lo largo de los años mejorar la durabilidad debido a una combustión más limpia y a la naturalmente elevada lubricidad del biodiesel (INTI, 2008).

Tabla 1.8 Comparación de ventajas del biodiésel B20 en un motor convencional (INTI, 2008)

Características principales de un motor	Ventajas
Beneficio en Emisiones	Reduce partículas en suspensión, monóxido de carbono e hidrocarburos totales.
Ajuste y regulación de motor	No necesaria
Potencia	Similar
Consumo	Similar
Lubricidad	Mayor
Seguridad	Sin peligro de explosión por emanaciones
Temperatura de ignición	Mayor
Almacenaje	Similar
Emanaciones	Menos agresivas

FUNDAMENTOS

2.1 Aceites vegetales

El aceite vegetal es un compuesto orgánico obtenido a partir de semillas u otras partes de las plantas en cuyos tejidos se acumula como fuente de energía. Algunos no son aptos para consumo humano, como el de castor o algodón (Figura 2.1). Los aceites son un componente principal y esencial de la dieta humana, constituyen una fuente de energía de primer orden ya que proporcionan 9 kcal/g en comparación a las proteínas y carbohidratos que rinden solo unas 4 kcal/g. Los aceites aportan vitaminas liposolubles que cumplen funciones hormonales y de regulación metabólica, donde su ingestión mejora la absorción de estas vitaminas independientemente de su origen, además de ser indispensables para lograr una dieta apetitosa y equilibrada (Ziller, 1996).

Los aceites pertenecen al grupo denominado lípidos, que engloba una gran variedad de biomoléculas. Las definiciones actuales se basan en que las moléculas de los lípidos son derivados reales o potenciales de los AG (Ácidos Grasos), constituyendo la base de estas moléculas lipídicas, a la vez que determinan marcadamente sus propiedades (Chapman, 1993). Las características y estado físico de los aceites a temperatura ambiente se deben principalmente a su estructura molecular, número de átomos de carbono en las cadenas hidrocarbonadas, su grado de saturación, formas isoméricas de los AG y los métodos de producción utilizados (Vicente, 1988).



Figura 2.1 Aceite de jatrofa para biodiésel

Como todas las grasas está constituido por glicerina y tres ácidos grasos. En la Tabla 2.1 se muestran algunos tipos de aceite y la producción de aceite por hectárea.

Tabla 2.1 Tipos de aceite y producción por hectárea (Pahl, 2005)

TIPO DE ACEITE	PRODUCCIÓN L aceite/ha
PALMA	5, 950
COCO	2, 689
JATROFA	1, 590
CANOLA	1, 190
CACAHUATE	1, 059
GIRASOL	952
CÁRTAMO	779
MOSTAZA	572
SOYA	446
MAÍZ	172

2.2 Potencial del aceite de cocina usado para producción de biodiésel

El aceite vegetal usado es un gran recurso de bajo costo para la producción de biodiésel, y es cada vez más utilizado en los Estados Unidos, y en menor medida en Europa y en otros lugares. Sin embargo, es de una calidad inferior debido a las altas temperaturas a las que se ha sometido, la contaminación posible con grasas animales y las partículas de alimentos. El aceite de cocina usado requiere un tratamiento adicional, antes y después del proceso de transesterificación. Por ejemplo filtración, el potencial de este tipo de aceite es el mismo (Pahl, 2005). En la Figura 2.2 se muestra el consumo de aceite en el mundo.

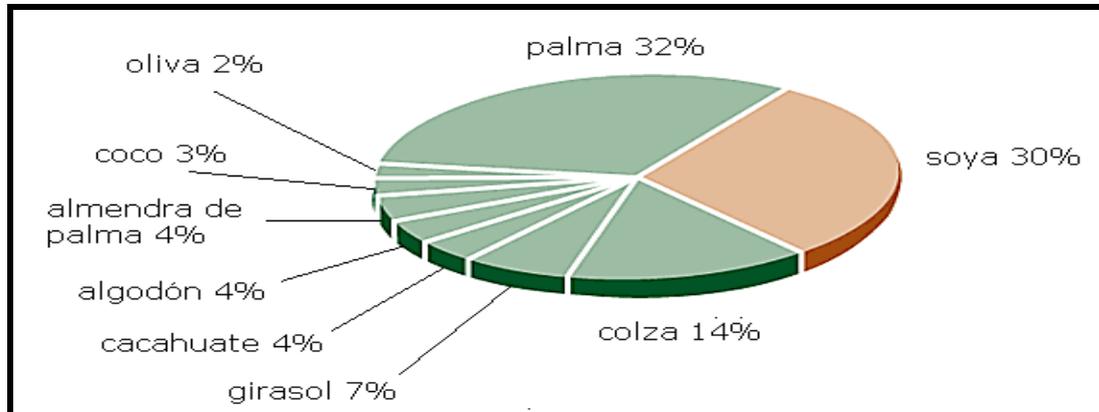


Figura 2.2 Consumo de aceite en el mundo (AAS, 2009)

2.3 Procesos de producción de biodiésel

Existen seis métodos para la producción de biodiésel, éstos pueden ser catalíticos y no catalíticos. Se utiliza comúnmente el de la transesterificación ya que permite un alto rendimiento en la reacción, el tiempo de producción es menor y el costo es bajo comparado con los que se mencionan a continuación. Algunos de dichos métodos siguen en investigación (Plascencia, 2010).

2.3.1 Proceso de transesterificación

Consiste en una reacción química entre los triglicéridos del aceite y alcohol, en presencia de un catalizador ya sea hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) también conocido como sosa cáustica o lejía. El metanol es el alcohol de uso común debido a su bajo costo. El producto obtenido es el biodiésel, además se produce glicerol como subproducto que tiene alto valor en el mercado (Pahl, 2005). En la Figura 2.3 se muestra la ecuación de la transesterificación.

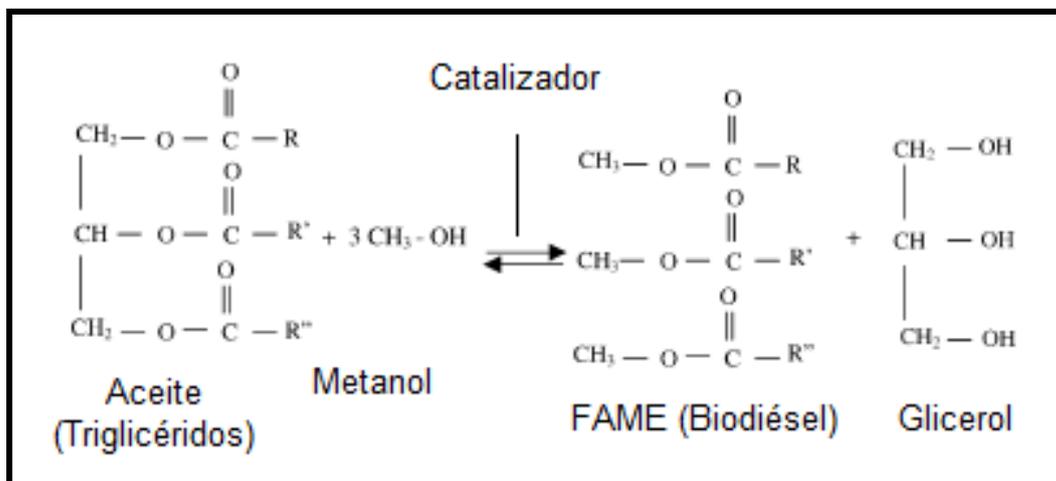


Figura 2.3 Reacción de transesterificación (Zhang y col., 2003)

2.3.2 Proceso de catalizado con álcali

Este método emplea como catalizador KOH y NaOH y es semejante a la catálisis ácida, pero se efectúa en dos etapas. Primero se realiza la esterificación de los ácidos grasos libres (AGL) presentes en el aceite, y así evitar reacciones de saponificación en la segunda etapa. En la segunda etapa ocurre la reacción de transesterificación. Inicialmente se mezcla homogéneamente el metanol y el catalizador en un reactor, para posteriormente agregar el aceite y la mezcla de alcohol/catalizador en otro reactor. Una reacción efectiva dará dos fases líquidas: una es el biodiesel y otra glicerina; por último estos líquidos deben ser purificados para obtener un producto de calidad deseada (Demirbas, 2009).

2.3.3 Proceso de catalizado con ácido

Primero el catalizador se disuelve en el metanol por agitación en un reactor, los principales catalizadores ácidos son (H_2SO_4) ácido sulfúrico y (HCl) ácido clorhídrico, posteriormente el aceite y la disolución alcohol/catalizador se mezclan en un reactor donde se efectúa la transesterificación. Los catalizadores ácidos generan altos rendimientos de ésteres metílicos pero la reacción es lenta. La relación molar de alcohol/aceite vegetal es el principal factor de reacción, un exceso de alcohol aumenta el rendimiento de formación de los ésteres metílicos, pero por otro lado dificulta la recuperación del glicerol, entonces la relación óptima de alcohol/aceite debe ser establecida empíricamente, considerando cada proceso individualmente (Demirbas, 2009).

2.3.4 Proceso de catalizado con enzimas

Aunque el proceso de transesterificación por catálisis enzimática aun no se ha desarrollado comercialmente, los últimos estudios se han dirigido a la optimización de las condiciones de reacción (disolventes, temperatura, pH, tipo de microorganismo que genera la enzima, entre otros). Sin embargo, en este momento el rendimiento y el tiempo aún son desfavorables respecto a los otros métodos de reacción catalítica (Plascencia, 2010).

2.3.5 Proceso de biox no catalizado

Este es un nuevo proceso desarrollado en la Universidad de Toronto por el profesor David Boocock y que ha llamado la atención porque ha transformado el proceso de producción de biodiésel a través de la selección de cosolventes inertes como catalizador, que generan un aceite rico en sistemas de dos fases y con rendimiento superior al 99% en cuestión de segundos. En este proceso primero se efectúa la esterificación del total de los ácidos grasos libres (AGL) hasta una cantidad remanente de 10% y a continuación los triglicéridos por medio de la transesterificación que reaccionan al agregar el cosolvente, esto en un proceso continuo, a presión atmosférica y temperatura ambiente. El cosolvente es reciclado y reusado en el proceso (Komers y col., 2001).

2.3.6 Proceso supercrítico no catalizado

En los métodos convencionales de transesterificación de grasas animales y aceites vegetales (AV) para la producción de biodiésel, los ácidos grasos libres (AGL) y el agua producen efectos negativos ya que reaccionan formando jabón en la catálisis alcalina, mientras que en la catálisis ácida el agua consume y reduce la eficiencia del catalizador, resultando en una baja conversión. La reacción de transesterificación puede llevarse a cabo mediante cualquiera de los catalizadores ácidos o básicos, pero estos procesos requieren un tiempo relativamente largo y limitaciones en la separación del producto y catalizador, lo que se traduce en elevados costos de producción y consumo de energía (Kusdiana y Saka, 2001). Para superar estos problemas se ha propuesto que el biodiésel puede ser producido mediante transesterificación no catalítica con metanol supercrítico (MSC). Se ha desarrollado un nuevo proceso que

consiste en crear un metanol supercrítico para resolver los problemas relacionados con la naturaleza de las dos fases formadas en la transesterificación típica, haciendo la mezcla de aceite y MSC para formar una sola fase como resultado de la reducción del valor de la constante dieléctrica del MSC. Facilitando la purificación de los productos por estar contenidos en una sola fase y a su vez el tiempo de producción (Demirbas, 2002).

2.4 Propiedades del aceite usado en cocina

La composición química de los aceites vegetales corresponde en la mayoría de los casos a una mezcla de 95% de triglicéridos y 5% de ácidos grasos libres, de esteroides, ceras y otros componentes minoritarios. En la Tabla 2.2 se muestran las ventajas y desventajas del aceite vegetal.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas del aceite vegetal (Berbel, 2010)

Ventajas	Desventajas
Gran valor calorífico, es decir, gran densidad energética.	Tiene un mayor costo de producción frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
Forma líquida y, por ello, fácil de usar.	La materia prima ocupa mucho volumen y por lo tanto puede generar problemas de transporte y almacenamiento.
Cuando se quema emite menos hollín.	
Cuando se quema tiene una eficiencia energética mayor	
No es tóxico ni dañino para humanos, animales, suelos o agua.	
No es inflamable ni explosivo y no emite gases tóxicos.	
Es fácil de almacenar, transportar y utilizar.	
No causa daños si accidentalmente se vierte.	
En su manejo no se requiere tomar precauciones especiales.	
Es una forma reciclable de energía.	
No tiene efectos ecológicos adversos cuando es utilizado.	
No contiene sulfuro, por lo que no genera lluvia ácida cuando es usado.	
Cuando se quema es neutral en CO ₂ , ya que el CO ₂ ocupado por la planta para su crecimiento es aproximadamente el que emite, por lo que no contribuye al efecto invernadero.	

Los aceites vegetales pueden dividirse en cuatro grandes grupos:

- Los aceites saturados: índices de yodo de 5-50. La palma es la que los contiene
- Los aceites monoinsaturados: índices de yodo de 50-100. Las materias primas que los contienen son: aceituna, cacahuete, colza, sésamo, jatrofa curcas.
- Los aceites biinsaturados: índices de yodo de 100-50. Las materias primas que los contienen son: girasol, algodón, maíz, soja, etc.
- Los aceites triinsaturados: índices de yodo > 150

El índice de yodo es una escala utilizada para definir el grado de insaturación de un compuesto orgánico. Desde el punto de vista refiriéndose a calidad del carburante, mientras más saturado es el aceite, mejor es. Sin embargo, estos aceites saturados son sólidos a temperaturas elevadas (Berbel, 2010). En la Tabla 2.3 se muestran características físicas de algunos aceites comestibles y del diésel.

Tabla 2.3 Características físicas y químicas del diésel y aceites comestibles (Berbel, 2010)

Combustible	Densidad a 20° (g/cm ³)	Viscosidad a 20° (mm ² /s)	Punto de escurrimiento (°C)	Punto nube (°C)	Punto flash (°C)	Poder calorífico (MJ/kg)
Diésel	0.836	6	-18	-9	93	43.8
Coco	0.915	30	23/26	28	230	37.1
Palma	0.945	60	23/40	31	280	36.9
Algodón	0.921	73	-2	-1	243	36.8
Jatrofa	0.920	77	-3	2	236	38.8
Cacahuate	0.914	85	-1	9	258	39.3
Colza	0.920	78	-2	-11	285	37.4
Soya	0.920	61	-4	-4	330	37.3
Girasol	0.925	58	-6	-5	316	37.8

Los términos que se mencionan en la tabla 2.3 se definen a continuación:

- Punto de escurrimiento: temperatura mínima a la cual el aceite todavía fluye.
- Punto nube: El punto de turbidez o punto nube de un líquido es la temperatura a la cual los sólidos disueltos ya no son completamente solubles, lo que le da al líquido una apariencia turbia.
- Punto flash: Temperatura a la cual se empieza la combustión.

2.5 Características de la eficiencia en su combustión y emisión de un motor que utiliza biodiésel

Para medir la eficiencia y potencia de un motor con fuerza motriz rotatoria generalmente se utiliza un dinamómetro. Este dispositivo mide el par de un motor transformando el par rotatorio existente en el cigüeñal del motor, en un momento de fuerza estacionario. Estas pruebas fueron realizadas en el banco de pruebas de General Motors (CORPODIB, GM 2002). Se obtuvieron ciertos resultados, como se muestra en la Figura 2.4. La potencia de un motor es mayor al utilizar biodiésel.

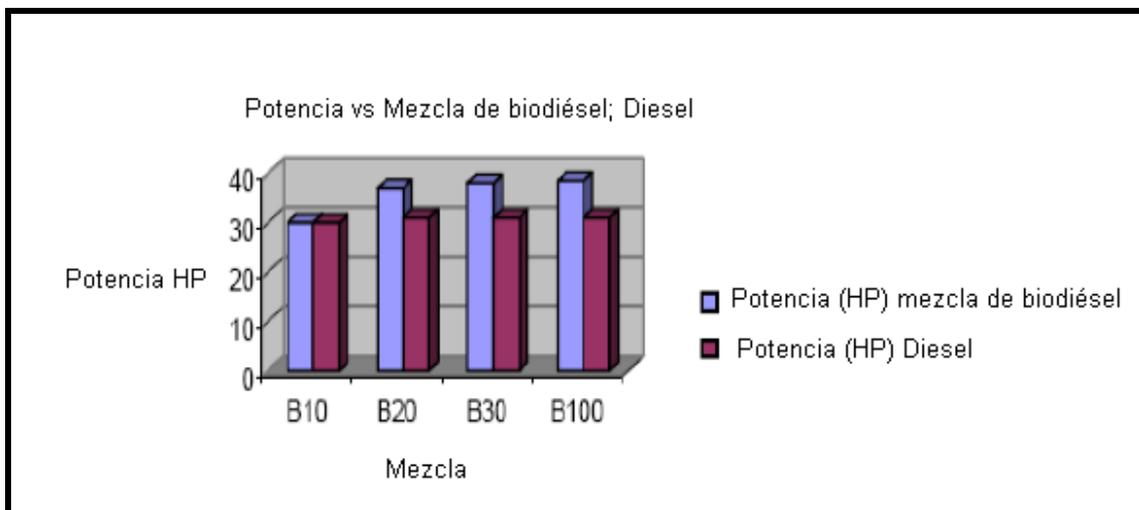


Figura 2.4 Potencia versus mezcla de biodiésel / diésel (CORPODIB, GM 2002)

En las pruebas de opacidad, es decir, que tan traslúcido son las emisiones de un motor utilizando diesel y biodiésel. Se arrojaron ciertos resultados mostrados en la Figura 2.5.

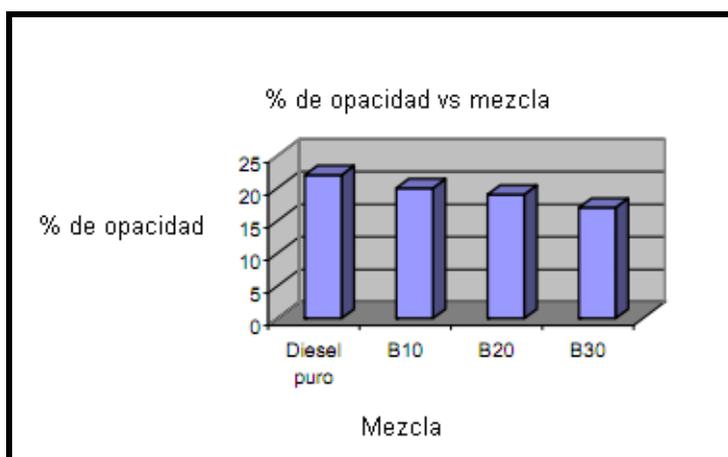


Figura 2.5 Porcentaje de opacidad versus el tipo de mezcla (CORPODIB, GM 2002)

Se puede observar que el porcentaje de opacidad de las emisiones de un motor se reduce con una mezcla B30. En términos generales, permitieron corroborar el efecto benéfico desde el punto de vista ambiental del biodiesel empleado en forma pura y en mezcla con el diesel. En cuanto al comportamiento dinámico del vehículo con el uso de biodiésel y diésel no se notó diferencia apreciable (CORPODIB, GM 2002).

2.6 Avances en el desarrollo y caracterización del biodiésel

Los motores diésel requieren un combustible que sea limpio al quemarlo, además de permanecer estable bajo las distintas condiciones en las que opera. El biodiésel es el único combustible alternativo que puede usarse directamente en cualquier motor diésel, sin ser necesario ningún tipo de modificación excepto las mangueras de suministro de combustible.

Como sus propiedades son similares al combustible diésel de petróleo, se pueden mezclar ambos en cualquier proporción, sin ningún problema. En Estados Unidos y en Europa, existen ya numerosas flotas de transporte público que utilizan biodiésel en sus distintas mezclas. Las bajas emisiones del biodiésel hacen de él un combustible ideal para el uso en las áreas marinas, parques nacionales, bosques y, sobre todo, en las grandes ciudades (CORPODIB, GM 2002). En la Tabla 2.4 y 2.5 se pueden observar las propiedades de los combustibles según las normas americana y europea.

Tabla 2.4 Propiedades físicas y químicas del biodiésel y diésel (Kessel, 2009)

PROPIEDAD	BIODIÉSEL	DIÉSEL
Norma del combustible (Americana)	ASTM PS121	ASTM D975
Metil éster (%)	> 96.5	0
Densidad a 15° C (g/cm ³)	0.86 – 0.90	0.82 – 0.845
Viscosidad a 40° C (mm ² /s)	1.9 – 6.0	1.3 – 4.1
Punto flash (°C)	100 -170	60 – 80
Punto de ebullición (°C)	182 - 338	188 - 343
Carbono (% peso)	77	87
Azufre (% peso)	0	0.5 máximo
Oxígeno (% peso)	11	0
Hidrógeno (% peso)	12	13
Glicerol libre (%)	0.02	0

Tabla 2.5 Propiedades físicas y químicas del biodiésel y diésel (CEN, 2012)

PROPIEDAD	BIODIÉSEL	DIÉSEL
Norma del combustible (Europea)	EN 14214	EN 590
Metil éster (%)	96.5	0
Densidad a 15° C (g/cm ³)	0.86 – 0.90	0.82 – 0.845
Viscosidad a 40° C (mm ² /s)	3.5 - 5	2.0 – 4.5
Punto flash (°C)	>101	>55
Azufre (mg/kg)	10 máx.	350 máx.
Agua (mg/kg)	500 máx.	200 máx.
Triglicéridos (% en masa)	0.02 max.	-----
Glicerol libre (%)	0.02	0

2.7 Diseño de equipos productores de biodiésel

2.7.1 Modelos termodinámicos

Un coeficiente de actividad es un factor que se usa en la termodinámica para explicar las desviaciones del comportamiento ideal en una mezcla de sustancias químicas.

NRTL (Non-Random Two Liquids): Es un modelo termodinámico el cual relaciona el coeficiente de actividad de un compuesto con sus fracciones molares en fase líquida.

Se aplica con frecuencia en el campo de la ingeniería química para el cálculo de equilibrio de fases. El concepto de NRTL se basa en la hipótesis de Wilson de que la concentración local de alrededor de una molécula es diferente de la concentración masiva. Existen otros modelos como el de Wilson y el UNIFAC.

UNIQUAC (Universal Quasi-Chemical): Modelo llamado modelo de red y se ha derivado de una aproximación de primer orden de las superficies de molécula que interactúan en la termodinámica estadística. Este es de coeficiente de actividad igualmente termodinámico utilizado en la descripción del equilibrio de fases ya sean líquido-sólido, líquido-líquido o líquido-vapor.

De los modelos (NRTL) y el (UNIQUAC) que son modelos de actividad termodinámica, fueron recomendados para la predicción de los coeficientes de la actividad de los componentes de una fase líquida para este proceso de transesterificación (Zhang y col., 2003).

Este proceso solo fue basado en el (NRTL) usando el software de simulación de procesos HYSYS Plant Net Vers. 2.1.3 desarrollado por Hyprotec Ltd.

2.7.2 Operaciones unitarias de una planta de biodiésel

En una planta de biodiésel se llevan a cabo diferentes procesos para producir éste biocombustible, a continuación se muestra una planta ideal y todas las operaciones unitarias que se deben de tomar en cuenta para obtener un producto de calidad, con un mínimo de desechos.

a) Transesterificación

En la Figura 2.6 está desarrollado un diagrama de flujo para el proceso de producción de biodiésel. La reacción fue llevada a cabo en una relación 6:1 molar de metanol/aceite, el 1% de hidróxido de sodio (basado en aceite) a 60 °C y una presión de 400kPa.

El metanol fresco (corriente 101 a 117 kg/h), el metanol reciclado (corriente 1201 a 111 kg/h) y el hidróxido de sodio (corriente 103 a 10 kg/h) son mezclados antes de que se bombeen por la bomba P-101 al reactor R-101. El aceite vegetal virgen (corriente 105) es calentado en el intercambiador E-101 antes de entrar al reactor R-101. En el reactor R-101 se asume que el 95% del aceite fue convertido en FAME (biodiésel) produciendo glicerina y subproductos. La (corriente 106) que sale del R-101 es introducida al separador T-201.

b) Recuperación del metanol

En el separador T-201 el metanol es separado de otros componentes. La (corriente 201) es metanol puro, conteniendo el 94% del metanol total de la (corriente 106). La destilación al vacío se utiliza para mantener temperaturas menores a las de 150°C. El metanol puro reciclado (corriente 1201) se mezcla con la (corriente 101B) que es una mezcla del metanol fresco con el hidróxido de sodio y es regresado al reactor R-101. La (corriente 202) es enviada a la columna T-301 después de haber sido enfriado en el intercambiador E-201 a 60 °C.

c) Lavado con agua

El objetivo de este paso es separar los FAME (biodiésel) de la glicerina, metanol y el catalizador. La separación se lleva a cabo en la columna de lavado con agua T-301, los FAME que están en la (corriente 203) son separados agregando 11 kg/h de agua a 25°C. Después del lavado en la columna T-301 la (corriente 301) entra a un separador por gravedad para quitar restos de glicerina de los FAME. Las cantidades de aceite no convertido, metanol y agua en la (corriente 301A) fueron menores al 6%. Toda la glicerina se mantuvo en el fondo de la (corriente 303) 128kg/h la cual contiene 81% de glicerina, 8% de agua, 3% de metanol y 9% de hidróxido de sodio.

d) Purificación de los FAME

Con el objetivo de obtener un producto final (biodiésel) con una pureza del 99.6%. La (corriente 301A) es enviada al purificador de FAME T-401 que opera al vacío para mantener las temperaturas bajas lo suficiente para impedir la degradación de los FAME. Un condensador parcial en la cabeza de la columna fue usado para la fácil separación de los FAME del agua y el metanol. El agua y el metanol se remueven en forma de gases (corriente 401A). Los FAME producto 99.65% puro son obtenidos (corriente 401) como un líquido destilado a 194°C y 10 kPa. El aceite no convertido se queda en el fondo del purificador T-401. Dado que una sola pequeña cantidad de aceite (corriente 402) no es convertida (52kg/h) se es tratada como residuo, sin embargo, con un enfriador y una bomba puede ser enviado nuevamente al reactor R-101.

e) Extracción del catalizador

La (corriente 303) fue enviada al reactor de neutralización R-201 para remover el hidróxido de sodio agregando ácido fosfórico (100% puro), el resultado fosfato de sodio que es removido en el separador de gravedad X-302 (corriente 306). Cuando es usado hidróxido de potasio como catalizador alcalino, el resultado es fosfato de potasio que puede ser utilizado como fertilizante.

f) Purificación de la glicerina

Después de retirar el hidróxido de sodio, la (corriente 305) contiene alrededor de un 83% de glicerina, entonces es enviada a la unidad T-501 para separar el agua y el metanol por destilación (corriente 501). Por lo tanto en la (corriente 502) queda glicerina casi pura.

g) Tratamiento de desechos

La composición de las (corrientes 401A y 501) aunque son flujos muy pequeños deben ser tratados como gases o residuos líquidos peligrosos, sin embargo, en un futuro pueden ser enviados de nuevo a la columna de lavado T-301 y así poder reducir los residuos de este proceso (Zhang y col., 2003). Este proceso ideal de producción de biodiésel genera aproximadamente 85% de biocombustible y un 15% de productos y subproductos que se generan en la reacción.

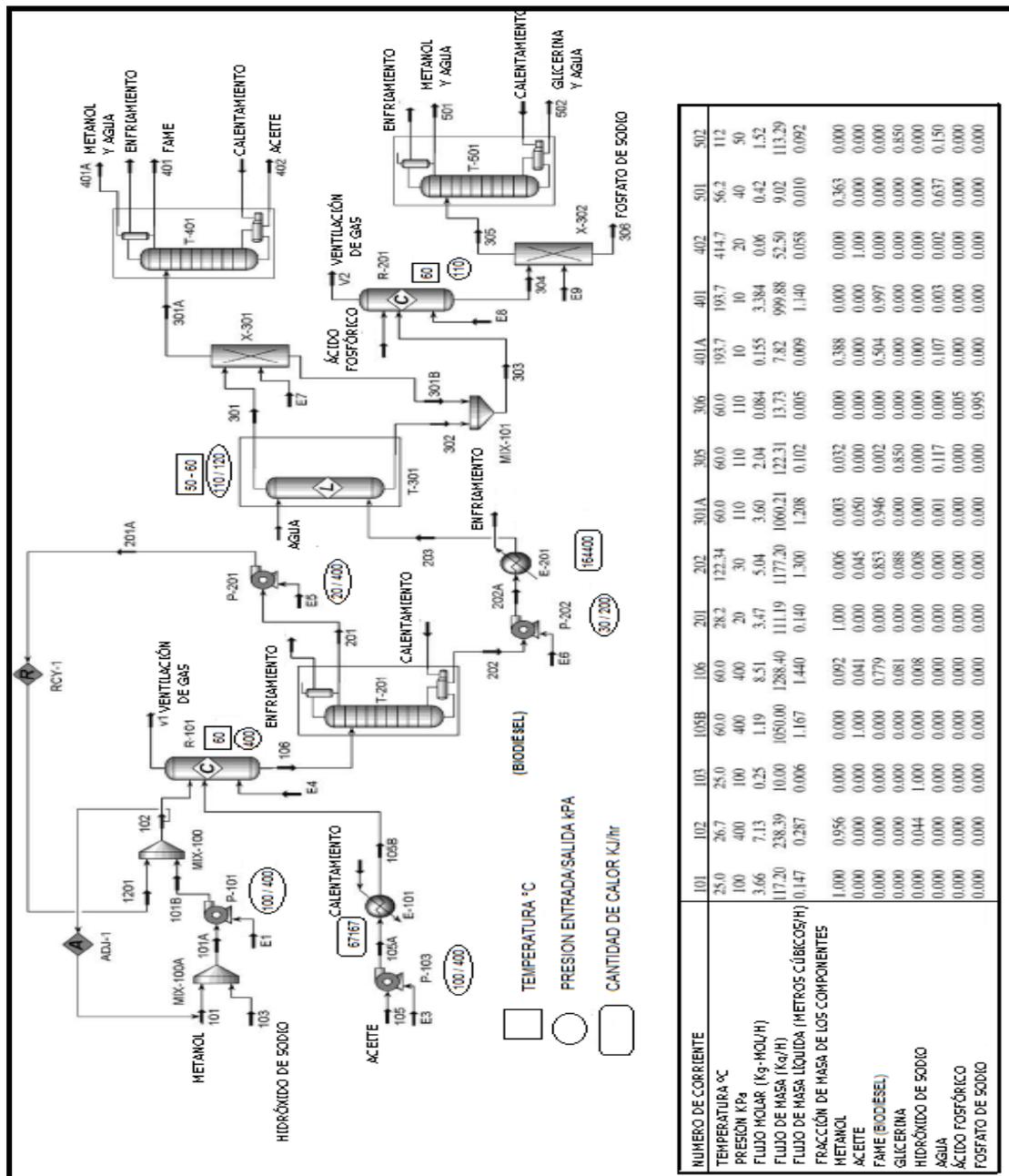


Figura 2.6 Diagrama de flujo de una planta para la producción de biodiésel (Zhang y col., 2003)

Existen diversos equipos para la producción de biodiésel a grande y pequeña escala (Figura 2.7 y 2.8).

2.7.3 Ejemplos de equipos demostrativos para la producción de biodiesel

Pequeñas empresas, agricultores, empresas de transporte y compañías de producción pueden ahorrar dinero antes de invertirlo en combustibles. Los quipos de biodiésel permiten fabricar a bajo costo un combustible de calidad EN 14214 (norma de calidad europea), utilizable en la mayoría de los automóviles, camiones y generadores que usan diésel, sin necesidad de modificaciones al motor.

a) Equipo de producción de biodiésel R500

Produce biodiésel para cualquier tipo de motor (automóvil, barco, caldera de diésel, etc). Utiliza aceites usados o cualquier tipo de aceite vegetal como materia prima, y reduce el precio del litro de combustible cerca de un 50% (BA, 2011) (Figura 2.7).



Figura 2.7 Equipo de producción de biodiésel (BA, 2011)

Las características de este equipo son:

- Producción de 40 litros por lote
- Reacción activa a 49°
- Decantación pasiva de glicerina
- Drenaje manual
- Purificación y lavado nebulizado
- Secado a temperatura ambiente o forzado
- Tiempo de precalentamiento: 1-2 horas
- Tiempo de reacción: 2-3 horas de mezcla activa
- Tiempo de decantación: 24 horas
- Tiempo de proceso para obtener biodiesel: 2-5 días
- Producción: 2,920 litros/año basado en ciclos de 5 días.
- Tanque PEAD de 50 litros con estructura de acero inoxidable
- Tanque PEAD de 14 litros para metóxido con inyector manual
- Calefactor de baja densidad 1 x 1,2 KW con termostato
- Bomba de combustible 370 W/40 litros/minuto
- Panel de control eléctrico IP56

b) Equipo de producción de biodiésel C300

Esta planta es capaz de producir 40 litros por día, o más, con estructuras adicionales, como tanques y equipos específicos (Figura 2.8). Este equipo esta hecho en Holanda



Figura 2.8 Equipo de producción de biodiésel (BA, 2011)

2.8 Normas de seguridad de una planta de biodiésel

En una planta que genera biodiésel se manejan distintos elementos químicos por lo que hay que tener siempre en cuenta ciertas normas de seguridad para prevenir accidentes a cualquier persona que se encuentre laborando en dicha planta.

a) *Metanol*

Es un líquido incoloro, venenoso, con olor a etanol y cuando está puro puede tener un olor repulsivo. Arde con flama no luminosa. Es utilizado industrialmente como disolvente y como materia prima en la obtención de formaldehido, metil-ter-butyl éter, ésteres metílicos de ácidos orgánicos e inorgánicos. También es utilizado como anticongelante en radiadores automovilísticos; en gasolinas y diesel; en la extracción de aceites de animales y vegetales y agua de combustibles de automóviles y aviones; en la desnaturalización de etanol; como agente suavizante de plásticos de piroxilina y otros polímeros y como disolvente en la síntesis de fármacos, pinturas y plásticos. Este producto reacciona violentamente con bromo, hipoclorito de sodio, dietil-zinc, disoluciones de compuestos de alquil-aluminio, trióxido de fósforo, cloruro cianúrico, ácido nítrico, peróxido de hidrógeno, sodio, ter-butóxido de potasio y perclorato de plomo. En general, es incompatible con ácidos, cloruros de ácido, anhídridos, agentes oxidantes, agentes reductores y metales alcalinos.

Las protecciones para el manejo del metanol son:

- 1) **Protección de la piel:** Se recomiendan los guantes de butilo y caucho nitrilo. Use pantalones resistentes a los productos químicos, y chaquetas preferentemente de butilo o caucho nitrilo.
- 2) **Protección de ojos y cara:** Máscara facial y gafas protectoras de salpicaduras químicas cuando la transferencia se está llevando a cabo. Los lentes de contacto no deben ser usados cuando se trabaja con metanol.
- 3) **Calzado:** Resistente a productos químicos.

En caso de derrame de metanol:

- Absorba el derrame con material absorbente no combustible. Recupere el metanol y diluya con agua para reducir el peligro de incendio. Asegúrese que el metanol derramado no entre en los desagües, espacios confinados, o cursos de agua. Restrinja el acceso a personal sin protección. Contenga el material en un recipiente adecuado, cubierto, en contenedores etiquetados. Enjuague con agua.
- Si es necesario, contenga el derrame. Puede aplicarse espumas de fluorocarbono, resistente al alcohol, para disminuir vapores y peligro de incendio. Maximizar la recuperación de metanol para su reciclado o reutilización. Recoja el líquido con bombas a prueba de explosiones.

La manipulación y almacenamiento del metanol debe ser:

- 1) Precauciones para la manipulación:** No fumar o prender fuego en el almacenamiento, zonas de uso o manipulación. El uso de material eléctrico debe ser a prueba de explosiones.
- 2) Almacenamiento:** Almacenar en equipo totalmente cerrado, diseñado para evitar la ignición y el contacto humano. Los depósitos deberán contar con electricidad con descarga a tierra, ventilación, y controles de emisión de vapores. El metanol debe almacenarse en recipientes de acero al carbón, rodeado de un dique y con sistema de extinguidores de fuego a base de polvo químico seco o dióxido de carbono, cuando se trata de cantidades grandes. Los plásticos pueden ser utilizados para el almacenamiento a corto plazo, generalmente no son recomendadas para el almacenamiento a largo plazo, debido al deterioro, los efectos y el posterior riesgo de contaminación. En el caso de cantidades pequeñas, puede manejarse en recipientes de vidrio. En todos los casos debe mantenerse alejado de fuentes de ignición y protegido de la luz directa del sol.

Las medidas de primeros auxilios en caso de contacto con el metanol son:

- 1) Lentes de contacto (ojos):** Retire los lentes de contacto dañados. En caso de contacto, inmediatamente lave los ojos con abundante agua corriente limpia, durante al menos 15 minutos, levantando la parte superior e inferior de los párpados de vez en cuando. Obtenga atención médica.
- 2) Contacto con la piel:** En caso de contacto, quítese la ropa contaminada. En una ducha, lave las zonas afectadas con agua y jabón durante al menos 15 minutos. Busque atención médica si la irritación persiste o se produce. Lave la ropa antes de volver a usarla. El contacto prolongado con metanol puede dañar los tejidos de la piel, produciendo sequedad y agrietamiento.
- 3) Inhalación:** Retírese a un lugar con aire fresco, restablezca la respiración con asistencia si es necesario. Obtenga atención médica.
- 4) Ingestión:** Ingerir metanol es potencialmente peligroso para la vida. La aparición de los síntomas puede ser observada de 18 a 24 horas después de la digestión. Si está consciente y la asistencia médica no está inmediatamente disponible, no induzca el vómito. En caso fehaciente o bajo la sospecha de ingestión, acuda de inmediato a un centro médico (Methanex, 2008).

b) Hidróxido de sodio

A temperatura ambiente el hidróxido de sodio es un sólido cristalino, blanco, sin olor y que absorbe rápidamente dióxido de carbono y humedad del aire. Es una sustancia muy corrosiva. Cuando se disuelve en agua o cuando se neutraliza con algún ácido libera gran cantidad de calor, el cual puede ser suficiente para hacer que material combustible en contacto con el hidróxido haga ignición. Es una sustancia exclusivamente producida por el hombre y por tal razón no se encuentra en la naturaleza en su estado normal.

Las protecciones para el manejo del hidróxido de sodio son:

- 1) Protección de la piel:** Se recomienda careta, overol de PVC, botas y guantes de caucho.
- 2) Protección de ojos y cara:** Lentes de seguridad con protector lateral.

En caso de derrame de hidróxido de sodio:

- Evacuar o aislar el área de peligro.
- Restringir el acceso a personas innecesarias y sin debida protección.
- Ubicarse a favor del viento.
- Usar equipo de protección personal.
- Ventilar el área.
- No permitir que caiga en fuentes de agua o alcantarillas.
- Los residuos deben recogerse con medios mecánicos no metálicos y colocados en contenedores para su posterior disposición.

La manipulación y almacenamiento del hidróxido de sodio debe ser:

- 1) Precauciones para la manipulación:** Utilizar los elementos de protección personal así sea muy corta la exposición o la actividad que realizar con la sustancia; mantener estrictas normas de higiene. No fumar ni beber en el sitio de trabajo. Conocer donde esta el equipo para la atención de emergencia.
- 2) Almacenamiento:** Almacenar en lugares ventilados, frescos y secos, lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles, en recipientes no metálicos preferentemente a nivel de piso. Rotular los recipientes adecuadamente.

Las medidas de primeros auxilios en caso de contacto con el hidróxido de sodio son:

- 1) Ojos:** Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Colocar una venda esterilizada y buscar atención médica.
- 2) Contacto con la piel:** Retirar la ropa y calzado contaminados, lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado y buscar atención medica.
- 3) Inhalación:** Trasladar a la persona a una zona donde haya abundante aire fresco, si no puede respirar administrar respiración artificial. Si respira con dificultad, suministrar oxígeno y mantener a la víctima abrigada y en reposo.
- 4) Ingestión:** Lavar la boca con agua. Si esta consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vomito y buscar atención medica inmediatamente (CISPROQUIM, 2005).

c) Aceite vegetal

Los aceites vegetales son compuestos que están formados por la unión de tres ácidos grasos a una molécula de glicerol, esta estructura es la denominada Triglicéridos. El aceite vegetal es un compuesto orgánico obtenido a partir de semillas u otras partes de las plantas en cuyos tejidos se acumula como fuente de energía, son usualmente líquidas a temperatura ambiente.

Las protecciones para el manejo del aceite vegetal son:

- 1) **Protección de la piel:** Guantes de asbesto cuando esta caliente.
- 2) **Protección de ojos y cara:** Usar careta cuando esta caliente.

En caso de derrame del aceite vegetal:

- No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.
- Recoger con un producto absorbente (por ejemplo arena, aserrín) o una bomba.

La manipulación y almacenamiento del aceite vegetal:

- 1) **Precauciones para la manipulación:** Cuando esta caliente usar guantes de asbesto para manipularlo y en recipientes que no conduzcan calor, se recomienda careta.
- 2) **Almacenamiento:** En lugares secos para no degradar la calidad del producto.

Las medidas de primeros auxilios en caso de contacto con el aceite vegetal son:

- 1) **Ojos:** Lavar con agua y llamar al médico si existe irritación prolongada.
- 2) **Contacto con la piel (temperaturas mayores a 38°):** Lavar con abundante agua y jabón. No usar remedios caseros. Acudir al médico inmediatamente.
- 3) **Inhalación:** Si es inhalado y la exposición ha sido excesiva (temperaturas mayores a 38°), trasladar al paciente al aire libre. En condiciones normales, no es necesario. Si la respiración se detiene, procurarla de manera artificial. Llamar al médico
- 4) **Ingestión:** La decisión si se deben provocar vómitos debe tomarla el médico (RIOS, 2006).

d) Biodiésel

Esteres metílicos de ácidos grasos, este producto no contiene componentes peligrosos.

Las protecciones para el manejo del biodiésel son:

- 1) **Protección respiratoria:** No aplicable.
- 2) **Protección de ojos y cara:** Lentes de seguridad.
- 3) **Protección de la piel:** Guantes de seguridad.
- 4) **Protecciones personales:** Lavar la ropa impregnada. Lavarse las manos con agua y jabón tras su manipulación.

En caso de derrame del biodiésel:

- Transferir el material derramado a contenedores de seguridad. Donde sea necesario, recoger utilizando medios absorbentes (arena, aserrín).

La manipulación y almacenamiento del biodiésel:

- 1) **Precauciones para la manipulación:** Usar los guantes y los lentes de seguridad.
- 2) **Almacenamiento:** Almacenar el producto en contenedores cerrados en un área fresca, seca, aislada y bien ventilada, lejos de fuentes de ignición. Este producto puede soportar elevadas temperaturas y/o presiones.

Las medidas de primeros auxilios en caso de contacto con el biodiésel son:

- 1) **Ojos:** Lavar los ojos con agua abundante durante 15 minutos. No dejar que la persona se frote los ojos. Si la víctima lleva lentes de contacto, quitarlos. Si la irritación persiste buscar atención médica.
- 2) **Contacto con la piel:** No es clasificado como irritante o corrosivo. Simplemente lavar las manos con agua y jabón.
- 3) **Inhalación:** Llevar a la persona fuera de la zona contaminada y a un lugar fresco.
- 4) **Ingestión:** Lavar la boca con agua. No provocar el vómito, puede ocasionar irritación gastrointestinal. Buscar atención médica (BASF, 2006).

e) Glicerol

Líquido aceitoso, no contiene componentes peligrosos. Puede reaccionar violentamente con oxidantes fuertes, con anhídrido de acetio, oxocloruro de calcio, óxidos de cromo y metales alcalinos. En caso de incendio puede emitir gases tóxicos, al descomponerse el glicerol forma un gas corrosivo.

Las protecciones para el manejo de la glicerina son:

- 1) **Protección de ojos y cara:** Lentes de seguridad.
- 2) **Protección de la piel:** Guantes de seguridad contra productos químicos.
- 3) **Protecciones personales:** Lavar la ropa impregnada. Lavarse las manos con agua y jabón tras su manipulación.

En caso de derrame de glicerina:

- Eliminar todas las fuentes de ignición, no tocar el material derramado o los contenedores dañados a menos que este utilizando el equipo de seguridad adecuado, detenga la fuga en caso de poder hacerlo. Evitar que el producto entre al sistema de alcantarillado.

La manipulación y almacenamiento de la glicerina:

- 1) **Precauciones para la manipulación:** Usar los guantes y los lentes de seguridad.
- 2) **Almacenamiento:** Almacenar el producto en contenedores cerrados en un área fresca, seca, aislada y bien ventilada, lejos de fuentes de ignición y materiales incompatibles.

Las medidas de primeros auxilios en caso de contacto con la glicerina son:

- 1) **Ojos:** Lavar inmediatamente con agua durante 15 minutos, abrir y cerrar los párpados ocasionalmente para asegurar un buen lavado.
- 2) **Contacto con la piel:** Lavar la piel durante 15 minutos, remover la ropa y el calzado contaminado.
- 3) **Inhalación:** Llevar a la víctima a un lugar donde pueda respirar aire fresco y dar atención médica en caso que la respiración se dificulte.
- 4) **Ingestión:** Inducir el vomito inmediatamente, esto debe ser hecho por el personal capacitado, nunca de nada a la boca a una persona inconsciente, dar atención médica inmediatamente (QT, 2009).

METODOLOGÍA

3.1 Planta de biodiésel

Descripción:

El proceso mediante el cual se transforma un producto de desecho, como el aceite vegetal usado (AVU), en un biocombustible comprende la transesterificación del aceite o grasa con alcoholes ligeros; utilizándose un catalizador adecuado, para generar ésteres de ácidos grasos (biodiésel). La Figura 3.1 muestra las etapas del proceso para la producción de biodiésel (BM, 2010).

Equipamiento:

- Reactor y Tolva en acero inoxidable. Capacidad: 600 litros ó 1,000 litros.
- Bomba para filtrado de aceite vegetal usado, bomba reactor. Corriente: 120/220 V.
- Unidad de filtrado de biodiesel con bomba.
- Resistencia eléctrica para calentamiento de aceite (220 V, 6,000 watts).
- Tuberías y líneas de entrada/salida de productos en acero al carbón. Válvulas en acero. Uso de materiales transparentes para efectos didácticos.
- Un tanque de acero inoxidable para almacenamiento de aceite vegetal usado listo para reacción. Capacidad 1,000 litros.

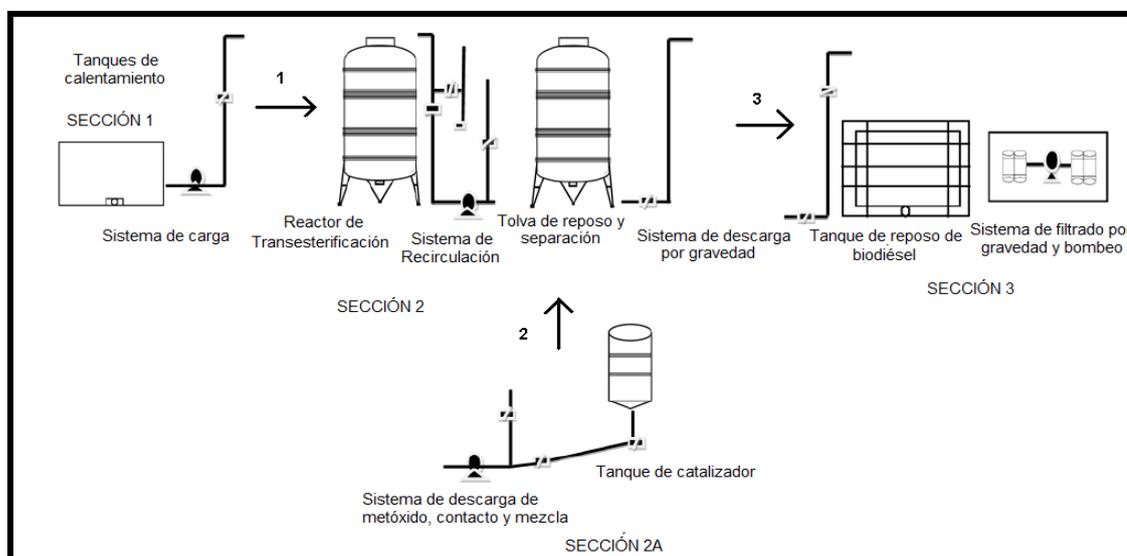


Figura 3.1 Etapas del proceso para la producción de biodiesel (BM, 2010)

Como subproducto se obtiene glicerol, éste producto se tiene que tratar con precaución ya que es bastante cáustico y puede provocar quemaduras. Tiene un pH mayor de 11 debido a que contiene casi todo el NaOH del proceso. Lamentablemente destilar y purificar ese subproducto para obtener glicerina pura no está al alcance de tecnología doméstica y ni siquiera lo está para una empresa mediana. Hacen falta equipamientos muy especiales para destilar la glicerina, con alto punto de ebullición y con el inconveniente de que cuando se alcanza dicho punto de ebullición se descompone el glicerol con liberación de acroleína, una sustancia altamente tóxica. Para bajar el punto de ebullición y evitar el inconveniente anterior se usan destiladores al alto vacío.

3.1.1 Manejo de la materia prima

a) Protecciones

Protección de la piel:

- 1) Se recomiendan los guantes de butilo ya que resisten materiales utilizados en la planta de biodiésel.
- 2) Use pantalones resistentes a los productos químicos, y chaquetas preferentemente de butilo

Protección de ojos y cara:

- 1) Máscara facial
- 2) Gafas protectoras de salpicaduras químicas cuando alguna transferencia de material se está llevando a cabo.

Calzado:

- 1) Botas resistentes a productos químicos con suela antiderrapante

b) Almacenamiento

Todos los materiales deben de ser almacenados en áreas ventiladas, frescas, secas amplias y por separado lejos de materiales incompatibles, sin contacto alguno con la luz solar; en contenedores de plástico o acero según el material. Extintor a la mano. La Tabla 3.1 muestra como deber ser el almacenamiento de la materia prima.

Tabla 3.1 Tipo de almacenamiento de la materia prima

Materia Prima	Almacenamiento
Metanol (inflamable)	Recipientes de acero al carbón.
Aceite Usado	Plástico (Polietileno de baja densidad)
Hidróxido de sodio (corrosivo)	Plástico (Polietileno de alta densidad)
Glicerol (corrosivo al descomponerse)	Plástico (Polietileno de alta densidad)

c) Transporte

- Según el material, se debe de transportar en diferentes contenedores etiquetados ya sea corrosivo, inflamable y si desprende gases inflamables.
- No transportar con materiales incompatibles y siempre cargando un extintor en el medio de transporte.

3.1.2 Manejo del biodiésel producido

El biodiésel es un líquido muy fácil de manejar y nada peligroso, sus propiedades químicas no tienen alguna reacción con los componentes con los cuales se fabrica. Es muy sencillo fabricarlo en casa o en la escuela en escalas muy pequeñas para pruebas de laboratorio en un motor diésel o un análisis químico, teniendo cuidado al usar el metanol y la sosa cáustica. La única precaución al tener el biodiesel almacenado, es alejarlo de las altas temperaturas.

Protecciones

Usar gafas protectoras y ropa cómoda para manipulación con calzado de suela antiderrapante. No es clasificado como irritante.

Almacenamiento

Ya que no es corrosivo puede almacenarse en contenedores de plástico completamente cerrados para evitar impurezas, en lugares secos y ventilados, este tiene una temperatura de ignición de 150°C, debe de estar alejado de fuentes de calor.

Transporte

Su transportación debe ser igualmente en contenedores de plástico cerrados. Con extintor a la mano.

3.2 Servicios complementarios

Debe contar con áreas de aprendizaje, como talleres, laboratorios y áreas de pruebas.

- Área de ubicación e instalación entre 120 a 200m² mínimo.
- Altura mínima de 2.20m
- Construcción con materiales de concreto, block, tabicón etc. Evitar instalaciones fabricadas con materiales inflamables como unicel, plásticos, cartón, etc.
- Contar con áreas o zonas de ventilación ventanas, extractores, extractores de aire o de humo, aire acondicionado, en área de reactor, laboratorio y zona de almacenaje de reactivos y materia prima.
- Contar con zona de seguridad; regadera, lava ojos y botiquín de primeros auxilios.
- Contar con una zona de lockers, percheros y baños para los trabajadores.
- Instalaciones eléctricas con voltajes de 120 V y 220 V.

RESULTADOS

4.1 Planeación de la planta de biodiesel

4.1.1 Materia prima en Ciudad Universitaria

Se realizó un estudio estadístico dentro de CU para determinar la cantidad de aceite de desecho generado en los diferentes establecimientos alimenticios (cafeterías y barras) durante el periodo escolar y vacacional semestre II-2009. Para tal efecto se cuantificó la cantidad de aceites comestibles de desecho (ACD) mediante un muestreo probabilístico al 95% de confianza para las cafeterías y barras estadísticamente más representativas y autorizadas por la Dirección General de Servicios Generales, área de servicios a cargo de Rubén C. Medrano. Las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 muestran los resultados promedio y clasificados de la marca comercial del aceite, la cantidad de aceite usado y de ACD generado (Plascencia, 2010).

Tabla 4.1 Aceites en cafeterías y barras durante el periodo escolar (32 semanas)

Establecimiento	Marca de aceite	Cantidad de aceite usado (L/sem)	Cantidad de ACD (L/sem)
Facultad de Medicina	Cristal, Member	16	11
Facultad de Química	Cristal	126	24
Facultad de Arquitectura	1-2-3	87	62
Facultad de Filosofía y Letras	Maravilla	76	16
Facultad de Odontología	Bidón	22	11
Coordinación de Difusión Cultural	Capullo	36	16
Facultad de Economía	Maravilla	48	22
Facultad de Ingeniería	1-2-3	56	31
Torre de Ingeniería	Capullo	14	7
Facultad de Diseño	Maravilla	46	21
Barras del circuito escolar	Aceites varios	25	17
Barras del circuito exterior	Aceites varios	33	26
Barras del circuito de investigación y cultural	Aceites varios	19	13
Total	Aceites varios	522	277

Tabla 4.2 Aceites en cafeterías y barras durante el periodo vacacional (16 semanas) (Plascencia, 2010)

Establecimiento	Marca de aceite	Cantidad de aceite usado (L/sem)	Cantidad de ACD (L/sem)
Facultad de Medicina	Cristal, Member	10	7
Facultad de Química	Cristal	58	16
Facultad de Arquitectura	1-2-3	59	24
Facultad de Filosofía y Letras	Maravilla	39	17
Facultad de Odontología	Bidón	12	6
Coordinación de Difusión Cultural	Capullo	0	0
Facultad de Economía	Maravilla	0	0
Facultad de Ingeniería	1-2-3	0	0
Torre de Ingeniería	Capullo	10	4
Facultad de Diseño	Maravilla	28	14
Barras del circuito escolar	Aceites varios	17	13
Barras del circuito exterior	Aceites varios	20	5
Barras del circuito de investigación y cultural	Aceites varios	0	0
Total	Aceites varios	253	116

Tabla 4.3 Total de aceites en cafeterías y barras durante el periodo II-2009 (Plascencia, 2010)

Establecimiento	Marca de aceite	Cantidad de aceite usado (L/año)	Cantidad de ACD (L/año)	Porcentaje de desecho
Facultad de Medicina	Cristal, Member	672	464	70
Facultad de Química	Cristal	4,960	1,024	20.6
Facultad de Arquitectura	1-2-3	3,728	2,368	63.5
Facultad de Filosofía y Letras	Maravilla	3,056	784	25.6
Facultad de Odontología	Bidón	896	448	50
Coordinación de Difusión Cultural	Capullo	1,152	512	44.4
Facultad de Economía	Maravilla	1,536	704	45.8
Facultad de Ingeniería	1-2-3	1,792	992	55.4
Torre de Ingeniería	Capullo	608	288	47.4
Facultad de Diseño	Maravilla	1,920	896	46.7
Barras del circuito escolar	Aceites varios	1,072	752	70.1
Barras del circuito exterior	Aceites varios	1,376	1,072	77.9
Barras del circuito de investigación y cultural	Aceites varios	608	416	68.4

De los datos anteriores se puede concluir que anualmente las cafeterías son quienes usan mas aceite a diferencia de las barras, 87% y 13% respectivamente. De la misma forma ocurre para los ACD, donde las cafeterías aportan un 79% y 21% de las barras. La Tabla 4.4 indica el total de aceite usado y generado por los establecimientos alimenticios universitarios.

Tabla 4.4 Total anual de aceites (Plascencia, 2010)

Aceite usado L/año	ACD L/año	Porcentaje de desecho
23,376	10,720	45.9

Se debe considerar que la cantidad del aceite de desecho que resulta en la mayoría de las barras como establecimiento individual es baja (poco mayor a 2 L/semana), resultando poco práctico hacer su recolección, además de que en algunos establecimientos no se cuenta con total elaboración por parte de los trabajadores para llevarlo a cabo. Por tal motivo los datos estadísticos finales se emplearon con un estimado de disponibilidad del total del 95%, obteniendo la cantidad real de materia prima disponible proveniente de las cafeterías y barras alimenticias que se muestran en la Tabla 4.5 (Plascencia, 2010).

Tabla 4.5 Materia prima disponible (Plascencia, 2010)

ACD L/año	Aceite de desecho kg/año
10,720	9,726.3

4.1.2 Lugar de instalación

El lugar debe ser un área amplia y segura, alejada de animales domésticos, de personas ajenas a la planta y preferentemente en planta baja. La Figura 4.1 muestra un prototipo de planta piloto.

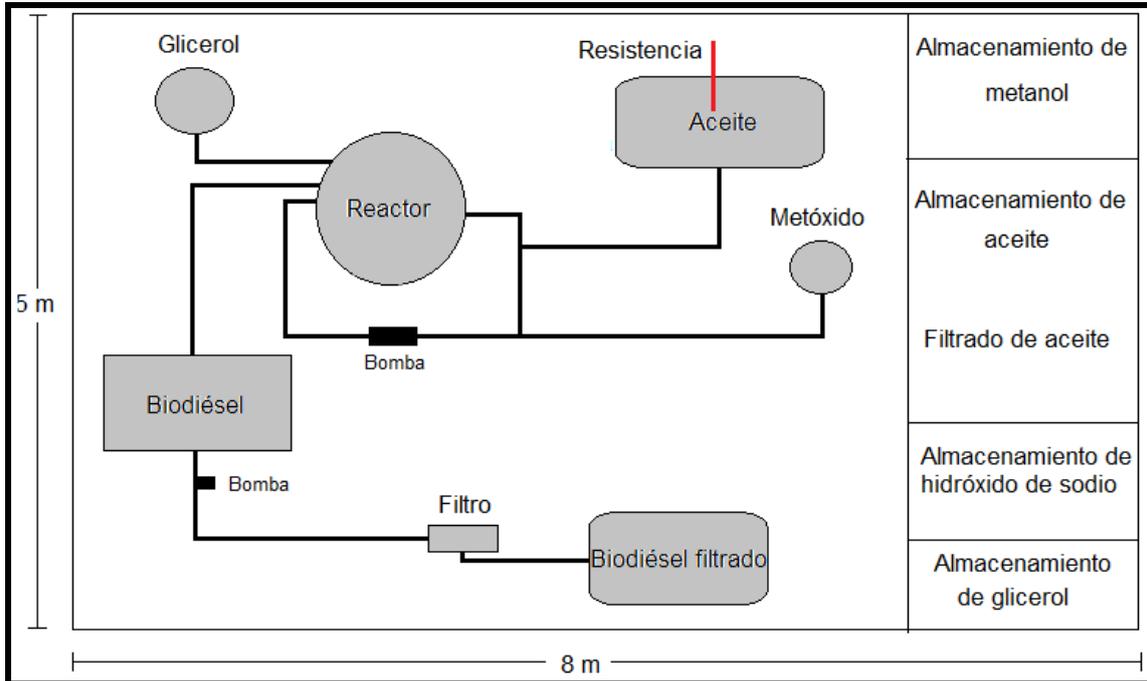


Figura 4.1 Prototipo de planta piloto

El hidróxido de sodio no se debe de almacenar cerca del metanol ya que la mezclarse, (en caso de un accidente) se produce una reacción exotérmica, debe mezclarse con todas las precauciones ya mencionadas. En caso del glicerol no debe de dejarse mucho tiempo, en caso de no ser purificado, ya que al descomponerse genera gases corrosivos, peligrosos para el ser humano.

Esta planta debe de tener ciertas áreas con equipo especializado para prácticas, experimentos y un área en caso de accidentes. La Tabla 4.6 muestra las zonas especializadas.

Tabla 4.6 Áreas de importancia en planta piloto.

Áreas	Características
Laboratorio	Este debe de tener tarjas, tomas de agua, de aire y de gas. Extintores y una zona para los elementos que se utilicen para experimentos. Zona ventilada. Lockers
Zona de seguridad	Esta debe tener regadera, lava ojos, botiquín de primeros auxilios, extintores y una salida de emergencia. Baños.

4.1.3 Materiales y equipos

El material y equipo que se utiliza para la planta piloto debe ser especial, ya que se manejan diferentes reactivos y elementos corrosivos para ciertos materiales, en la Tabla 4.7 se muestran características a grandes rasgos de todos los componentes para dicha planta. La Figura 4.2 muestra las piezas hidráulicas de la planta de biodiésel.

Tabla 4.7 Características de los materiales de construcción de las principales unidades para la planta de biodiésel (ML, 2009)

	Material	Capacidad	Costo	Tiempo de vida
Tolva/Reactor	Acero inoxidable	200 litros	\$10,000	20 años
Recipiente de almacenamiento de metanol	Lámina	200 litros	\$500	2 a 5 años
Recipiente de almacenamiento de aceite	Plástico (Polietileno alta densidad)	200 litros	\$300	2 a 5 años
Recipientes de almacenamiento de metóxido	Plástico (Polietileno alta densidad)	200 litros	\$300	2 a 5 años
Recipientes de traspotación	Plástico (Polietileno alta densidad)	1,000 litros	\$1,500	5 a 8 años
Tubería y llaves de paso	Acero al carbón	-----	\$5,000	5 años
3 codos de 90°, 7 codos de 45°, un tubo T y un tubo Y	Acero al carbón	-----	\$5,600	5 años
Filtro para purificar el biodiésel	Acero, resinas, material celulósico y carbón activado	65 litros	\$20,000	20 años
Resistencia eléctrica	Aleación de cromo y níquel, inoxidable, para calentar aceite	5,500 w	\$2,800	8 a 10 años
2 Bombas	Diferentes tipos de acero	3/4hp	\$4,500	8 a 10 años
Total			\$50,500	

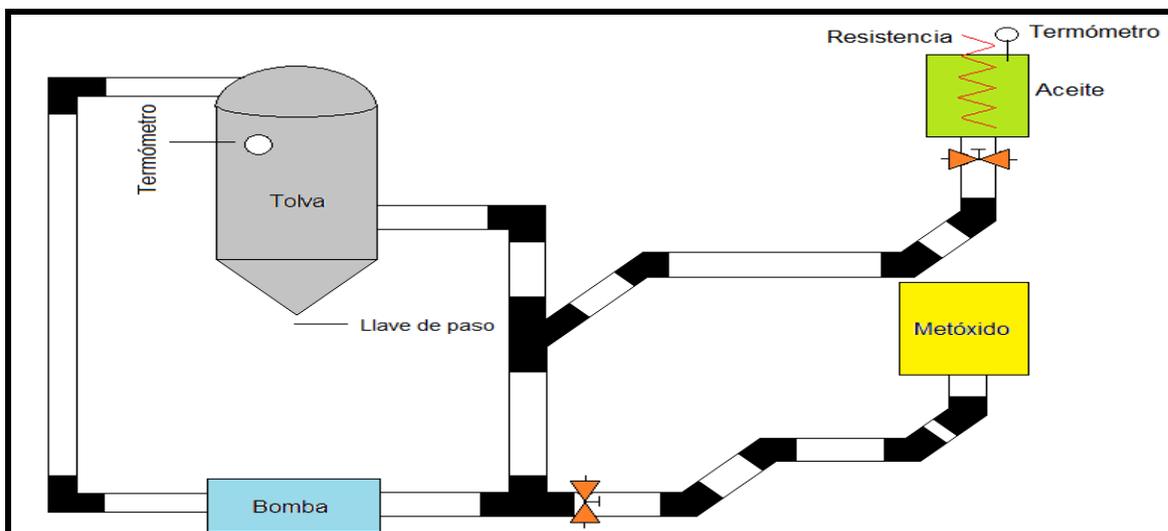


Figura 4.2 Piezas hidráulicas de la planta de biodiésel

4.1.4 Instalaciones hidráulicas

Para el diseño de esta instalación se necesita utilizar acero para soportar altas temperaturas principalmente. Existen diferentes tipos de aceros que sirven para diferentes usos en la industria y en la ingeniería. En la Tabla 4.8 se muestran las características de los tipos de aceros según la norma UNE-36010.

Tabla 4.8 Características del acero (Ingemecánica, 2009)

Tipo de acero	Descripción
<ul style="list-style-type: none"> - Acero al carbón - Acero aleado de gran resistencia - Acero aleado de gran elasticidad - Acero para cementación - Acero para nitruración 	<p>Son aceros al carbono y por tanto no aleados. Cuanto más carbono tienen sus respectivos grupos son más duros y menos soldables, pero también son más resistentes a los choques. Son aceros aptos para tratamientos térmicos que aumentan su resistencia, tenacidad y dureza. Son los aceros que cubren las necesidades generales de la Ingeniería de construcción, tanto industrial como civil y de comunicaciones.</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Acero para soldadura - Acero magnético - Acero de dilatación térmica - Acero resistente a la fluencia 	<p>Son aceros a los que se incorporan elementos aleantes que mejoran las propiedades necesarias que se exigen a las piezas que se vayan a fabricar con ellos como, por ejemplo, tornillería, tubos, núcleos de transformadores y motores, piezas de unión de materiales férricos con no férricos sometidos a temperatura. Piezas para instalaciones químicas y refinerías sometidas a altas temperaturas.</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Acero inoxidable - Acero resistente al calor 	<p>Estos aceros están basados en la adición de cantidades considerables de cromo y níquel a los que se suman otros elementos para conseguir otras propiedades más específicas. Son resistentes a ambientes húmedos, a agentes químicos y a altas temperaturas. Sus aplicaciones más importantes son para la fabricación de depósitos de agua, cámaras frigoríficas industriales, material clínico, material doméstico como cuberterías, cuchillería, etc.</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Acero al carbono para herramientas - Acero aleado para herramientas - Aceros rápidos 	<p>Son aceros aleados con tratamientos térmicos que les dan características muy particulares de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste y a la deformación por calor. Se utilizan para construir maquinaria de trabajos ligeros en general, desde la carpintería hasta la agrícola. También se utilizan para construir máquinas y herramientas más pesadas además para construir herramientas de corte.</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Acero para moldeo - Acero de baja radiación - Acero para moldeo inoxidable 	<p>Son aceros adecuados para moldear piezas mediante vertido en moldes de arena, por lo que requieren cierto contenido mínimo de carbono con el objetivo de conseguir estabilidad. Se utilizan también para el moldeo de piezas geométricas complicadas, con características muy variadas, que posteriormente son acabadas en procesos de mecanizado.</p>

Se necesita una tubería hecha de acero al carbón, ya que este resiste temperaturas altas e irá forrada de armaflex (Figura 4.3), para que no haya pérdidas grandes de temperatura. El armaflex es un aislamiento térmico flexible de estructura celular cerrada y con un elevado factor de resistencia a la difusión del vapor. La bomba de ¾ hp recirculará el aceite y posteriormente la mezcla de aceite con metóxido. En la Tabla 4.9 se muestran las características principales de la bomba de ¾ hp. La Figura 4.4 y 4.5 muestran el proceso de recirculación.

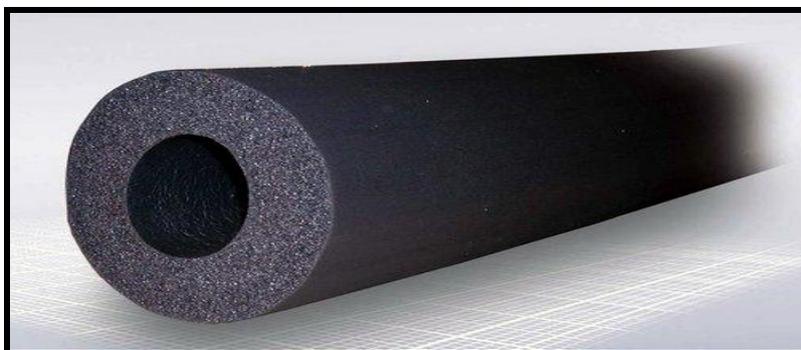


Figura 4.3 Fotografía del material armaflex como aislamiento térmico flexible

Tabla 4.9 Características principales de la bomba de ¾ hp.

Potencia	¾ hp
Diámetro de entrada tubería	1 ¼" = 3.2 cm
Diámetro de salida tubería	1" = 2.5 cm
Voltaje	220 v
Viscosidad	0.22 cm ² /s
Caudal	136 lt/min

Para obtener la velocidad del fluido en la tubería se utiliza la siguiente fórmula:

$$V = Q/A, \text{ donde } A = \pi(D^2/4)$$

V – Velocidad del fluido en la tubería (m/s)

Q – Caudal (m³/s)

A – Área de la tubería (m²)

π – 3.1416

D – Diámetro interior de la tubería (m)

Velocidad de entrada

$$D = 3.2 \text{ cm}$$

$$Q = 136 \text{ lt/min} = 0.00225 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = 3.1416 [(0.032 \text{ m})^2/4]$$

$$V = (0.00225 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.0008042 \text{ m}^2),$$

$$A = 0.0008042 \text{ m}^2$$

$$V = 2.79 \text{ m/s}$$

Velocidad de salida

$$D = 2.5 \text{ cm}$$

$$Q = 136 \text{ lt/min} = 0.00225 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = 3.1416 [(0.025 \text{ m})^2/4]$$

$$V = (0.00225 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.0004908 \text{ m}^2),$$

$$A = 0.0004908 \text{ m}^2$$

$$V = 4.58 \text{ m/s}$$

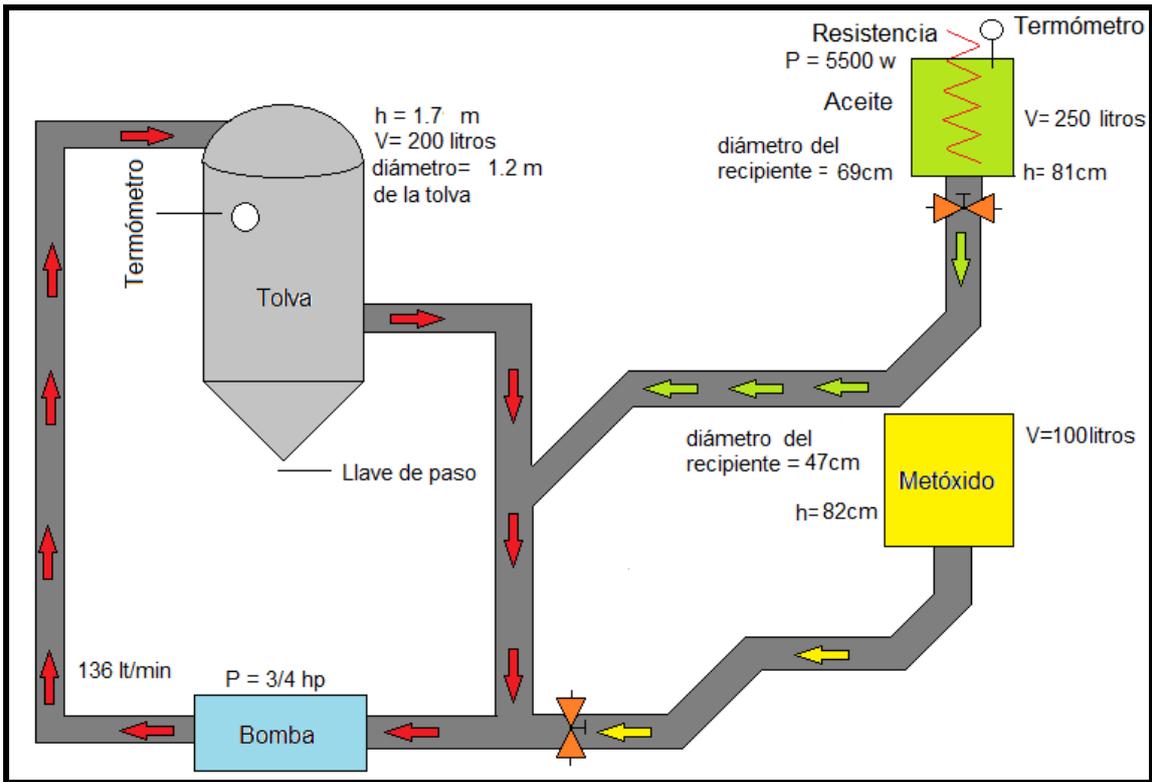


Figura 4.4 Proceso de recirculación

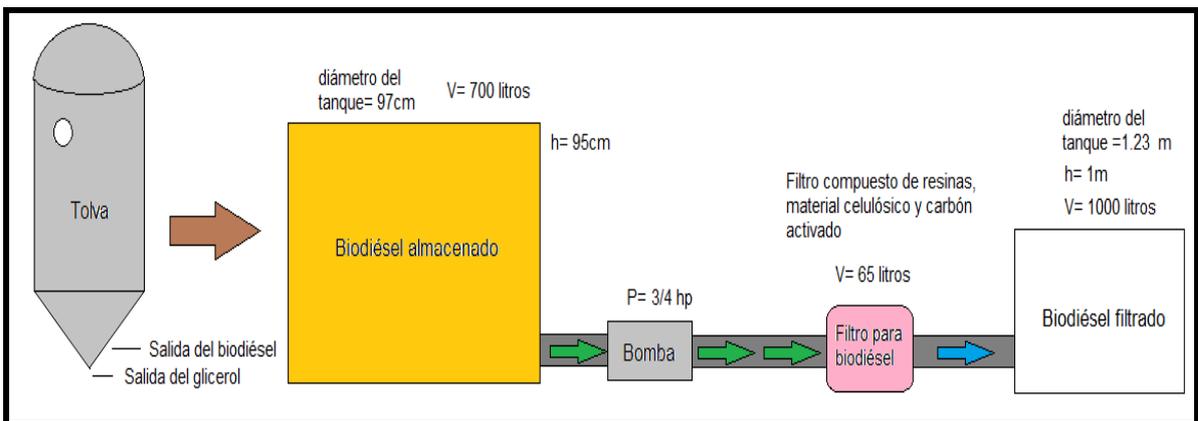


Figura 4.5 Etapa final del proceso de recirculación

4.1.5 Otras instalaciones

Se necesita una instalación eléctrica trifásica a 220 V para el funcionamiento de algunos elementos que son primordiales para la producción de biodiésel. En la Figura 4.6 se muestra la instalación eléctrica.

Carga 1	Carga 2	Carga 3
Bomba ¾ HP = 559.5 watts	1 Resistencia = 5500 watts	Bomba ¾ HP = 559.5 watts

Para calcular las corrientes de la instalación se hace lo siguiente:

$$I_{3\phi} = \text{Potencia} / V (Fp)(\sqrt{3}) \quad ; \quad Fp = 0.9 \quad ; \quad \sqrt{3} = 1.732 \quad ; \quad V = 220 [v]$$

a) Carga 1:

$$I_{3\phi} = 559.5 / 220 (0.9) (1.732); \quad I_{3\phi} = 559.5 / 342.936; \quad I_{3\phi} = 1.63 [A]$$

b) Carga 2:

$$I_{3\phi} = 5500 / 220 (0.9) (1.732); \quad I_{3\phi} = 5500 / 342.936; \quad I_{3\phi} = 16 [A]$$

c) Carga 3:

$$I_{3\phi} = 559.5 / 220 (0.9) (1.732); \quad I_{3\phi} = 559.5 / 342.936; \quad I_{3\phi} = 1.63 [A]$$

Con estos cálculos de corriente se pueden instalar interruptores para cada carga y así proteger la instalación.

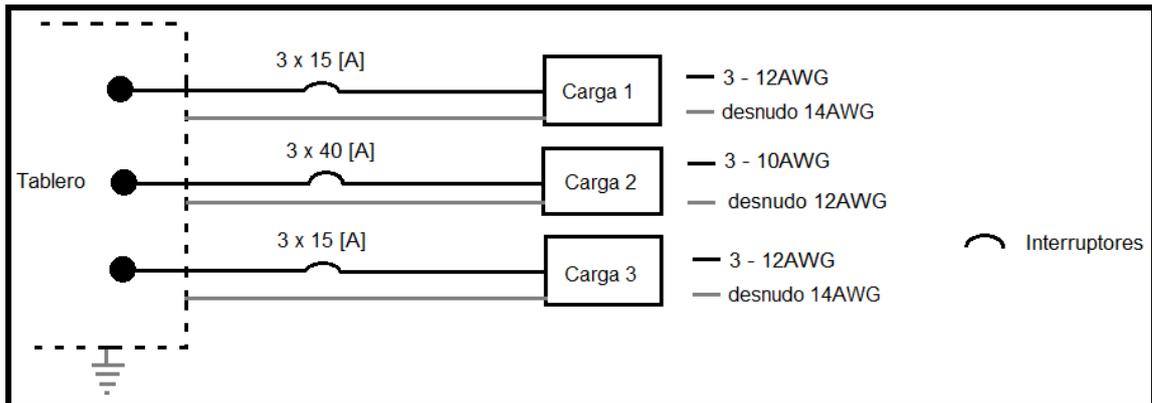


Figura 4.6 Diagrama eléctrico propuesto para la planta de biodiésel

El mantenimiento eléctrico para la instalación debe realizarse (Fluke, 2008):

- Cada 3 meses inspección visual de mecanismos para posible detección de anomalías visibles y dar aviso.
- Cada año comprobación del correcto funcionamiento de todos los equipos de la instalación eléctrica.
- Cada 5 años limpieza de todos los equipos de la instalación eléctrica.

4.2 Configuración de la planta de biodiésel

4.2.1 Cálculos de eficiencia

a) Cálculo del metóxido para una reacción en 150 litros de aceite

Por cada litro de aceite se utilizan 20% de metanol y 1% de NaOH respecto al metanol según datos realizados en el laboratorio.

Por ejemplo:

Para 150 litros de aceite usado se necesitan 30 litros de metanol que es el 20% requerido.

Para el cálculo del NaOH se hace lo siguiente:

El 1% de 30 litros son 0.3 litros.

0.3 litros = 300 cm³; ρ del NaOH = 2.1 gr/cm³ ; ahora se calculan los gramos de NaOH en la mezcla de 150 litros de aceite.

$$\begin{array}{l} 2.1 \text{ gr de NaOH} - 1 \text{ cm}^3 \\ X \quad - \quad \quad \quad 300 \text{ cm}^3 \end{array} \qquad \qquad \qquad \mathbf{X = 630 \text{ gr de NaOH en 150 litros de aceite}}$$

Al realizarse la transesterificación de la mezcla total se obtiene aproximadamente el 80% (144 litros) de biodiésel y el 20% (36 litros) de glicerina bruta.

Como ya se había mencionado en el apartado 2.7, el modelo ideal produce aproximadamente 85% de biodiésel y 15% productos y subproductos de la reacción.

b) Calentamiento de la materia prima

Las características de la resistencia propuesta son:

- Resistencia calefactora de inmersión tipo tubular en tapón de latón de 2" (5.08cm).
- 3 elementos calefactores en forma de "U" con forro de acero inoxidable 316.
- 90 cm de inmersión.
- 5500 watts
- 220 V

Debe de ser una resistencia hecha de fábrica para calentar aceite y para calentar un volumen de 150 litros aproximadamente.

4.2.2 Tiempos de producción

El tiempo de producción del biodiésel es de menos de una semana. La Tabla 4.10 muestra cada etapa y el tiempo aproximado desde la recolección de la materia prima hasta el uso de dicho biocombustible.

Tabla 4.10 Tiempos de producción del biodiésel

Etapa	Tiempo
Recolección	4 días
Filtrado	1 día
Calentamiento	30 minutos
Reacción	90 minutos
Separación de glicerol	30 a 45 minutos
Vaciado	30 minutos
Filtrado	30 minutos
Almacenamiento	45 minutos

- a) **Recolección:** En esta etapa se recolecta el aceite usado de todas las cafeterías y barras existentes y se almacena en recipientes de plástico.
- b) **Filtrado:** Se deja reposar el aceite para que se sedimenten todos los restos de comida quemada que hayan quedado, posteriormente se pasa por un filtro de malla metálica para reducir aún más los restos de comida.
- c) **Calentamiento:** El aceite se debe calentar a 65° en un contenedor de polietileno de alta densidad por medio de la resistencia de inmersión.
- d) **Reacción:** El aceite caliente se deja caer hacia el reactor, una vez dentro del reactor se agrega el metóxido y se bombea durante 90 minutos para que se logre la reacción de transesterificación.
- e) **Separación del glicerol:** El reactor tiene un separador por gravedad, el glicerol como es más denso se queda hasta el fondo del reactor, y es extraído fácilmente, quedando solo biodiésel en el reactor.
- f) **Vaciado:** Se extrae el biodiésel y se almacena en recipientes de polietileno.
- g) **Filtrado:** El biodiésel se hace pasar a través de un filtro constituido por una bolsa de 65 litros de capacidad donde se aloja el material filtrante (resinas, material celulósico, carbón activado) para remover partículas de glicerol, metanol y agentes externos al biodiésel que hayan quedado y así darle una excelente calidad.
- h) **Almacenamiento:** Después del filtrado se almacena el biocombustible en recipientes de plástico listo para su uso.

Los precios internacionales del biocombustible varían significativamente dependiendo de la materia prima usada y del tamaño de la planta de producción. En México el litro del biodiésel está a \$10.18 por litro aproximadamente (SAGARPA, 2011).

4.2.3 Mejoras

De la Figura 2.6 se puede observar que en un futuro se pueden recuperar los elementos que no reaccionaron en todo el proceso. Para esto se necesitan más reactores que puedan realizar esas funciones.

- a) **Recuperación del catalizador:** De la glicerina que se obtuvo mediante la transesterificación se puede remover el hidróxido de sodio que no reaccionó, agregando ácido fosfórico 100% puro para que se forme fosfato de sodio que se extrae mediante un separador de gravedad.
- b) **Purificación de la glicerina:** Una vez extraído el hidróxido de sodio, la glicerina se envía a un reactor para que los residuos de agua y metanol se extraigan por destilación. Contando con más tecnología estos flujos se pueden enviar de nuevo al inicio de todo el proceso. El metanol para la transesterificación y el agua al reactor de lavado de biodiesel.

4.3 Diseño global de la planta de biodiésel

Una planta de biodiésel debe de tener todo lo necesario para que se obtenga una producción de calidad en cuestión al producto. Las instalaciones tienen que ser seguras para las personas que laboren en ésta y deben de tener pleno conocimiento de rutas de evacuación, medidas de seguridad y sobre todo precaución en todo momento ya que se manejan materiales peligrosos. La Figura 4.7 muestra el plano general de una planta de biodiésel lista para su funcionamiento al 100%.

4.3.1 Plano general

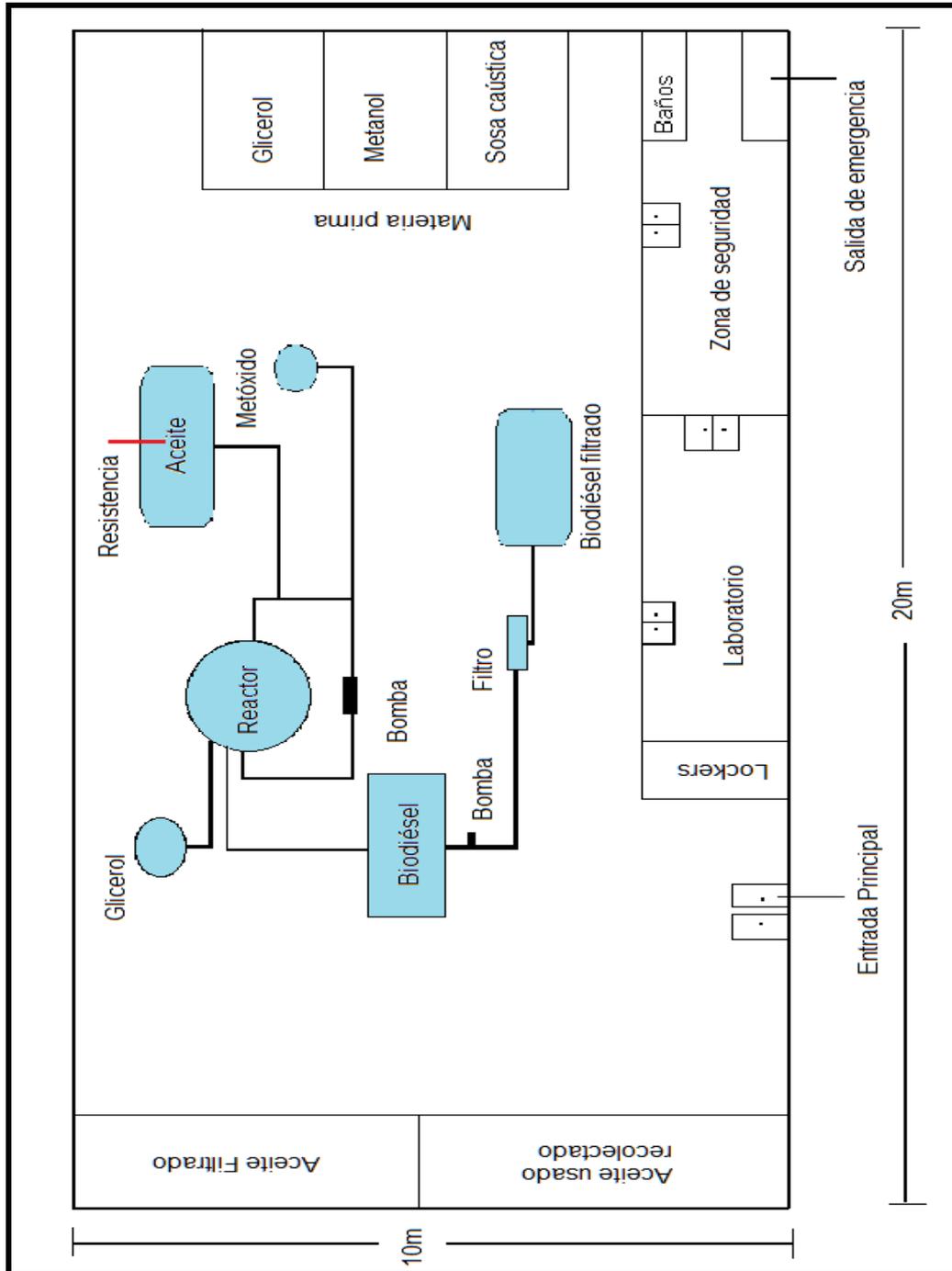


Figura 4.7 Plano general de la propuesta de la planta de biodiésel

4.3.2 Especificaciones

Debe contar con áreas de aprendizaje, como talleres, laboratorios y áreas de pruebas. En la Tabla 4.11 se muestra un costo aproximado de la obra civil de la planta.

Tabla 4.11 Costos de la obra civil de la planta de biodiésel (Arcos Nacionales, 2013)

CONCEPTO (OBRA CIVIL)	PRECIO
Trazo, alineación y nivelación de terreno. Incluye: materiales, equipo, herramienta y mano de obra necesaria.	\$6,050.00
Conformación y compactación con material controlado en capas (60% grava y 40% tepetate humedad optima)	\$13,310.00
Zapata corrida de concreto, con acero de refuerzo del No.3, cimbrado y descimbrado, incluye: material, mano de obra, equipo y herramienta	\$79,200.00
Contratrabe	\$6,600.00
Suministro e instalación de tubo de pvc 6" hidráulico con una longitud de 6mts para agua pluvial, incluye: material, mano de obra, equipo y herramienta	\$11,200.00
Registro de 40x60x80 cm	\$3,900.00
Tubo albañal de 20 cm (8") de diámetro de concreto simple	\$6,060.00
Suministro y colado de piso de concreto armado de 15cm de espesor	\$78,650.00
Suministro y colocación de muro a base de tabicón pesado 10x14x28	\$44,928.00
Cadena de cerramiento de 0.20 x 0.20 cm. de concreto	\$11,880.00
Cadena intermedia de 0.15 x 0.20 cm. de concreto	\$11,232.00
Columna de 0.30 x 0.30 m.	\$16,384.00
Castillo de 0.15 x 0.15 cm. de concreto	\$9,000.00
Suministro y rolado de cubierta curva a pie de obra y montaje de cubierta arcotecho. Herramienta, grúa y mano de obra	\$86,985.12
Suministro y colocación de ventiladores	\$11,200.00
SUBTOTAL	\$396,579.12
16% IVA	\$63,452.65
TOTAL	\$460,031.77

- Área de ubicación e instalación entre 120 a 200m² mínimo.
- Altura mínima de 2.20m
- Construcción con materiales de concreto, block, tabicón etc. Evitar instalaciones fabricadas con materiales inflamables como unicel, plásticos, cartón, etc.
- Contar con áreas o zonas de ventilación ventanas, extractores, extractores de aire o de humo, aire acondicionado, en área de reactor, laboratorio y zona de almacenaje de reactivos y materia prima.
- Contar con zona de seguridad; regadera, lava ojos y botiquín de primeros auxilios.
- Contar con una zona de lockers, percheros y baños para los trabajadores.

4.3.3 Normatividad a seguir

En México no existen como tal normas para la construcción de una planta de biodiésel; a continuación se enumeraran y describirán las normas y permisos utilizados en EE.UU.

1) Ley de agua limpia

Una planta de biodiésel por lo general utiliza agua para lavar el producto y de ésta forma eliminar las impurezas. El agua de lavado contiene glicerina, metanol, aceites de alimentación que no han reaccionado, y el biodiésel. Las aguas residuales de una planta de biodiesel se pueden utilizar de varias maneras. El método de eliminación determina el tipo de permiso que se necesita. La Tabla 4.12 muestra las tres alternativas para la eliminación de aguas residuales.

Tabla 4.12 Permisos para la eliminación de aguas residuales.

Permiso	Descripción
Permiso para la eliminación directamente a un cuerpo de agua.	El agua de lavado puede ser incorporada a un cuerpo de agua, por ejemplo, un arroyo, río o lago. Éste permiso es emitido por el estado en que se encuentre la planta de biodiésel.
Permiso de descarga a un sistema municipal de tratamiento de aguas residuales.	Consiste en enviar las aguas residuales a una planta de tratamiento. En algunas ciudades existen plantas de pre-tratamiento, las cuales sólo tienen permitido descargar al día 5% del total de la planta de tratamiento (25,000 galones).
Permisos para la aplicación de aguas residuales a la tierra.	No hay regulaciones federales aplicables al desecho de aguas residuales al suelo, sin embargo hay un permiso donde se determinan los contaminantes del agua para que pueda ser arrojada a zonas agronómicas.

2) Ley del aire limpio

Establece normas para la calidad del aire a fin de que no sea nocivo para la salud pública y el medio ambiente. Existen dos normas principales:

- a) Estándares Primarios, que establecen límites para proteger la salud pública, incluida la salud de las poblaciones sensibles como los asmáticos, los niños y los ancianos.
- b) Normas secundarias, que establecen límites para proteger el bienestar público, incluida la visibilidad, animales, cultivos, vegetación y edificios.

La ley del aire limpio exige que se tienen que reducir al mínimo las emisiones al aire y proteger la salud humana y del medio ambiente antes de que comience la construcción de una planta de biodiesel. El permiso aplicado para los EE.UU. que exige esta ley indica que el máximo de contaminantes para una instalación ya sea de biodiésel u otro tipo son:

- Monóxido de carbono: 100 toneladas por año
- Óxidos de nitrógeno: 40 toneladas por año
- Dióxido de azufre: 40 toneladas por año

3) Ley de prevención de la contaminación

La prevención de la contaminación es la práctica de la eliminación o reducción de residuos. El esfuerzo consiste en no dejar que la materia prima en los procesos de producción se convierta en residuos. La prevención de la contaminación incluye las siguientes prácticas (EPA, 2008):

- Modificar los procesos de producción
- Promover el uso de productos no tóxicos o menos tóxicos
- Reutilizar materiales en lugar de desecharlos.

4) Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos

Esta ley es la primera que se generó en México relacionada con los biocombustibles. El objeto de esta ley es la promoción y el desarrollo de los bioenergéticos con el propósito de favorecer a la diversificación energética y el desarrollo sustentable, como factores que permitan garantizar el apoyo al campo mexicano, a través de acciones como (SENER, 2010):

- Fomentar a la producción de insumos para bioenergéticos.
- Promover la producción y la comercialización de bioenergéticos.
- Incentivar el desarrollo regional y el de las comunidades rurales menos favorecidas.
- Procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera utilizando los instrumentos contenidos en los tratados internacionales de los que México es parte.
- Coordinar acciones entre los Gobiernos Federal, Estatales, y Municipales, así como promover la participación de los sectores social y privado.

4.3.4 Balance de materia y energía

Como ya se mencionó en el apartado 4.2.1 a la tolva se le introducen 150 litros de aceite filtrado y 30 litros de metóxido ya que la capacidad del reactor es de 200 litros, de ésta mezcla se obtienen 144 litros de biodiésel puro por lote, aproximadamente en un tiempo de 180 minutos. Basándonos en la Tabla 4.13 podemos obtener aproximadamente las emisiones de CO₂ de diferentes mezclas de combustible (B30, B50 y B100) de dos lotes de biodiésel de esta planta quemados por un camión que tiene de capacidad 250 litros de combustible en el tanque y así comparar las emisiones totales de CO₂ con cada tipo de mezcla. Tabla 4.14

Tabla 4.13 Emisiones de CO₂ producidas por la quema de combustible (CICC, 2012)

	Combustible			
	Diésel	B30	B50	B100
Consumo de barriles diarios	300,000	300,000	300,000	300,000
Litros por barril	159	159	159	159
Litros totales	47,700,000	47,700,000	47,700,000	47,700,000
Emisiones por litro (kg de CO ₂ / litro)	2.61	1.827	1.305	0.503
Emisiones Totales (Kg de CO ₂)	124,497,000	87,147,900	62,248,500	23,993,100

Tabla 4.14 Emisiones de CO₂ por dos lotes de la planta de biodiésel

	Diésel	B30	B50	B100
Litros de Diésel	250 (100%)	175 (70%)	125 (50%)	0 (0%)
Litros de Biodiésel	0 (0%)	75 (30%)	125 (50%)	250 (100%)
Litros totales (1 Tanque)	250	250	250	250
Emisiones por litro (kg de CO ₂ / litro)	2.61	1.827	1.305	0.503
Emisiones Totales (Kg de CO ₂)	652.5	456.75	326.25	125.75
No. Aproximado de camiones abastecidos con los 288 litros (dos lotes) de biodiésel obtenidos de la planta	0	3.84	2.3	1.1

CONCLUSIONES

Con el diseño de reactor de baja escala presentado en éste trabajo y construido en la FI, además de fines didácticos para los alumnos de licenciatura y posgrado de la Facultad de Ingeniería, se da un buen ejemplo para otras universidades ya que al producir un porcentaje del combustible para los autobuses de transporte de alumnos, nuestra Ciudad Universitaria es más limpia y fomentamos a los alumnos de otras facultades a la no contaminación por gases de efecto invernadero (GEI) y del agua.

Éste reactor al obtener biodiésel de calidad automotriz se pueden abastecer camiones PUMABUS con los 300 litros de aceite que se recaudan aproximadamente por semana en CU, esto equivale a dos lotes de biodiésel puro de alta calidad (288 litros) para abastecer 3 camiones con tanques de 250 litros de combustible de capacidad con una mezcla de B30. Con esto se reducen las emisiones en un 30% por tanque de combustible. Además la transesterificación nos ofrece otro beneficio al obtener glicerol como subproducto, éste puede ser comercializado o puede ser utilizado para otros proyectos didácticos en CU.

El uso del biodiésel en México será una buena opción de inversión cuando se creen esquemas de incentivos por parte del gobierno, apoyando a empresas que se quieran dedicar a la producción y asimismo apoyando a la producción agrícola implementando otros métodos de cultivo, y comenzar a desarrollar una industria nacional de producción de biodiésel, incluyendo actividades de capacitación, investigación y desarrollo. La sustitución de diésel de petróleo por biodiésel permitiría ahorrar alrededor de 7.5 millones de toneladas de CO₂/año hacia el 2014.

Una producción a gran escala de biodiésel en México requiere de un esfuerzo importante en investigación, y que mejor empezando en la universidad diseñando y llevando a cabo proyectos de este tipo. De aquí la importancia de este trabajo, el cual se hizo pensando en la implementación de nuevas tecnologías para impulsar el desarrollo de energías limpias y sustentables en CU, resolviendo problemas ambientales dentro de nuestra universidad y asimismo mostrar a la comunidad universitaria éste tipo de proyectos que nos favorecen a todos.

ACRÓNIMOS

DGAPA – Dirección General de Asuntos del Personal Académico

PAPIME - Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza

ACD – Aceite Comestible de Desecho

ATSM – American Society of Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)

AV – Aceites Vegetales

AGL – Ácidos Grasos Libres

MSC – Metanol Supercrítico

GEI – Gases de Efecto Invernadero

ZMVM – Zona Metropolitana del Valle de México

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAS, 2009. Estadísticas de soja. Asociación Americana de Soya, 1994-2009. EE.UU.

Algorta, J. 2006. Almanaque de Bancos de Seguros del Estado. Montevideo, Uruguay

Alvarado, H. 2002. Llama Nóbel a controlar emisión de contaminantes. Periódico web. El Norte, 15 de noviembre. Monterrey, Nuevo León., México.

Arcos Nacionales, 2013. Cotización de una obra civil de 200m², Estado de México, México.

ASTM, 2009. Annual book of standards. Publicado por la American Society for Testing Materials. EE.UU.

BASF, 2006. Hoja de seguridad del biodiésel, Publicación de la Badische Anilin und Soda Fabrik. Ludwigshafen, Alemania.

Berbel, R. 2010. Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustibles. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Cataluña, España.

BM, 2010. Planta Piloto de Biodiésel. Publicación de la empresa Biofuels de México. México, D.F., México.

Brühl, C. 2004. Environmental Science Published for Everybody Round the Earth. MPI for Chemistry. Mainz, Alemania.

BA 2011, Plantas y equipos para producción de biodiésel, Publicación de Byodis América. Buenos Aires, Argentina.

Castro, P., Castillo, L., Coello, J. y Calle, J. 2006. Producción de biodiésel a pequeña escala a partir de aceites usados en la ciudad de Lima. Intermediate Technology Development Group (ITDG) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Lima, Perú.

CEN, 2012. Fatty acid methyl esters for use in diesel engines and heating applications. Publicado por el Comité Europeo de Normalización, Unión Europea.

- Chapman, D. 1993. Lípidos. Editado por Alhambra y traducido por García, R. Madrid, España.
- CICC, 2012. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Publicación de la Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. Cataluña, España.
- CIEM, 2006, Tendencias Energéticas Mundiales: Implicaciones Sociales y Ambientales, Publicación del Centro de Investigación de la Economía Mundial, La Habana, Cuba.
- CISPROQUIM, 2005. Hoja de seguridad del hidróxido de sodio. Bogotá, Colombia.
- CONAE, 2007. Biodiésel, Publicación de la Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía. México, D.F., México.
- CORPODIB., GM 2002. Prueba de flota de vehículos, Publicación de la Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia y General, Bogotá, Colombia.
- Demirbas, A. 2002. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in super critical methanol. **Energy Conversion and Management**. 43(17):2349-2356.
- Demirbas, A. 2009. Progress and recent trends in biodiesel fuels. **Energy Conversion and Management**. 50(1): 14-34.
- EIA, 2010, Biofuels. Publicación de EE.UU. Energy Information Administration, EE.UU.
- EIA, 2011. Energy-Related Carbon Dioxide Emissions. Publicación de EE.UU. Energy Information Administration. EE.UU.
- Engelman, W., Guenther, A. y Silvis, W. 1978. Vegetable oil as a diesel fuel. Diesel and Gas Engine Power Division of ASME paper number 78-DGP-19. New York ASME. EE.UU.
- EPA, 2008. Environmental Laws Applicable to Construction and Operation of Biodiesel Production Facilities, Publicación de la Environmental Protection Agency, EE.UU.
- FAO, 2001. UWET- Unified Wood Energy Terminology Uwet. Publicada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Departamento de Montes. Turrialba, Costa Rica.
- FLUKE, 2008. Inspección y mantenimiento de instalaciones eléctricas, Publicación de Servicios eléctricos profesionales FLUKE, México, D.F., México.
- German, T., Kaufman, K., Pratt, G. y Derry, J. 1985. Field evaluation of sunflower oil/diesel fuel blend in diesel engines. Publicación de la American Society of Agricultural Engineers (ASAE). EE.UU.
- Graedel, T. y Crutzen, P. 2003. Atmospheric change. An Earth System Perspective. Editorial William H. Freedman and Company. Nueva York. EE.UU.
- Herrero, M., Juana, J., Santos, F., Macias, M., y Hernández, J. 2003. Energías Renovables para el desarrollo. Biocombustibles. Ediciones Paraninfo. Madrid, España.
- INEGEI, 2002. Emisiones de GEI en el ZMVM, Publicación del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, México, D.F., México.
- Ingemecánica, 2009. Clasificación de los aceros, Publicación de Ingemecánica; Norma UNE-36010, Madrid, España.
- INTI, 2008. Estudio Comparado entre el Combustible Diésel y Biodiésel. Publicación del Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Buenos Aires, Argentina.

IPCC, 2007. Climate change 2007, The Physical Science Basis. Working Group. Universidad de Bern, Suiza.

Kessel, N. 2009. ASTM Standardization News, ASTM Establece normas para el biodiésel. EE.UU.

Komers, K., Machek, J. y Stloukal R. 2001. Biodiesel for rapeseed oil and KOH. Composition of solution of KOH in methanol as reaction partner of oil. **Europa Journal Lipid Science Technology**. 103:359-62

Kusdiana, D. y Saka, S. 2001. Kinetics of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuels as treated in supercritical methanol. Publicación del Department of Socio-Environmental Energy Science. Universidad de Kyoto, Japón.

Larosa, J. 2003. Proceso para la producción de biodiesel, meliéster o ésteres metílicos de ácidos grasos. Materias primas y servicios necesarios. Editado por Ediciones Técnicas. Pág. 4. México, D.F., México.

Larosa, J. 2004. Proceso para la producción de biodiesel, meliéster o ésteres metílicos de ácidos grasos. Refinación de glicerina. Editado por Ediciones Técnicas. Pág. 1-8. México, D.F., México.

McDonnell, P., Ward, M., McNully, B. y Howard-Hildige, R. 2000. Result of Engine and Vehicle testing of semi refined of rapeseed oil. *Trans. ASAE*. 43(6):1309 – 1316.

Methanex, 2008. Hoja de seguridad del metanol. Vancouver, Canadá.

ML 2009, Precios de materiales, Publicación de Mercado Libre, México, D.F., México.

NBB, 2007. Specification for biodiesel B(100) ASTM D6751-08. Fuel fact sheets. Publicado por la National Biodiesel Board. Washington, DC, EE.UU.

Pahl, G. 2005. Biodiesel Growing a New Economy. Editado por Chelsea Green Publish Company. EE.UU.

Pestes, M. y Stanislaw, J.1984. Piston ring deposits when using vegetable oil as a fuel. **J. Test Eval**. 12(2): 61 – 68.

Plascencia, M. 2010. Estudio de factibilidad para el uso de biodiésel en el transporte interno de Ciudad Universitaria a partir de aceites comestibles de desecho. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Quick, G. 1980. Development in use of vegetable oils as a fuel for diesel engine. Publicación de la American Society of Association Executives (ASAE). Paper number 801525 EE.UU.

QT, 2009. Hoja de seguridad de la glicerina. Publicación de QUÍMICA TREZA. Estado de México, México.

RFA, 2012. Productores y consumidores de etanol, Publicación de la Renewable Fuels Association. Washington. EE.UU.

RIOSSA, 2006. Hoja de seguridad del aceite vegetal. Publicación de Refinación Industrial Oleícola. S.A, Linarejos, España.

SAGARPA, 2011. Precios Internacionales de los Biocombustibles, Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. México.

Sapaun, M., Masjuki, H. y Azlan, A. 1996. The use of palm oil as a diesel fuel, *substitute*. **J. Power Energy A**. 210:47 – 53.

SENER, 2006. Potenciales y Viabilidad del Uso del Bioetanol y Biodiésel para el Transporte en México. Publicación de la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SENER, 2010. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. Publicación de la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

Sims, R., Raine, R. y Leod, R. 1981. Rapeseed oil as a fuel for diesel engine SAE Australia. Paper presented at the national conference on fuels from crop of the society of Automotive Engineers. Australia.

Singh, P. 2010. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: *A review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14: 200 - 216.

Tickell, J. 2003. From the fryer to the fuel tank. Book Masters, Nuevo Orleans, EE.UU.

Vera, L. 2002. Experiencias de Mitigación de emisiones de Transporte en Países en Desarrollo. Publicación de la Secretaría de Transporte. San Martín, Argentina.

Vicente, A. 1988. Producción, análisis y control de calidad de aceites y grasa comestibles. Manual de calidad. Editado por ediciones Madrid. España, Madrid.

Zhang Y., Dubé M.A., McLean D.D y Kates M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: Process design and technological assesment. **Wat. Res.** 89 (2003): 1-16

Ziller, S. 1996. Aceites y grasas alimentarias. Editado por Acribia S.A. Traducido por De la Fuente, J. Zaragoza, España.