



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS**
FACULTAD DE INGENIERIA

T E S I S

**REACTOR SOLAR PARA LA PRODUCCIÓN
DE BIODIESEL**

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN DESARROLLO SUSTENTABLE

CON PERFIL EN:
ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA:
BIOL. JOSE DANIEL MARTINEZ SALAS

DIRECTOR(ES) DE TESIS:
DR. JOEL PANTOJA ENRÍQUEZ
DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, JUNIO 2013.

Agradecimientos

Doy gracias a mi Señor Jesús por permitirme realizar y concluir un estudio de maestría en Ciencias en Desarrollo Sustentable.

Agradezco el apoyo, amor y comprensión de mis padres al Prof. Ezequiel Martínez Rubio y la Cp. Beatriz del Carmen Salas Escamilla.

Agradezco a mis amigos:

Ing. Luis Alberto Hernández Domínguez por su apoyo en el diseño del reactor solar.

al Ing. César Camacho Fernández, y al Ing. Manuel Alejandro Vázquez Morales con quienes compartí momentos extraordinarios en el trayecto de la maestría.

Gracias a mis directores de tesis, el Dr. Joel Pantoja Enríquez, al Dr. Joel Moreira Acosta y al Dr. Guillermo Rogelio Ibáñez Duarte por sus valiosos conocimientos, por el entusiasmo y compromiso con el trabajo de tesis.

Gracias a la Dra. Rocío Meza Gordillo por su valioso apoyo en el análisis del biodiesel producido por el reactor solar en el Polo Tecnológico Nacional para el Desarrollo de Investigación y pruebas Analíticas en Biocombustibles del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Gracias a mi amiga IBQ, Mercedes Alejandra Velázquez Toledo por su apoyo

Gracias al Biól. Rodolfo Palacios Silva, por su valioso conocimiento, motivación y consejos.

Gracias a todo el personal docente y administrativo que labora en la UNICACH.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
NOMENCLATURA.....	V
ABREVIATURAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	X
CAPITULO 1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Orígenes del Biodiesel.....	1
1.2. Problemática Energética.....	4
1.2.1. Producción de biodiesel.....	4
1.2.2. Producción de Biodiesel en México.....	5
1.2.3. Producción de aceite vegetal en México.....	5
1.3. Situación de los Biocombustibles de 1ª y 2da Generación en América Latina y Caribe.....	7
1.3.1. Biocombustibles de 3ra Generación.....	8
1.4. OBJETIVOS	8
1.4.1. Objetivo general.....	8

1.4.2. Objetivos específicos.....	8
1.5. HIPÓTESIS	9
1.6. JUSTIFICACIÓN	9
1.7. CONCLUSION	11
CAPITULO2. FUNDAMENTOS TEORICOS	12
2.1. Biodiesel.....	12
2.1.2. Obtención del Biodiesel.....	13
2.1.3. Aceites y grasas.....	13
2.1.4. Aceites vegetales.....	14
2.1.5. Esteres.....	15
2.1.6. Acido Graso.....	16
2.1.7. Composición del Biodiesel.....	17
2.1.8. La reacción del biodiesel.....	18
2.1.9. Transesterificación.....	19
2.2. La Química del Biodiesel.....	21
2.3. Reacciones presentes en la reacción de la transesterificación.....	22
2.4. Uso del biodiesel.....	24
2.5. Especificaciones del Biodiesel.....	25
2.6. El colector plano.....	27

2.7. Tipos de colectores planos.....	29
2.8. Algunos Calentadores Solares.....	32
2.9. Termosifón.....	33
2.10. CONCLUSION.....	34
CAPITULO 3. MATERIALES Y METODOS.....	35
3.1. Ubicación de la investigación.....	35
3.2. Materiales.....	35
3.2.1. Aceite vegetal.....	36
3.2.2. Metanol.....	36
3.2.3.Relacion de Metanol/aceite.....	38
3.2.4. Soda Caustica.....	39
3.3.Propiedades de los reactivos empleados.....	40
3.3.1.Propiedades de las Sosa Caustica utilizada	40
3.3.2. Metanol.....	40
3.4.DISEÑO DEL SISTEMA.....	42
3.4.1. DIMENSIONAMIENTO.....	42
3.4.2. Calculo del dimensionamiento de un Reactor Solar para la producción de Biodiesel.....	42
3.4.3. TAMAÑO DEL TERMO TANQUE.....	43
3.4.4. Calculo de la pérdida de calor en el tanque del reactor.....	43

3.4.5. Fuente de Energía.....	46
3.4.6. Calculo de la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de aceite.....	46
3.4.7 Área del colector.....	47
3.5. CONSTRUCCIÓN DEL TERMO TANQUE.....	48
3.5.1 CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR.....	50
3.5.2. Construcción de la caja.....	50
3.5.3. Recubrimiento.....	50
3.5.4. Armado.....	50
3.5.5. Perforación.....	51
3.5.6. Vidrios.....	52
3.5.7. Sistema de purgado.....	52
3.5.8. Agitador.....	53
3.6. Técnica de transesterificación.....	55
3.6.1. Producción de Biodiesel en el laboratorio de fisicoquímica.....	55
3.7. Operación del reactor solar.....	58
3.7.1. Transesterificación en el Reactor Solar.....	58
3.7.2. Lavado del biodiesel en laboratorio.....	61
3.7.3. La Técnica. “Dr. Pepper” (Pat Bend) en el laboratorio.....	61
3.7.4. Primer Lavado.....	61
3.7.5. Segundo lavado.....	62

3.7.6. Tercer Lavado.....	63
3.7.7. Cuarto Lavado.....	64
3.7.8. Quinto Lavado.....	66
3.7.9. Secado del biodiesel.....	69
3.7.10. Medición del pH del biodiesel lavado con el potenciómetro.....	70
3.8. MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR.....	71
3.9. CONCLUSION.....	72
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	73
4.1. RESULTADOS DE DISEÑO.....	73
4.2. El mecanismo de agitación.....	76
4.3. Evaluación del sistema.....	78
4.3.1. Evaluación con H ₂ O.....	78
4.3.2. Evaluación con Aceite.....	81
4.4. Caracterización del Biodiesel.....	83
4.5. CONCLUSION.....	86
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	88
5.1. Conclusiones generales.....	88
5.2. Aportaciones.....	90
REFERENCIAS.....	91

ANEXOS.....	102
Hoja 1 de Análisis del Biodiesel a nivel laboratorio y hoja 2 de análisis del biodiesel producido en el reactor solar.....	102
Diseño del logotipo.....	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 .Representación esquemática de la reacción de la transesterificación.....	20
Figura 2.2. Reacciones presentes en la reacción de transesterificación.....	21
Figura 2.3. Componentes principales de una lamina absorbadora.....	27
Figura 2.4. Calentadores solares de agua, Sistemas integrados.....	30
Figura 2.5 Calentadores de agua.....	31
Figura 2.6, tanque para 60 litros.....	32
Figuras 2.7, cuatro colectores solares.....	32
Figura 2.8. Dos colectores solares y tanque auxiliar eléctrico.....	32
Figura 2.9.Sistema de circulación por Termosifón.....	33
Figura 3.1 Recubrimiento del forro aislante del tanque, vista Interior lateral.....	48
Figura 3.2. Entrada y salida del aceite en el colector.....	51
Figura 3.3. Colector solar del reactor.....	52
Figura 3.4. Llave de ½ del sistema de purgado del colector.....	52
Figura.3.5a. Patrón de flujo con agitador no centrado	53
Figura 3.5b.Eje e impulsor.....	53
Figura 3.6. Impulsor con 4 paletas planas	54
Figura 3.7. Producción de biodiesel a nivel laboratorio.....	56

Figura 3.8. Biodiesel y glicerina.....	57
Figura 3.9. Sensor de temperatura Taylor.....	59
Figura 3.10. Extracción del biodiesel y glicerina.....	59
Figura 3.11. Biodiesel y glicerina producido en el reactor solar.....	60
Figura 3.12. Biodiesel parte superior y glicerina parte inferior.....	60
Figura 3.13. Primer lavado del Biodiesel.....	62
Figura 3.14. Segundo lavado del biodiesel.....	63
Figura 3.15. Tercer lavado del biodiesel.....	64
Figura 3.16. Cuarto lavado del biodiesel.....	65
Figura 3.17. Quinto lavado del biodiesel.....	66
Figura 3.18. Reposo del biodiesel.....	67
Figura 3.19. Lavado final del biodiesel.....	68
Figura.3.20. Secado del biodiesel.....	69
Figura. 3.21. El pH del Biodiesel lavado.....	70
Figura 3.22. Sensor daystar meter.....	71
Figura 3.23. Banda spectrum.....	71
Figura 4.1. Reactor solar, parte frontal.....	77
Figura. 4.2. Reactor solar, parte posterior.	77
Figura 4.3. Reactor solar, parte lateral derecha.....	77

Figura 4.4.Variación de radiación solar con el tiempo de exposición.....	78
Figura 4.5.Variación de temperatura del agua con el tiempo de exposición.....	78
Figura 4.6. Variación de radiación solar con respecto al tiempo de exposición.....	79
Figura 4.7.Variación de temperatura del agua con respecto al tiempo de exposición.....	79
Figura 4.8. Variación de temperatura y de radiación solar para 50 L y 45L de H ₂ O del día 19 y 23 de abril del 2012.....	80
Figura 4.9. Variación de la radiación solar para 40 litros de aceite.....	81
Figura 4.10. Variación de temperatura para 40 litros de aceite.....	81
Figura 4.11. Variación de la temperatura del aceite con respecto a la radiación solar.....	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Producción nacional de aceites.....	6
Tabla 2.1. Perfil de ácidos grasos de aceites vegetales.....	15
Tabla 2.2. Ácidos grasos, notación y formula molecular.....	16
Tabla 2.3. Especificaciones del biodiesel de la Norma EN 14214.....	26
Tabla 3.1. Irradiación global media en la República Mexicana.....	47
Tabla 3.2. Características de la Espuma de polietileno expandido.....	49
Tabla 4.1. Resultados de Diseño.....	74
Tabla 4.2. Características de los materiales para la construcción del colector solar y sus conexiones.....	75
Tabla 4.3. Características del sistema de agitación.....	76
Tabla 4.4. Informe de análisis del biodiesel producido en el laboratorio de fisicoquímica a partir de aceite limpio marca patrona, bajo la norma Europea EN14214.....	83
Tabla 4.5. Análisis del biodiesel producido en el reactor solar.....	84

NOMENCLATURA

Letras minúsculas

a	Altura
cm	Centímetros
Cp.	Calor específico ($\frac{\text{btu}}{\text{lb.}^\circ\text{F}}$)
g	Gramos
gal	Galones
h	Horas
hp	Caballos de potencia
in	Pulgadas
kg	Kilogramos
l	Litros
lb	Libras
m/m	Masa sobre masa
m	Metros
mg	Miligramos
ml	Mililitros
mm	Milímetros
s	Segundos
t	Tiempo
v	Volumen (litros)
w	Watts

Qu	Calor útil
Ac	Área de captación
H _T	Radiación incidente
η _c	% de eficiencia
Q _{ac}	Calor util
Q _T	Pérdidas de calor
m	masa

Letras mayúsculas

ΔP	Caída de presión (bar)
ΔT	Incremento de temperatura
°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
A	Área
D	Diámetro
AT	Área Total de las paredes
K	Coeficiente global de transferencia de calor
K _v (A) ⁿ¹ (B) ⁿ²	Velocidad de reacción

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Material
<i>EBB</i>	<i>European Biodiesel Board</i>
Btu	The British Thermal Unit
EU	European Union. Unión Europea
FIUBA	Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires
GR	Grado Reactivo
GT	Grado Técnico
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
NBB	National Biodiesel Board
ppm	Partes por millón
rpm	Revoluciones por minuto
rps	Revoluciones por segundo
USD	United States Dollar

RESUMEN

El presente trabajo de investigación describe el diseño, construcción y operación un reactor solar por lote de 60L de capacidad que permita la producción de 50L de biodiesel, este desarrollo del proyecto se llevo a cabo en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas en la facultad de Ingeniería en Energías, integrando esfuerzos en el desarrollo de modelos tecnológicos apropiados para la producción de biodiesel en zonas alejadas y con difícil acceso a combustibles líquidos y como alternativa para sustituir los calentadores tradicionales (eléctricos, a gas, etc), es una opción atractiva, si se toma en cuenta las bajas temperaturas necesitadas (50°C a 55°C), además, desde el punto de vista de ahorro energético es la opción más favorable, ya que en estos sistemas, la fuente de calor es la radiación solar, la cual sustituye los combustibles fósiles o la electricidad, generando así un proceso de producción mas limpio.

EL reactor solar para calentamiento de aceite está constituido por dos elementos principales:

- Colector, encargado de recibir y transformar la energía incidente, por medio de la convección se transfiriere el calor que resulta del efecto combinado entre la conducción y la presencia de un fluido en movimiento durante 4 horas para llevar acabo el calentamiento del aceite.

Tanque de almacenamiento, aislado para el aceite que ha sido calentado y llevar acabo el proceso de transesterificación con ayuda de un agitador para la integración optima del las masas de los componentes en dicha reacción se llevo a producir biodiesel y el subproducto siendo este la glicerina.

El colector, para el que se describe el desarrollo, opera por circulación natural, es decir, la circulación del aceite entre colector y tanque, es producida por el principio de termosifón, presentado cuando, una masa de fluido es calentada, a través de los tubos de cobre en la base de un recipiente, es decir, el aceite al entrar al colector por luego sube por la parte superior hacia el tanque el aceite este es almacenado, lo cual disminuye su densidad debido al incremento de la temperatura, entonces, la columna de aceite frío en la tubería baja de retorno al colector y la columna de aceite caliente dentro del mismo sube, se desequilibran haciendo que por gravedad la primera baje y empuje el aceite caliente hacia el tanque. (Hurtado M, Alejandro 1994).

INTRODUCCION

Una gran variedad de combustibles pueden ser producidos a partir de la biomasa como son hidrogeno y biogás, bioetanol producido a partir de la hidrolisis de hemicelulosa y celulosa, y posterior fermentación de los azucares obtenidos, y biodiesel proveniente de aceites vegetales o grasas animales y pueden ser empleados sólo o en mezcla con diesel de petróleo, sin modificar la eficiencia del motor, (Demirbas, 2008).

En particular, el biodiesel se obtiene mediante: el uso directo del aceite y/o mezclado con diesel, micro emulsiones con etanol o metanol, pirolisis térmica y transesterificación. El método más utilizado para la producción de biodiesel es a través de la transesterificación de los aceites vegetales o grasas animales con alcoholes de cadena corta, siendo la transesterificación alcalina la más empleada debido a la amplia disposición del tipo de catalizador (hidróxido de potasio o sodio), sin embargo existen reacciones indeseables que pueden reducir el rendimiento global de la reacción (Singh y Singh, 2010; Zhang y col., 2003).

El uso de biodiesel ha demostrado tener beneficios al medio ambiente tales como, una mayor eficiencia de combustión, es biodegradable y más del 90% de éste puede ser biodegradado en un plazo de 21 días. Presenta un nulo contenido de

azufre y de compuestos aromáticos comparado con el combustible diesel y reduce la mayoría de las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y partículas.

Previamente se ha empleado para la producción de biodiesel materias primas como el girasol, cacahuate, soya, colza y maíz (Singh y Singh, 2010), aunque la viabilidad de emplear estos aceites como materia prima es cuestionable debido al conflicto con la producción de alimentos, de este modo se han investigado aceites residuales que además reducen los costos de producción (Singh y Singh, 2011).

Debido a lo anterior, se ha propuesto emplear aceite de origen vegetal tal como el aceite marca patrona como primera prueba para la obtención de biodiesel.

Por otro lado para determinar la calidad del biodiesel existe la Norma Europea 14214 dicho análisis se llevara acabo en el Polo Tecnológico Nacional para el Desarrollo de Investigación y pruebas Analíticas en Biocombustibles en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

CAPITULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Orígenes del Biodiesel.

La mayoría de necesidades energéticas del mundo son suplidas a través de recursos petroquímicos, carbón y gas natural, con excepción de energía hidroeléctrica y nuclear, siendo estos recursos de carácter no renovable y altamente contaminantes. El combustible diesel tiene función esencial en la economía industrial y es usado en el transporte para el bien de la agricultura y la industria. Una posible alternativa para este combustible es la utilización de aceites de origen vegetal para la obtención de bioésteres, donde se consigue que las moléculas grandes y ramificadas iniciales, de elevada viscosidad y alta proporción de carbono se transformen en otras de con menos viscosidad y carbono. (Moreno, et al. 2002; Ma F., et al, 1999).

La investigación de la reacción transesterificación data de 1846, cuando Rochieder describió la preparación de glicerol a través de la etanolisis del aceite de castor (Formo 1979; Ma F., et al 1999).

En 1893, Rudolf Diesel publicó un artículo que describe un motor de combustión dentro de un cilindro, el motor de combustión interna. En 1894, él solicitó una patente para su nuevo invento, conocido como el motor diesel. Rudolf Diesel fue casi asesinado por su motor cuando explotó. Sin embargo, su motor fue el primero que demostró que el combustible podría encenderse sin una chispa. Dirigió su

exitoso primer motor en 1897. En 1898, Rudolf Diesel obtuvo la patente # 608,845 por un "motor de combustión interna", el motor Diesel. La idea de utilizar productos vegetales proviene de Rudolf Diesel, quien utilizó aceite de maní para impulsar una de sus creaciones, el motor de combustión interna que lleva su nombre (Stratta 2002).

En 1980, Bartholomew, propuso el uso de los aceites vegetales como combustible competente con el petróleo. Darnoko y Munir (2000), produjeron metil ésteres por la transesterificación del aceite de palma con metanol en presencia de KOH, utilizando una temperatura de 60°C y concentración de catalizador de 1% obteniendo conversiones mayores al 90%. Foon y May (2004), realizaron un estudio cinético sobre la transesterificación de palma optimizando la relación de conversión a valores cercanos del 99%, optimizando las condiciones de operación. Gryglewicz (1999), utilizó metanol con aceites usados, con el propósito de evaluar catalizadores heterogéneos entre los que se utilizaron compuestos de calcio, sodio y bario; concluyó que los compuestos de calcio son menos activos que el hidróxido de sodio, sin embargo, observó que la utilización de solventes orgánicos como el tetrahidrofurano acelera los procesos de transesterificación. Saifuddin y Chua (2004), emplearon etanol para la producción de etil éster usando aceite de freír como materia prima; estos experimentos ayudaron a determinar que las condiciones óptimas con 0.5% de NaOH (disuelto en etanol) basado en el peso del aceite y 100% de exceso molar de etanol utilizando irradiación de microondas.

En la región, las investigaciones ejecutadas en la transesterificación de aceites han sido desarrolladas por Castaño y Torres (2004), que estudiaron la reacción de Transesterificación de los aceites de palma e higuierilla con etanol utilizando enzimas (lipasas) libres de *Candida rugosa* y *Pseudomonas fluorescens* como catalizador, empleando un tiempo de reacción de cinco horas. Benjumea y Agudelo (2004), optimizaron la obtención de biodiesel mediante la metanólisis básica del aceite crudo de palma, logrando una conversión del 98.36 % utilizando una relación molar etanol-aceite de 12 y una concentración de catalizador de 0.6 % a temperatura constante de 60°C. Moreno y Gutiérrez (2002), transesterificaron aceite de higuierilla con la metanólisis básica de NaOH a temperatura ambiente, utilizando 40% de metanol y 1.5% de catalizador obteniendo biocombustible con conversiones superiores al 90%.

1.2. PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA

1.2.1. Producción de biodiesel.

Actualmente existen diversos procesos industriales de producción de biodiésel, siendo los más difundidos la catálisis ácida, catálisis enzimática y catálisis alcalina, donde este último es uno de los métodos más atractivos desde el punto de vista industrial. La catálisis alcalina es el proceso industrialmente más desarrollado y empleado, puesto que los catalizadores empleados, como hidróxidos o carbonatos de sodio o potasio, son baratos, son menos corrosivos que los catalizadores ácidos y se alcanzan conversiones superiores al 99%; la cinética es relativamente rápida, no requiere equipos complicados y la separación de los productos es fácil de realizar.

Su desventaja consiste en la necesidad de tener ausencia total de agua, puesto que ésta induce una hidrólisis con formación de jabones y pérdidas de éster. (CORPODIB, 2003; Van Gerpen *et al.*, 2004; Vera *et al.*, 2005; Bunyakiat *et al.*, 2006; Van Kasteren y Nisworo, 2007; Marchetti *et al.*, 2007).

Sin embargo en el proceso de producción de biodiesel se necesita de energía eléctrica para el calentamiento del aceite y para el proceso de remoción de los componentes, es por eso que se propone el diseño, construcción, operación y evaluación de un reactor solar para independizar el sustento de comunidades de difícil acceso a la energía eléctrica, produciendo su propio biodiesel para satisfacer sus necesidades de la demanda energética.

1.2.2. Producción de biodiesel en México

En México se tiene muy poca experiencia con el uso del biodiésel, dentro de los proyectos de biodiésel destaca el de la planta de biodiésel de Grupo Energéticos en Cadereyta, Nuevo León que produce este biocombustible a partir de aceites y grasas recicladas de la cafetería del Instituto Tecnológico de Monterrey, la producción de ésta planta es de 300 m³ al mes, aunque según su directivo puede llegar a los 600 m³ al mes. Con esta producción se abastece de una mezcla B20 a un autobús de transporte de personal, así como a dos vehículos compactos propiedad del Instituto. Otro proyecto es el de la Universidad Vasconcelos de Oaxaca, en el que producen una mezcla B20 a partir de aceites vegetales de desecho, en la etapa demostrativa se tiene una producción de 3.6 m³ al mes de biodiésel el cual es consumido por un autobús propiedad de la Universidad. (Sener 2006).

1.2.3. Producción de aceite vegetal en México

Partiendo del entendimiento que la materia prima para obtener biodiesel es el aceite vegetal, México cuenta con un potencial enorme para la producción de biodiesel. Sin embargo, para el 2005 cerca del 85% del aceite de origen vegetal que se consumía en el país era importado. Entre los años del 2000 al 2005, la producción nacional de aceite de origen vegetal se mantuvo aproximadamente en el mismo nivel, a excepción del derivado de soya, el cual a partir del 2002 empezó a mostrar una

drástica disminución, como se puede observar en la tabla 1.1, integrada con datos del INEGI, (INEGI.2006), ver tabla 1.1.

Tabla 1.1. Producción nacional de aceites

Producción nacional de aceites Año	Aceite de Girasol (toneladas)	Aceite de Soya (toneladas)	Aceite de Nabo y/o Canola (toneladas)	Otros aceites comestibles (toneladas)
2000	226 332	318 827	137 311	427 890
2001	229 526	323 559	139 835	385 572
2002	190 064	300 953	132 557	419 730
2003	207 346	246 625	114 147	437 410
2004	226 027	206 530	144 495	432 544
2005	206 711	125 537	153 437	471 748

1.3. Situación de los Biocombustibles de 1ª y 2da Generación en América Latina y Caribe.

Los Biocombustibles de 1ra generación son producidos de azúcar, amida y aceites de una parte específica (frecuentemente comestible) de plantas tradicionales como caña de azúcar, trigo, maíz, palma aceitera y soya. Esos biocombustibles (etanol y biodiesel) ya son producidos y comercializados en cantidades significativas por diversos países, respondiendo actualmente por 1,5% del total de combustibles de transporte en el mundo. Su expansión, sin embargo, levanta algunas preocupaciones, principalmente en lo que se refiere al uso de la tierra. (Monteiro 2010).

Los Biocombustibles de 2da generación, también llamados biocombustibles celulósicos, son producidos de materias-primas no alimentares como residuos agroindustriales y gramíneas forrajeras de alta producción de biomasa.

Su producción es significativamente más compleja, si comparados a los de 1ra generación y todavía no son comercializados. Son clasificados según el proceso utilizado en la conversión de la biomasa: bioquímicos (producidos por hidrólisis enzimática, fermentación) y termoquímicos (producidos por pirolisis, gasificación y síntesis de Fischer-Tropsch).

1.3.1. Biocombustibles de 3ra Generación

Los Biocombustibles de 3ra generación son producidos a partir de la materia prima modificada genéticamente de modo que facilita los procesos subsecuentes.

Los agentes de conversión (microorganismos, algas) también son modificados genéticamente para que el proceso sea más eficiente.(Monteiro 2010).

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

- Diseñar, construir y operar un reactor solar, para la producción de Biodiesel a partir de aceite de cocina mediante un proceso termoquímico solar.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Diseñar el Reactor solar
- Construir el Reactor solar
- Evaluar el funcionamiento del Reactor solar
- Analizar las propiedades fisicoquímicas del biodiesel elaborado en el reactor solar bajo la Norma Europea 14214

1.5. HIPÓTESIS

Es posible obtener Biodiesel mediante un proceso termoquímico en un reactor solar.

1.6. JUSTIFICACIÓN

- ✓ Las ventaja del reactor solar contra del reactor eléctrico
- ✓ Ahorro de energía eléctrica en el proceso de calentamiento del aceite y en el proceso de producción del biodiesel.
- ✓ Las ventajas del Biodiesel con respecto al Diesel.

a) Ventajas socioeconómicas:

- Ahorro de combustibles agotables. En la medida en la que se sustituye el empleo de derivados del petróleo por biocombustibles de origen renovable.
- Independencia energética.

b). Ventajas Ambientales:

- El biodiesel es un combustible biodegradable, lo cual ayuda a minimizar el impacto en caso de derrame accidental, además de ser muy indicada su utilización en motores de lanchas y barcos
- El biodiesel tiene un 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.

1.7. CONCLUSIÓN

En este capítulo basándose a la investigación histórica del origen de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel desde 1846 a 1985 a servido para ir optimizando las formas de producción hasta hoy en la actualidad.

En la actualidad la situación de los biocombustibles se catalogan por 3 tipos de generaciones de los cuales los de 1ra generación son los producidos por azúcares, almidones, aceites y una parte específica de plantas tradicionales como caña de azúcar, trigo, maíz, palma aceitera y soya.

Los Biocombustibles de 2da generación, también llamados biocombustibles celulósicos, son producidos de materias-primas no alimentares como residuos agroindustriales y gramíneas forrajeras de alta producción de biomasa. Su producción es significativamente más compleja, si comparados a los de 1ra generación y todavía no son comercializados. Son clasificados según el proceso utilizado en la conversión de la biomasa.

Los Biocombustibles de 3ra generación son producidos a partir de la materia prima modificada genéticamente de modo que facilita los procesos subsecuentes.

En esta investigación se utilizara los de 1ra generación pues se utilizara aceite vegetal marca patrona solo para validar la eficiencia del reactor para producir biodiesel

CAPITULO. 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Biodiesel

El biodiesel es un combustible diesel alternativo producido por la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales , el cual se compone de alquil ésteres de ácidos grasos saturados e insaturados de cadena larga, la materia prima más empleada en su producción son los aceites vegetales (Dunn,2005).

El biodiesel tiene un gran potencial para su uso como combustible alternativo en los motores de encendido por compresión, es biodegradable y libre de azufre, contiene oxígeno en su molécula, por lo que su combustión es mas limpia con respecto a la gasolina y el diesel (Demirbas, 2008).

La ASTM (American Society for Testing and Material) define al biodiesel de la siguiente manera: **Biodiesel**, son ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales, y que se emplean en los motores de ignición por compresión (motores diesel). (Cárdenas et al 2007; García et al. 2006).

2.1.2. Obtención del Biodiesel

Los aceites vegetales usualmente contienen ácidos grasos libres, fosfolípidos, esteroides, agua y otras impurezas. A causa de esto, el aceite no puede ser usado como combustible directamente en el motor. Para solucionar estos problemas, el aceite requiere una modificación química principalmente por transesterificación, pirólisis o emulsificación. Entre ellas, la transesterificación es el proceso más importante para producir un combustible a partir de aceite vegetal, que sea limpio y no ocasione daños ambientales.

2.1.3. Aceites y Grasas

Las grasas y los aceites están compuestos de ésteres: monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos (siendo estos últimos los más comunes) y de ácidos de cadena larga, llamados ácidos grasos. (Cárdenas 2007).

La mayoría de los aceites y grasas son triglicéridos mixtos, pues tienen dos o tres ácidos grasos diferentes. La diferencia que existe entre los aceites y las grasas radica en los enlaces de los ácidos grasos presentes en la molécula. Las grasas tienen ácidos grasos en los que predominan los enlaces sencillos (saturados) y los aceites tienen ácidos grasos con varios enlaces dobles (insaturados), (Gerpen et al. 2006).

2.1.4. Aceites vegetales

Los aceites vegetales son las materias primas más empleadas para la producción de biodiesel, ya que son renovables y se pueden producir a gran escala. Dentro de los aceites vegetales para producción de biodiesel se encuentran los aceites comestibles y no comestibles. Más del 95% de materias primas para la producción de biodiesel provienen de aceites comestibles, ya que las propiedades del biodiesel producido a partir de estos aceites son mucho más cercanas a las del diesel, por lo cual puede ser empleado como combustible. Sin embargo tiene desventajas, tales como la competencia con el mercado de aceites comestibles, lo que aumenta tanto el costo de estos aceites y el biodiesel, además de la deforestación para cultivo masivo (leung y col., 2010).

Los aceites vegetales contienen ácidos grasos, ácidos grasos libres (generalmente de 1-5%), fosfolípidos, fosfátidos, carotenos, tocoferoles y rastros de agua. Los ácidos grasos, que se encuentran comúnmente en los aceites vegetales son esteárico, oleico, palmítico, linoleico y linolénico, (ver tabla 2.1).

Tabla 2.1. Perfil de ácidos grasos de aceites vegetales (Singh y col., 2010).

Aceite vegetal	Composición de ácidos grasos														
	12:0	14:0	14:1	16:0	16:1	18:0	20:0	20:1	22:0	24:0	18:1	22:1	18:2	18:3	18:4
Girasol				6.4	0.1	2,9					17.7		72.9		
palma				42.6	0.3	4.4					40.5		10.1		
Maíz			0	12		2			0	0	25	0	6		
soya				13.9	0.3	2.1					23.2		56.2	4.3	0
coco	48.8	19.9		7.8	0.1	3.0					4.4		0.8	0	65.7
oliva				5.0	0.3	1.6					74.7		17.6	0	0.8
Algodón				28.7		0.9					13.0		57.4		
Tabaco		0.09		10.9	0.2	3.34					14.5		69.4	0.69	
Mahua				16.0		20.0	0.0				41.0		8.9		
				28.2		25.1	3.3				51.0		13.7		
cacahu ate		0		11		2	1		2	1	48	0	32	1	

2.1.5. Esteres.

Un grupo de ester es una unión entre un ácido carboxílico y un grupo de alcoholes. La glicerina (o glicerol) es una molécula pequeña de tres carbonos con tres grupos de alcoholes, cada uno añadido a cada átomo de carbón. (Bornstein 2008).

2.1.6. Acido Graso

Un ácido graso es un ácido carboxílico añadido a una larga hilera de carbonos. Hay muchos ácidos diferentes, cada uno nombrado de acuerdo a la longitud de la hilera de carbonos y el número de uniones dobles presentes (también llamado el grado de insaturación). Estas uniones están representados por números separados por dos puntos. El primer número es la longitud de la hilera, el segundo es el grado de insaturación. He aquí algunos ácidos grasos comunes, su notación y fórmula molecular, ver tabla 2.2. (Bornstein 2008).

Tabla 2.2. Ácidos grasos, notación y fórmula molecular.

Nombre del ácido	Notación	Fórmula molecular
Ácido laurico	C12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂
Ácido mirístico	C14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂
Ácido palmítico	C16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
Ácido esteárico	C18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
Ácido oleico	C18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
Ácido linoleico	C18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
Ácido arachídico	C20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂
Ácido behénico	C22:0	C ₂₂ H ₄₄ O ₂
Ácido erueico	C22:1	C ₂₂ H ₄₂ O ₂

Cada molécula de aceite, o cualquier forma de grasa, consiste de una molécula de glicerina añadida a tres ácidos grasos por medio de un grupo de esteres, llamado un triglicérido. Muchas veces se pueden encontrar moléculas de glicerina pegadas a solo uno o dos ácidos grasos, estos son llamados monoglicéridos y diglicéridos, respectivamente. También existen ácidos grasos que no están pegados a una molécula de glicerina, a estos se les llama ácidos grasos libres (FFA por sus siglas en ingles). Las grasas están compuestas de varios tipos de ácidos grasos y el numero FFA de sus cálculos dependerá del tipo de aceite que este usando. Por ejemplo, la palma Africana contiene ácido palméico mientras que el aceite de soya tiene acido oléico, (Bornstein 2008).

2.1.7. Composición del Biodiesel.

El biodiesel está compuesto de esteres de metilesters o etilesters.

Existen combinaciones de una sola molécula de ácido graso combinada con una molécula de alcohol, como el metanol (formando esters metilicos) o etanol (produciendo esters etilicos) El alcohol y el ácido graso están conectados vía una unión de esteres, (Bornstein 2008).

2.1.8. La reacción del biodiesel

Ocurre cuando el alcohol pequeño, metanol o etanol, reemplaza a uno de los grupos de alcoholes en la unión de esteres en la glicerina, convirtiendo un triglicérido en un diglicérido y una molécula de biodiesel. Este tipo de reacción, donde un alcohol reemplaza a otro en un ester se llama transesterificación. La reacción continua a reemplazar cada uno de los grupos alcoholes convirtiendo cada molécula de grasa en tres de biodiesel y una de glicerina. Por ejemplo, si un aceite esta compuesto de completamente de acido esteárico (C18:0, peso molecular 248.54 g/mol), y triglicéridos, 1kg de aceite reaccionara completamente con 122.7g de metanol para formar 1005.2g de biodiesel. En realidad, la reacción nunca es perfecta, la mayoría de la gente usa metanol extra para incrementar el producto de la reacción (Bornstein 2008).

Bajo condiciones normales, esta reacción ocurre muy despacio. Para dar paso a una reacción más rápida, se ocupa calor y un catalizador. La reacción puede ser catalizada por un ácido o una base, pero uno puede alcanzar una reacción mucho más rápida usando una base. El método mas común usa el hidróxido de sodio (NaOH peso molecular 40.0 g/mol) o el hidróxido de potasio (KOH, peso molecular 56.11 g/mol). Cantidades equivalentes de base pueden ser encontradas al multiplicar las proporciones de pesos moleculares (Bornstein 2008).

Al emplear a los aceites vegetales como combustible para motor, el rendimiento de este disminuye y las emisiones de monóxido de carbono, óxido nitroso e

hidrocarburos incrementan. La ventaja más importante de los aceites vegetales es que son fuentes de energía renovables en comparación con los limitados recursos de petróleo (Altin y col, 2001).

2.1.9. Transesterificación

A través del proceso de transesterificación de los aceites vegetales y su reacción con un alcohol (normalmente, metanol), se obtienen los ésteres metílicos derivados, que son compuestos oxigenados con características similares en su comportamiento a las del diesel, principalmente en lo referente a la viscosidad, temperatura de ebullición, residuo carbonoso, número de cetano, etcétera, (Cárdenas 2006).

Transesterificación o alcoholisis, es el desplazamiento del grupo alcoxi (grupo alquilo unido a un átomo de oxígeno, RO_x donde R es el grupo alquilo) de un tipo de éster por otro alcohol, en un proceso similar a la hidrólisis, excepto, que el alcohol es usado en lugar de agua. La reacción de transesterificación está representada por la ecuación general de la figura 2.1 (Mecher et al 2004).

Representación esquemática de la transesterificación.

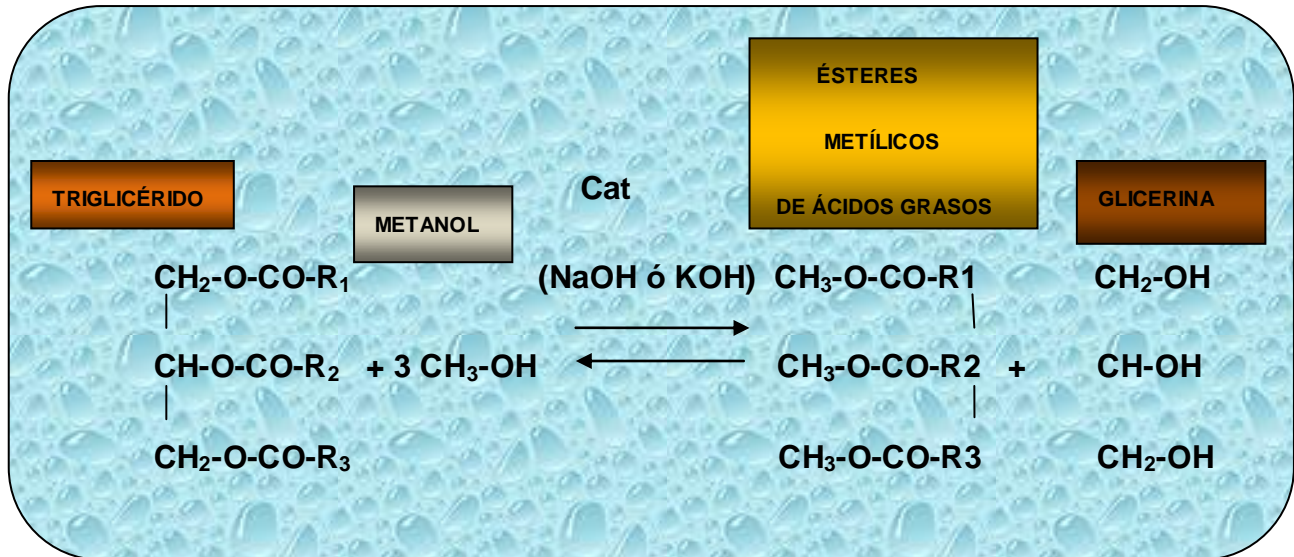


Figura 2 1 .Representación esquemática de la reacción de transesterificación de aceites vegetales con metanol para producir ésteres metílicos de ácidos grasos y glicerina.

2.2. La Química del Biodiesel

La reacción de transesterificación químicamente consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado, ver figura 2.2. (García et al García 2006).

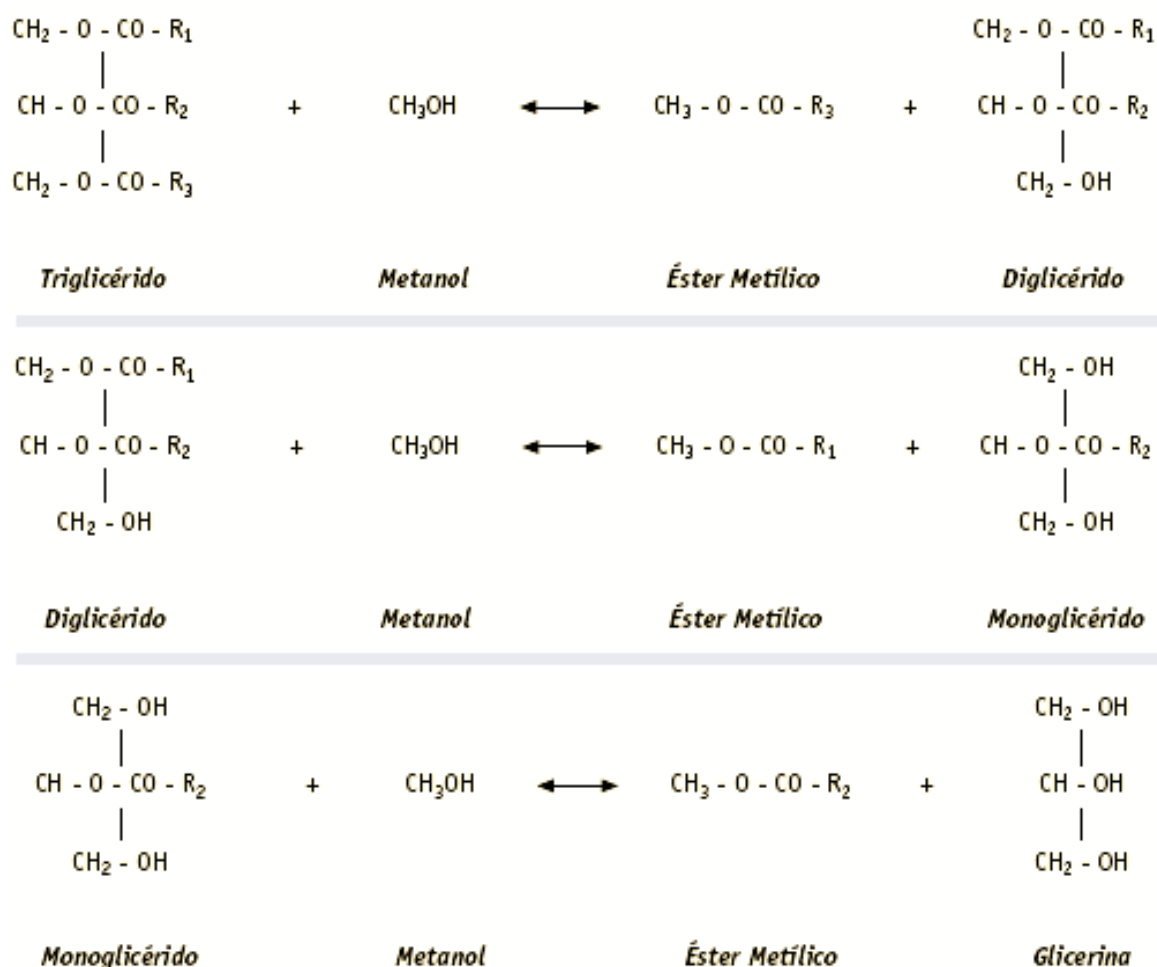


Figura 2.2. Reacciones presentes en la reacción de la transesterificación.

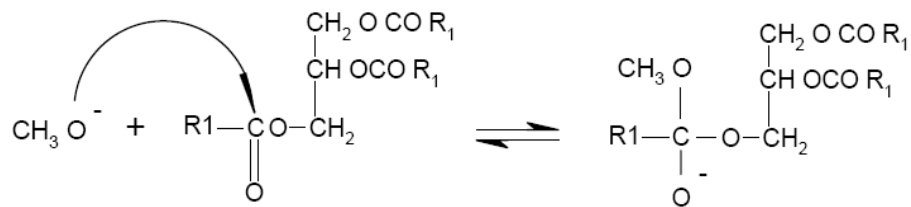
2.3. Reacciones presentes en la reacción de la transesterificación

La descomposición de los triglicéridos en diglicéridos y así sucesivamente, ocurre en 4 pasos, los cuales se describen a continuación, para una transesterificación usando metanol, (Larosa 2006).

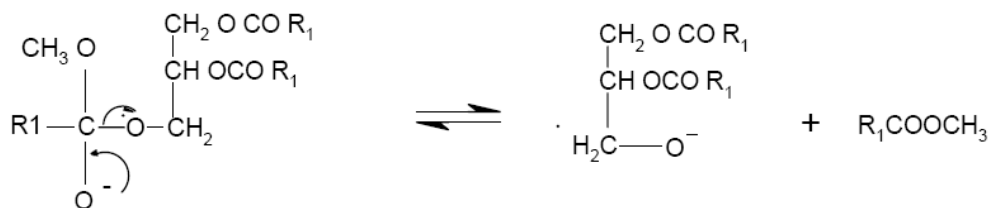
a) El alcohol (CH_3OH) reacciona con el catalizador básico (X).



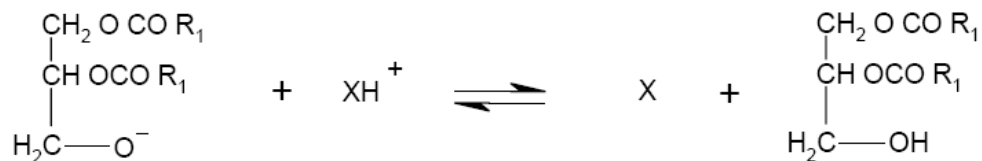
b) El radical cargado negativamente (CH_3O^-) reacciona con el doble enlace del grupo carbonilo del triglicérido.



c) Se forma una molécula del éster alquílico ($R_1\text{COOCH}_3$), en éste caso, se trata del metiléster (biodiesel).



d) Se regenera el catalizador formándose un diglicérido. Los pasos a) al d) se repiten hasta la desaparición del triglicérido con la formación del monoalquiléster (biodiesel) y glicerina como productos finales.



2.4. Uso del biodiesel

El uso de biodiesel en motores de combustión por compresión está totalmente extendido en Europa desde los últimos 10-12 años. Países como Alemania y Austria utilizan biodiesel ya sea al 100% (B100) ó mediante una mezcla del 2% al 30% (B2 – B30) de biodiesel y el resto de diesel. La razón de realizar una mezcla con el diesel convencional, radica en que los aceites vegetales tienen, entre otras cosas, la particularidad de disolver la goma y el caucho. Debido a que estos aceites vegetales son la materia prima para la fabricación del biodiesel, dicho producto también disuelve la goma y el caucho, materiales empleados en la fabricación de los conductos y las juntas del sistema de alimentación de los motores por lo que con el uso prolongado de biodiesel B100, se podrían llegar a degradar dichos conductos.

Desde mediados de los años 90, casi todos los fabricantes de motores (principalmente marcas alemanas), han substituido dichos conductos por otros fabricados con materiales plásticos o derivados, con lo que el biodiesel no los disuelve (Cárdenas 2007, García et al 2006).

En España se hace uso de una mezcla de 10% de biodiesel y 90% de diesel. Otros productores de la Unión Europea, y debido a su política comercial, venden toda su producción de biodiesel a una empresa petrolera, la cual opta por la mezcla de un máximo de 5% de biodiesel y el resto de diesel. De esta forma se considera al biodiesel como un aditivo porque no altera las características técnicas del diesel según la norma EN590. Si se incorpora más de un 5%, la mezcla final no cumple la

norma EN590, por lo que tendrían que informar y etiquetar dicho producto con un nombre diferente al de “Diesel” (Cárdenas 2007).

2.5. Especificaciones del Biodiesel

Austria fue el primer país en el mundo en disponer de una norma para producir biodiesel (Meher et al 2004). Diversos países emitieron sus normas, entre ellos Alemania, Italia, Francia, República Checa, Estados Unidos y Argentina.

Una de las normas que más fue aceptada a nivel mundial fue la D-6751 propuesta por la ASTM en 1999. Sin embargo en el 2003, la Unión Europea definió la norma europea EN14214, imponiendo restricciones más fuertes en la calidad del biodiesel, ver tabla 2.3. (García et al 2006).

Tabla 2.3. Especificaciones del biodiesel de la Norma EN14214 (García 2006, et al; Querini 2007).

ENSAYO	UNIDADES	LÍMITES		NORMA DE ENSAYO
		Mínimo	Máximo	
Contenido en éster	% (m/m)	96,5		prEN 14103
Densidad a 15°C	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120		ISO 3679
Contenido en azufre	mg/kg		10,0	prEN20846
Residuo carbonoso	% (m/m)		0,30	EN ISO 10370
Número de Cetano		51,0		EN ISO 5165
Contenido en cenizas de sulfatos	% (m/m)		0,02	ISO 3987
Contenido en agua	mg/kg		500	EN ISO 12937
Contaminación total	mg/kg		24	EN 12662
Corrosión en lámina de cobre	Clasificación		Clase 1	EN ISO 2160
Estabilidad a la Oxidación	horas	6,0		prEN 14112
Valor ácido	mg KOH/g muestra		0,50	prEN 14104
Índice de yodo	g I/100g muestra		120	prEN 14111
Metiléster linolénico	% (m/m)		12,0	prEN 14103
Metiléster poliinsaturados	% (m/m)		1	
Contenido en metanol	% (m/m)		0,20	prEN 14110
Contenido en monoglicéridos	% (m/m)		0,80	prEN 14105
Contenido en diglicéridos	% (m/m)		0,20	prEN 14105
Contenido en triglicéridos	% (m/m)		0,20	prEN 14105
Glicerina libre	% (m/m)		0,02	prEN 14105
Glicerina total	% (m/m)		0,25	prEN 14105
Metales grupo I (Na+K)	mg/kg		5,0	prEN 14108/14109
Metales grupo II (Ca+Mg)	mg/kg		5,0	prEN 14538
Contenido en fósforo	mg/kg		10,0	prEN 14107
POFF	°C		Según época y país	EN 116

2.6. El Colector plano.

Como lo indica el nombre, éste tipo de colector tiene forma plana y funciona con base en la absorción de la radiación solar. Tienen la ventaja de que pueden utilizar la radiación solar difusa (reflejada a través de las nubes), aparte de la radiación directa. Un colector plano puede dar temperaturas entre 65-90°C con una eficiencia promedio 40-60%., (ver figura 2.3), (Nadwani, 2006).

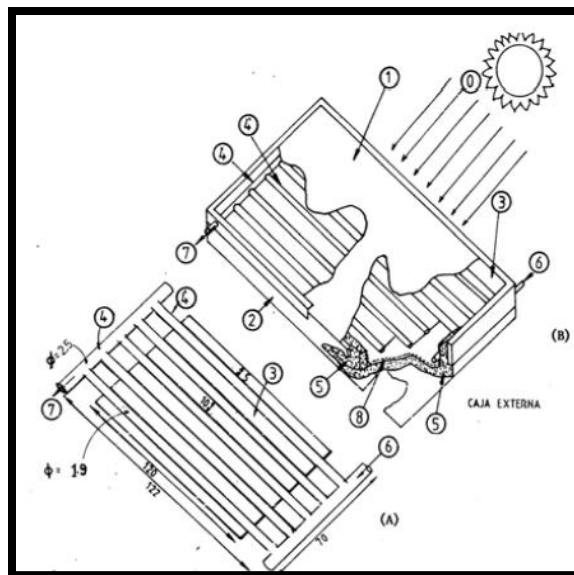


Figura 2.3. Componentes principales de una lamina absorbidora (A) y de un colector plano (B); 0-Rayos solares, 1- colector, 2-caja exterior, 3-Lámina metálica (Pintada negro mate), 4-Dos tubos horizontales, 4-Tubos para circular el fluido, 5-Aislante térmico, 6-7.-Entrada y salida del fluido, 8 Papel aluminio (Nadwani 2006).

Para reducir las pérdidas de energía por la parte superior, Principalmente por la convección y la radiación, la fachada del colector está cubierta con una (o más) lámina de vidrio transparente de espesor 3 mm (o de plástico transparente- tipo Telar o lamina de fibra del vidrio o plexiglás o acrílico de 1-2 mm) y con una distancia de 5-8 cm entre lámina metálica Y el cobertor, permitiendo que penetre la luz solar pero evitando el escape de la radiación infrarroja de la placa. El calor neto absorbido por la placa es transferido a cinco tubos verticales (por los que circulará el agua) también de hierro galvanizado, con una separación de 10 cm entre los tubos. Los cinco tubos de diámetro de 1.90 cm, se unen estrechamente (soldados) a lo largo de la placa y son conectado a dos tubos de hierro galvanizados de diámetro de 2.5 cm, puesto horizontales de manera que el agua fría entre por la parte baja y salga, una vez caliente, por la parte superior, debido a su menor densidad.

Con el fin de aprovechar al máximo la radiación solar un mayor período durante el año, en los países Centroamericanos, (con una latitud de 10-15° N), este colector debe colocarse con una inclinación de 15-20° respecto a la horizontal y hacia al Sur, (Nadwani, 2006)

2.7. Tipos de colectores planos

En general existen dos tipos de calentadores solares de agua. En uno la captación de la energía solar y almacenamiento de energía calórica (en forma de agua caliente) se hace en la misma unidad, (sistemas integrados, figura 2.4).

Los calentadores del otro tipo tienen separados los sistemas de captación de la energía solar y almacenamiento de agua caliente (Sistema con circulación, figura. 2.5).

En el calentador de agua más simple, la captación y almacenamiento están juntos (Figura.2.5). Este sistema es compacto y sencillo, pero su rendimiento es bajo. Debido a que durante la noche y el periodo de nubosidad (cuando el sol es insuficiente para aumentar la temperatura del agua en el recipiente), la superficie de vidrio se convierte en una gran fuente de pérdidas. Para reducir esta pérdida, es necesario cubrirla con un protector aislante cuando se estima que el sol no aporta suficiente energía,(Nadwani, 2006).

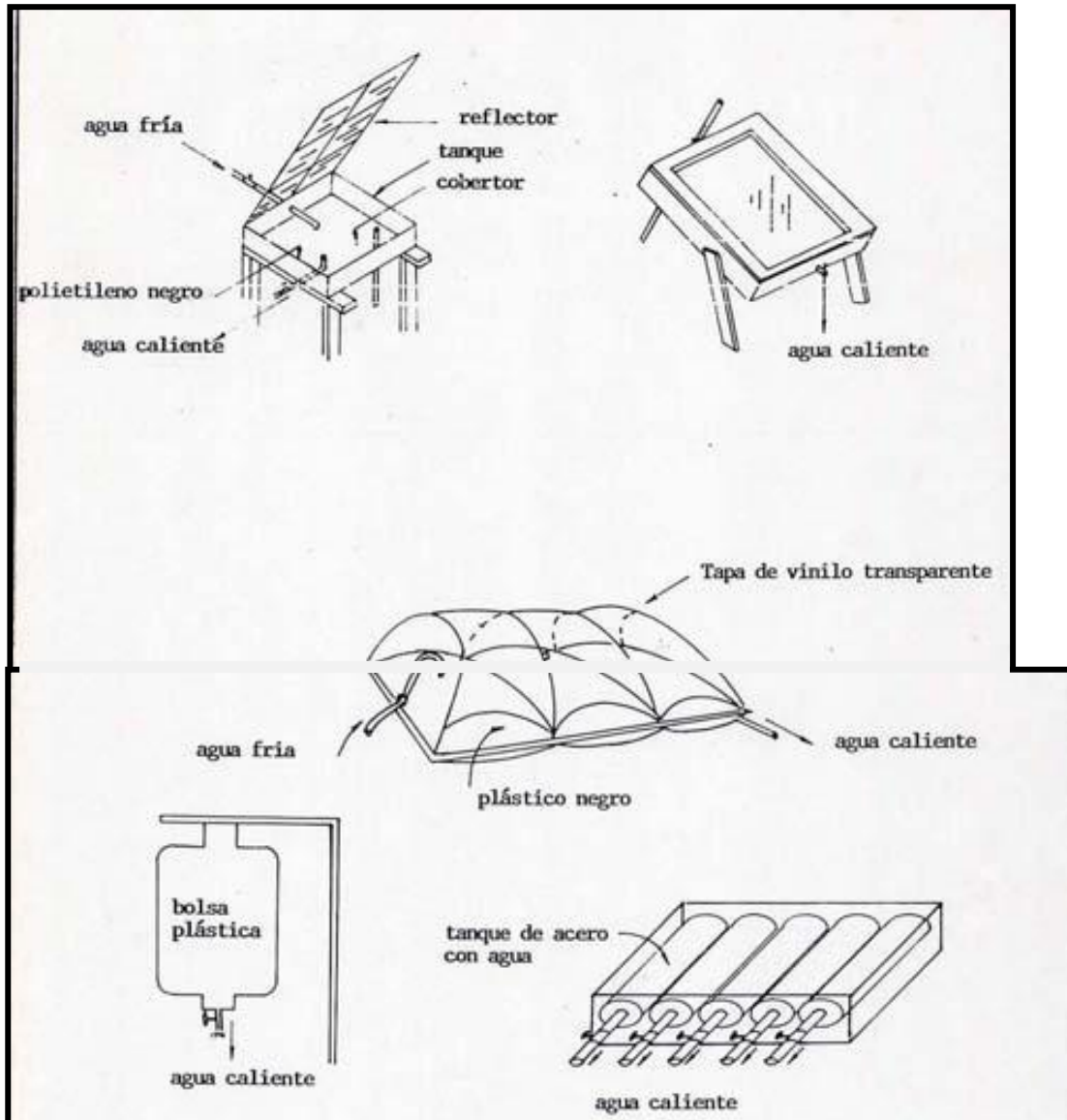


Figura 2.4. Calentadores solares de agua, Sistemas integrados, (Nadwani, 2006).

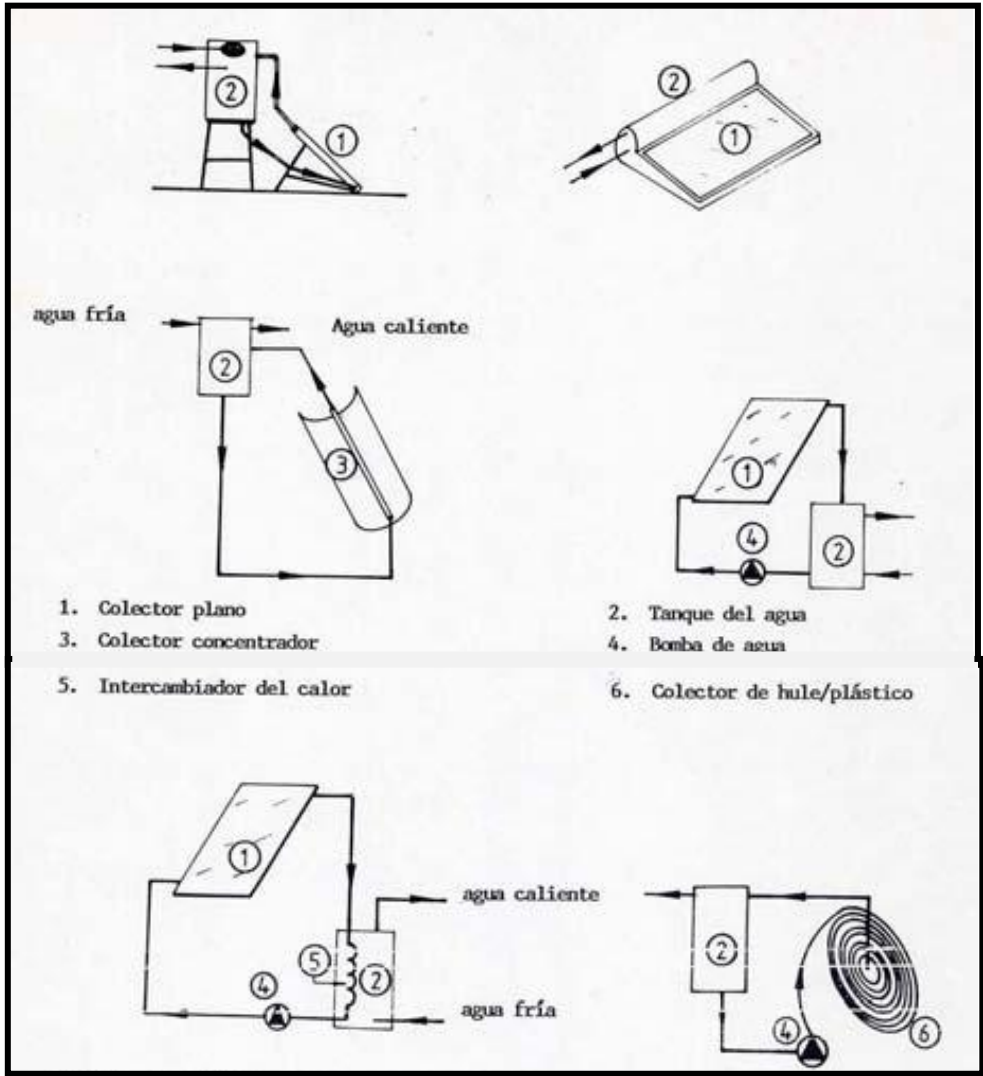


Figura 2.5 Calentadores de agua – sistemas con circulación de fluido, Nadwani, 2006.

2.8. Algunos Calentadores Solares (tipo circulación natural, termosifón).

En la figura 2.6, tanque para 60 litros, en las figuras 2.7 y 2.8 el tanque sobre el suelo es un tanque auxiliar (eléctrico), (Nadwani 2006).



Figura 2.6 tanque para 60 litros

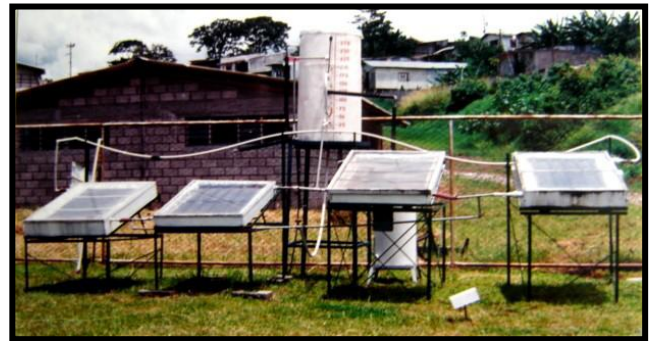


Figura 2.7. Cuatro colectores solares

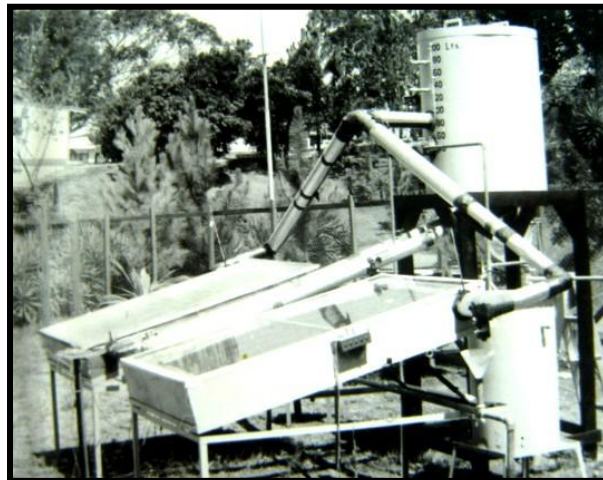


Figura 2.8. Dos colectores solares y tanque auxiliar eléctrico, (Nadwani 2006).

2.9. Termosifón.

Cuando el aceite dentro de los tubos se calienta, se vuelve más "liviano" (o menos denso) que el aceite más frío que está en el estanque y literalmente flota –se mueve hacia arriba-. Así, el agua aceite sube hasta la parte alta del estanque y el aceite frío del fondo del estanque vuelve a llenarlo. La circulación de aceite que se establece se llama **termosifón**, y es una forma de convección, (ver figura 2.9)

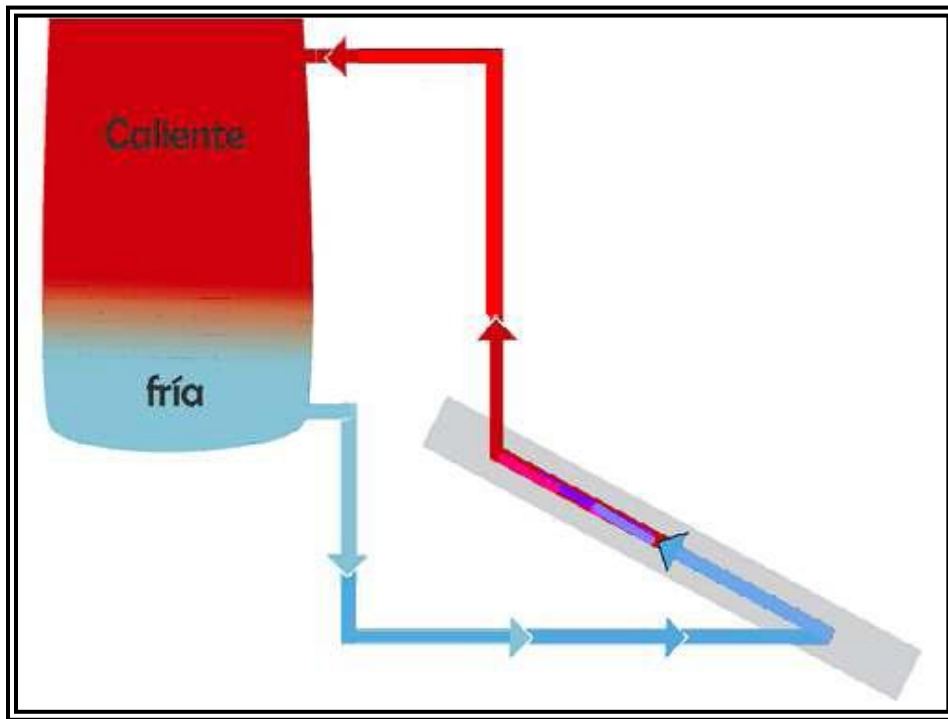


Figura 2.9. Sistema de circulación por Termosifón. **La convección** es la transferencia de calor que resulta del efecto combinado entre la conducción y la presencia de un fluido en movimiento.

2.10. CONCLUSION

En este capítulo trata sobre el biodiesel que es un combustible alternativo del diesel producido a partir de los aceites vegetales, el biodiesel es biodegradable y libre de azufre, siendo más limpia la combustión al contener oxígeno en su molécula con respecto a la gasolina y el diesel.

En el 2003 la Unión Europea definió la norma europea EN14214 imponiendo restricciones más fuertes en la calidad del biodiesel.

CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de la investigación.

La investigación se desarrolló en el laboratorio de Fisicoquímica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, ubicado en la carretera panamericana kilometro 1080 cp. 29050 y en la Unicach en el centro de investigación y desarrollo tecnológico en energías renovables, donde se diseño, se construyo, se evaluó y se opero el reactor para producir biodiesel. Ubicado en el libramiento norte poniente numero 1150.

3.2. Materiales

En la obtención del biodiesel se requieren de 3 reactivos:

- ✓ Aceite vegetal, Patrona.
- ✓ Metanol A.C.S. Fermont. 99.8%
- ✓ Soda Caústica en escamas grado industrial. IKISCAM.

3.2.1. Aceite vegetal

La materia prima empleada es el aceite vegetal sin usar procedente de plantas oleaginosas. En la experimentación realizada se utilizaron aceite comestible, el cual es una mezcla de aceite de maíz, girasol, colza, cártamo

3.2.2. Metanol

Para producir biodiesel, el alcohol es el que reacciona con el aceite, separando los ésteres del glicerol. El alcohol comúnmente más usado en la obtención de biodiesel es el metanol, aunque otros alcoholes, tales como etanol, isopropanol y butil pueden ser empleados. Un factor de calidad clave para elegir el alcohol es el contenido de agua. El agua interfiere con la reacción de transesterificación y puede resultar en una pobre conversión y altos niveles de jabón, ácidos grasos libres y triglicéridos en el combustible final. Desafortunadamente los alcoholes más puros son más costosos (J.Van Gerpen et al 2006). Sin embargo, el metanol, que no forma azeótropos con el agua, puede tener un precio bajo y cumplir con un bajo contenido de agua también. Una **mezcla azeotrópica** tiene la propiedad de que los componentes no pueden separarse por destilación fraccionada a presión común. Un ejemplo lo constituye la mezcla al 69 % p/p de acetato de etilo y etanol, cuyo vapor tiene la misma composición que la solución original, es decir que hierve como si se tratara de una sola sustancia.

Características como el costo del alcohol, la cantidad necesaria para la reacción, la facilidad de recuperarlo y reciclarlo, entre otras, intervienen de manera determinante en la elección del alcohol. Algunos alcoholes también requieren ligeras modificaciones técnicas en el proceso de obtención de biodiesel, por ejemplo temperaturas de operación más elevadas, tiempos de agitación más prolongados o velocidades de agitación más bajas.

El proceso de transesterificación para producir biodiesel, dependiendo del alcohol usado, se le puede nombrar de manera diferente. Haciendo uso de metanol se le conoce como *metanólisis*, en el caso del etanol, es conocido como *etanólisis*. De la misma forma el resultado de la reacción de transesterificación puede llamarse éster metílico, si metanol es usado, o bien éster etílico si se utiliza etanol (Meher 2004).

La formación de éster etílico comparativamente es más difícil que la de éster metílico, especialmente la formación de una emulsión estable durante la etanólisis es un problema. El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para que haya un mayor contacto entre las moléculas reaccionantes. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, en la metanólisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol, quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. En cambio en la etanólisis esta emulsión no es estable y complica mucho la separación y purificación de los ésteres etílicos. La emulsión está causada en parte por la formación de monoglicéridos y diglicéridos intermedios, que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares (García 2006).

3.2.3. Relación de Metanol/aceite

Una de las variables más importantes que afectan al rendimiento del proceso es la relación molar del alcohol y los triglicéridos. La relación estequiométrica requiere tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de ésteres y un mol de glicerol (Meher 2004, García 2010).

La transesterificación es una reacción de equilibrio que necesita un exceso de alcohol para desplazar la reacción al lado derecho. Para una conversión máxima se debe utilizar una relación molar de 6:1. En cambio un valor alto de relación molar de alcohol afecta a la separación de glicerina debido al incremento de su solubilidad, lo cual no es conveniente ya que si la glicerina se mantiene en solución, el equilibrio de la reacción tiende a desplazarse hacia la izquierda, disminuyendo con ello el rendimiento (García 2006 , Van Gerpen 2006).

Consultando diversas fuentes de información bibliográfica, se encontró que para el uso de metanol en la producción de biodiesel se requiere de un 20% del volumen de aceite a usar. En relación al etanol, este se emplea en un 30% del volumen de aceite (Villegas 2006, Meher 2004, Van Gerpen 2006, Joshua Tickell 2003).

3.2.4 Soda Caústica

Los catalizadores son empleados en la transesterificación para iniciar con la reacción y en aumentar la cinética de la reacción. Los catalizadores usados para la transesterificación de los triglicéridos se pueden clasificar en alcalinos, ácidos, enzimáticos o catalizadores heterogéneos, siendo los básicos homogéneos y en particular los hidróxidos los más utilizados (García 2006, Van Gerpen 2006).

Catalizadores homogéneos básicos, NaOH y KOH, son recomendados esencialmente para aceites vegetales sin usar, debido a que el contenido de agua y de ácidos grasos libres son generalmente bajo. Si el aceite presenta altos porcentajes de ácidos grasos libres, el uso de catalizadores básicos durante el proceso de transesterificación originaría la formación de jabón y agua (García 2006).

La cantidad de sosa cáustica necesaria para que se produzca la reacción de transesterificación, según reportes de experimentos realizados, es de 0.35% del volumen de aceite. Por su parte, la cantidad de KOH es de 0.9% del volumen de aceite. Sin embargo, en la experimentación se notó que las cantidades mínimas necesarias fueron distintas (Villegas 2006, Meher 2004, Van Gerpen 2006, Joshua Tickell 2003).

3.3 Propiedades de los reactivos empleados

3.3.1. Propiedades de la sosa caustica utilizada

Sosa cáustica de grado técnico se manejó en todos los experimentos que se empleó esta como catalizador. La presentación de la sosa es en escamas y sus propiedades son:

Hidróxido de sodio (NaOH).....	50.47%
Hidrógeno (H).....	2.52%
Oxígeno (O).....	40.0%
Densidad a 25 °C.....	2.13 g/ml
Punto de ebullición.....	1388 °C
Punto de fusión.....	318.4 °C
Peso molecular.....	4.01 g/mol

3.3.2. Metanol

El Metanol usado en la experimentación de producción de biodiesel, presentaba las características que a continuación se enlistan.

CH₃OH P. M. 32.04

CAS : 67-56-1 d = 0.79 g/ml

Peligro a la Salud : Severo

Inflamabilidad : Severa

Reactividad : Ligera

Peligro al Contacto : Ligero

UN : 1230 Clase : 3

NFPA : 1-3-0 P. Inflam. : 11°C

Color de Almacenaje : Rojo

Especificaciones

Contenido (CH₃OH) mín. 99.8%
Apariencia Clara

Máximos Permitidos

Color (APHA) 10
Agua (H₂O) 0.08%
Residuo después de Evaporación 0.001%
Solubilidad en Agua Pasa Prueba
Compuestos con Carbonilos 0.001%
Acido Titulable 0.0003 meq/g
Base Titulable 0.0002 meq/g
Substancias Obscurecidas por H₂SO₄ . . Pasa Prueba
Substancias Reductoras de KMnO₄ Pasa Prueba
Metales Pesados (Pb) 0.5 ppm
Cobre (Cu) 0.1 ppm
Hierro (Fe) 0.1 ppm
Magnesio (Mg) 0.1 ppm
Níquel (Ni) 0.1 ppm

3.4. DISEÑO DEL SISTEMA.

- Establecer la producción (50 litros al día)
- Radiación solar diaria (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas).
- Materiales de elaboración (termo tanque/colector solar).
- Horas de trabajo (4 horas).

3.4.1 DIMENSIONAMIENTO.

3.4.2. Calculo del dimensionamiento de un Reactor Solar para la producción de Biodiesel.

Para realizar el dimensionamiento de un reactor, se plantea como principio la ecuación de Calor útil de un sistema de calefacción solar basado en la eficiencia que se pretende obtener del mismo:

$$Q_u = A_c H_T \eta_c$$

Donde Q_u es el Calor útil del colector solar en kW, A_c es el área de captación del Colector en m^2 , H_T es la radiación incidente del lugar durante el día en kW/m^2 y la η_c es el porcentaje de eficiencia que se pretende alcanzar.

El calor útil se considera como la suma del calor necesario para calentar el aceite (Q_{ac}) y las pérdidas de calor que hay a través de la base, tapa y paredes del tanque del reactor (Q_T), esto es:

$$Q_u = Q_{ac} + Q_T$$

El calor necesario para calentar el aceite se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{ac} = mC_p\Delta T$$

Donde m es la masa medida en Kg, Cp es el calor específico del aceite dada en KJ/kg°C y ΔT es la diferencia de temperatura inicial y final del aceite.

Y para calcular la transferencia de calor en el tanque se usa la siguiente expresión:

$$Q_T = kA_T\Delta T$$

K es el coeficiente global de transferencia de calor por conducción a través de un material medida en kcal/m² °C, A_T es el área total de las paredes, tapa y base del tanque del reactor, y ΔT es la diferencia de temperatura entre el interior del tanque (que es la misma que la del aceite) y el exterior (que es la temperatura media del ambiente).

3.4.3. TAMAÑO DEL TERMO TANQUE.

3.4.4. Calculo de la perdida de calor en el tanque del reactor

El reactor tendrá la capacidad de producción de 50 litros de biodiesel al día, por lo que el volumen (V₁) mínimo interior del tanque se propone sea de 60 litros (con una holgura de 10 litros), lo que es equivalente a 0.06 m³. Se propone una altura (h) de 68 cm, por lo que el diámetro (D=2r) del cilindro será:

$$r = \sqrt{V_1/\pi h} = \sqrt{(0.06 \text{ m}^3)/\pi(0.6 \text{ m})} = \sqrt{0.032 \text{ m}^2} = 0.18 \text{ m}$$

Como el diámetro es el doble del radio, el diámetro equivale a 0.36 m.

Debido a que se eligió aislante de tipo polietileno expandido (con coeficiente de 0.037 kCal/m°C), se propone un espesor de 9 cm para la pared y 4 cm para tapa y base (según fabricante), por lo que el diámetro total del tanque es de 0.54 m, es decir 0.27 m de radio y la nueva altura igual a 0.68m.

Por tanto el área de la tapa y la base será de:

$$A_b = \pi r^2 = \pi (0.27 \text{ m})^2 = \pi (0.0729) = 0.229 \text{ m}^2$$

Como la base y la tapa son de la misma medida:

$$A_t = A_b = 0.229 \text{ m}^2$$

Entonces el área de la pared del tanque es:

$$A_p = \pi D h = \pi (0.54 \text{ m})(0.68 \text{ m}) = 1.15 \text{ m}^2$$

Por lo tanto el área total de transferencia de calor es:

$$A_T = A_b + A_t + A_p = (0.229 \text{ m}^2) + (0.229 \text{ m}^2) + (1.15 \text{ m}^2) = 1.61 \text{ m}^2$$

Ahora calculamos el coeficiente global de transferencia de calor (k):

Para la base y la tapa es:

$$k = \lambda/e = (0.037 \text{ kCal}/\text{m}^\circ\text{C})/0.04 \text{ m} = 0.925 \text{ kCal}/\text{m}^2^\circ\text{C}$$

Y para la pared es:

$$k = \lambda/e = (0.037 \text{ kCal}/\text{m}^\circ\text{C})/0.09 \text{ m} = 0.41 \text{ kCal}/\text{m}^2^\circ\text{C}$$

Por lo tanto la transferencia de calor a través de las paredes, tapa y base del tanque del reactor, considerando la temperatura del aceite igual a 55 °C y la del ambiente igual a 30 °C, es:

En la pared:

$$Q_p = k_p A_p \Delta T = (0.41 \text{ kCal}/\text{m}^2^\circ\text{C}) (1.15 \text{ m}^2) (25 \text{ }^\circ\text{C}) = 11.8 \text{ kCal}$$

$$Q_t = k_t A_t \Delta T = (0.925 \text{ kCal}/\text{m}^2^\circ\text{C}) (0.229 \text{ m}^2) (25 \text{ }^\circ\text{C}) = 5.3 \text{ kCal}$$

$$Q_b = Q_t = 5.3 \text{ kCal}$$

$$Q_T = Q_b + Q_t + Q_p = 11.8 \text{ kCal} + 5.3 \text{ kCal} + 5.3 \text{ kCal} = 22.4 \text{ kCal}$$

Por conveniencia, debido a que la radiación solar se expresa en Watts, convertimos el valor de la pérdida de calor calculada del siguiente modo:

$$Q_T = (22.4 \text{ kCal}) \left(\frac{4.186 \text{ J}}{1 \text{ Cal}} \right) = 93.8 \text{ kJ}$$

Como analizamos el flujo de calor que hay a través del material, dividimos entre 3600 segundos que hay en cada hora y posteriormente multiplicamos por las horas de trabajo del reactor, que en este caso son 4 horas, con ello tenemos que:

$$Q_T = (93.8 \text{ kJ}) \left(4 \text{ hrs} / 3600 \text{ s} \right) = 0.1042 \text{ kW por carga o lote.}$$

3.4.5. FUENTE DE ENERGÍA.

3.4.6. Calculo de la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de aceite.

Ahora calculamos el calor necesario para elevar la temperatura del aceite a 55°C que inicialmente se encuentra a 28 °C, la masa del aceite es de 45 kg debido a que la densidad del aceite es de 0.9 kg/m³ y su calor específico es de 2 kJ/kg°C, dando como resultado:

$$Q_{ac} = mC_p\Delta T = (45 \text{ kg}) \left(2 \text{ kJ} / \text{kg}^\circ\text{C} \right) (27^\circ\text{C}) = 2430 \text{ kJ}$$

Al igual que el cálculo anterior, convertimos la unidad a Watts:

$$Q_{ac} = 2430 \text{ kJ} / 3600 \text{ s} = 0.675 \text{ kW por carga o lote.}$$

Por tanto el calor útil que se necesita obtener del colector es:

$$Q_u = Q_T + Q_{ac} = 0.1042 \text{ kW} + 0.675 \text{ kW} = 0.78 \text{ kW por carga o lote.}$$

3.4.7. Área del colector

Si para que el proceso de producción del biodiesel proponemos una eficiencia del 50% para el colector, podemos obtener el área de captación del mismo del siguiente modo:

$$A_c = Q_u / \eta_c H_T = (0.78 \text{ kW}) / (0.5) (1.9 \text{ kW}/\text{m}^2) = 0.82 \text{ m}^2$$

Nótese que la irradiación diaria de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, varía durante todo el año, por lo que se elige la irradiación más baja (3.7 kW), ver tabla 2.4, y debido a que solo son 4 horas de trabajo, se considera solo la mitad de la irradiación diaria, es decir aproximadamente 1.9 kW. Con ello se propone que el colector sea de 1.16m de largo y 0.7 metros de ancho, ya que esta tendrá forma rectangular y debido a la buena distribución de la tubería.

Tabla.3.1. Irradiación global media en la República Mexicana Datos en kWh/m² día.

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	sep	ct	Nov.	Dic	Min	Max	Med
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	3.8	4.4	4.6	4.8	5.3	5.1	5.4	5.3	4.9	4.4	4.1	3.7	3.7	5.4	4.7

3.5. CONSTRUCCIÓN DEL TERMO TANQUE

El material que se utilizará como aislante en el colector será de espuma de polietileno almacenado en rollos de $100 \times 1,5 \text{ m} = 150 \text{ m}^2$ la cual es un material amortiguante y aislante, se forrara primero con periódico el tambo adherido con pegamento y después se recubre con la espuma de polietileno en capas de un espesor de 9 cm para la pared y 4 cm para tapa y base, a continuación las características de la espuma de polietileno, (ver figura 3.1 y tabla 3.1).



Figura 3.1. Recubrimiento del forro aislante del tanque, vista Interior lateral Superior del tanque.

Tabla 3.2. Características de la Espuma de polietileno expandido

CARACTERÍSTICAS / MATERIAL	<p style="text-align: center;">ESPUMA DE POLIETILENO EXPANDIDO</p> <p style="text-align: center;">5 mm</p>
Densidad kg/m ³	20
Permeabilidad al vapor de agua, mg/m*h*Pa	8,1E-4
Temperatura de trabajo, °C	50 ÷ 80
Resistencia a la compresión, kPa	7,81
Conductividad térmica, kcal/h*m * °C a 20°C	0,037
Absorción de agua, kg/m ²	0,0057
Aislamiento a ruido de impacto, dB (Δ Lw)	20

Asfaltex. S.A.

3.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR.

3.5.2. Construcción de la caja

De acuerdo a los cálculos del diseño se cortó la lámina para armar la caja colectora, se corto la espuma de polietileno de acuerdo al área de superficie de la caja colectora.

3.5.3. Recubrimiento.

Recubrir con la espuma de polietileno las caras laterales de la caja si es posible a presión, y pegamento de manera que no existan posibles lugares de fuga de calor, cubrir con el papel aluminio el interior de la caja, y las caras laterales

3.5.4. Armado

Armar y soldar los 9 tubos colectores de cobre dentro de la caja, pintar de color negro mate todos los tubos, amarrar con alambre cada uno de los tubos en la lámina de absorción de energía.

3.5.5. Perforación

Se hizo 2 perforaciones del lateral superior derecho de la caja para la entrada de aceite frío y la salida del aceite caliente, (ver figura 3.2).

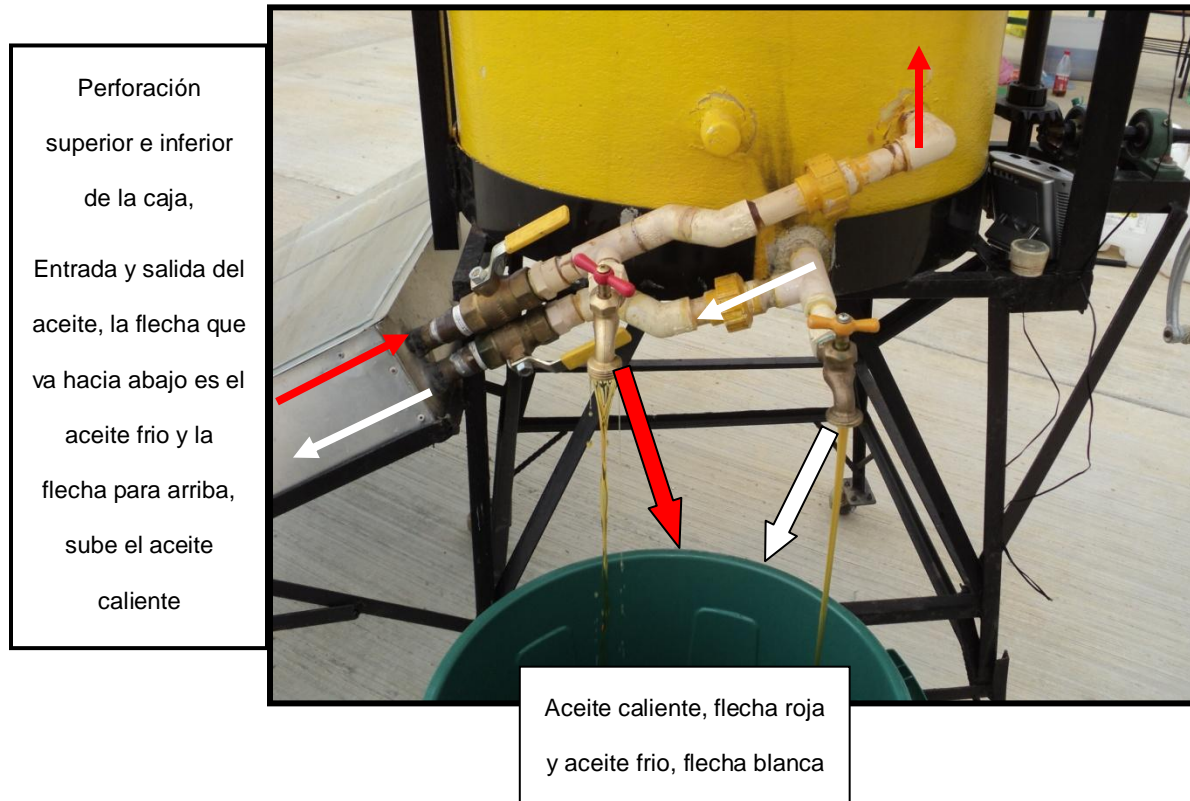


Figura 3.2. Entrada y salida del aceite en el colector

3.5.6. Vidrios

Cortar a la medida de la parte externa de la caja, las 2 planchas de vidrio, luego unir a la caja con silicón,(ver figura 3.3).



Figura 3.3. Colector solar del reactor

3.5.7. Sistema de purgado.

Hacer un orificio en la parte inferior izquierdo de la caja para colocarle una llave como sistema de purgado y de vaciado del aceite.(ver figura 3.4).



Figura 3.4. Llave de $\frac{1}{2}$ del sistema de purgado del colector

3.5.8. Agitador

Para el sistema de remoción o agitación, el cálculo para conocer la potencia del agitador, la intensidad de la agitación no es un factor determinante en la obtención de biodiesel, basta con que ésta sea suficiente para mantener una mezcla homogénea que favorezca el contacto de los reactivos, sobretodo en las etapas donde la viscosidad de la mezcla se incrementa.

Prevención del vórtice

El flujo circulatorio y el vórtice pueden prevenirse, en tanques de pequeño tamaño, se dispone el impulsor separado del centro del tanque, como se indica en la figura 3.5a y 3.5b (Bissell et al 1947, McCabe et al 2007).

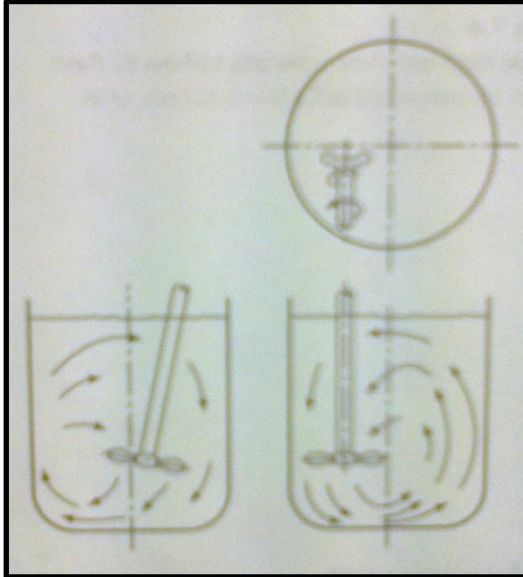


Figura 3.5a Patrón de flujo con agitador no centrado, (Bissell et al 1947).



Figura 3.5b.Eje e impulsor

El sistema de remoción se diseño de una varilla de col rol y paletas de fierro de 10cm de longitud y 0.3mm de espesor cada paleta, 2 de las paletas inclinadas con un ángulo de 30° y las otras 2 de 90° (figura 3.6).



Figura 3.6 Impulsor con 4 paletas planas.

3.6. Técnica de transesterificación para un litro de aceite vegetal limpio.

- ✓ 200 ml de metanol.
- ✓ 3.5 gr. de NaOH o 8 gr. de KOH (catalizador).
- ✓ Se disuelve el catalizador en el alcohol.
- ✓ Se precalienta el aceite a 50-60°C.
- ✓ Se mezclan ambos componentes por una hora.
- ✓ Dejar reposar 8 horas
- ✓ Decantar para separar la glicerina del biodiesel.

3.6.1. Producción de biodiesel en el laboratorio de fisicoquímica del ITTG

En el laboratorio de fisicoquímica se llevo a cabo una practica de síntesis de biodiesel a partir de aceite vegetal patrona limpio, con una temperatura inicial ambiental de 21°C y del aceite de 20°C, las condiciones de las variables fueron estables pues se calentó el aceite con una parrilla de calentamiento a una temperatura de 55°C con el agitador magnético y un magneto se mantuvo la agitación constante por una hora, utilizando la relación molar 6:1 metanol aceite.

El proceso se llevo a cabo en un matraz balón con una capacidad de 300ml, se le adapto un refrigerante con un flujo constante de agua para la posible captación de metanol

En el proceso se uso 3.325gr. de NaOH para un litro de aceite vegetal no quemado mas el 20% de metanol, para este caso por la capacidad del matraz se utilizo 200ml de aceite mas 0.665gr de NaOH de sodio, mas 40ml de metanol, ver figura 3.7

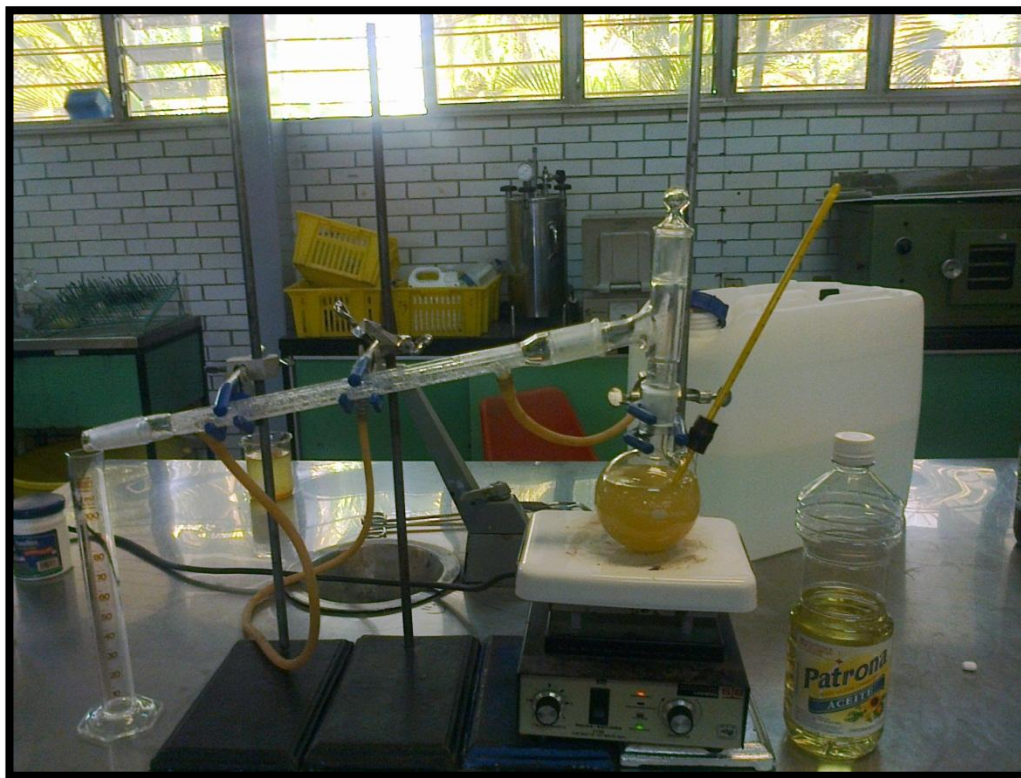


Figura 3.7 Producción de biodiesel a nivel laboratorio.

Posteriormente se puso el biodiesel en un embudo de separación para separar la glicerina del biodiesel, este biodiesel será analizado en el polo tecnológico para hacerle las pruebas fisicoquímicas,(ver figura 3.8).



Figura 3.8. Biodiesel y glicerina.

Se obtuvo 212 ml de biodiesel y 25ml de glicerina, se procedió analizarlo en el Polo Tecnológico Nacional para el Desarrollo de Investigación y pruebas Analíticas en Biocombustibles en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, ver resultados de análisis tabla 4.5 y anexo 1.

3.7. Operación del Reactor Solar

3.7.1. Transesterificación en el reactor solar.

Los materiales fueron, 2 garrafas de 20 litros de Aceite vegetal nuevo marca patrona, 8 litros de Metanol (CH_3OH) al 99.8%, y 131.25 g de Hidróxido de sodio (NaOH), grado industrial en una relación molar 6:1 de aceite metanol, con una temperatura estándar de 45°C en el reactor.

1. Se colocó el reactor solar a las 8 am en dirección del sol al sur y conforme al movimiento de la tierra se fue moviendo el reactor.
2. Se procedió al llenado del tanque con 40 litros de aceite vegetal marca patrona.
3. Se abren las llaves de paso para proceder en el llenado de las tuberías del colector solar.
4. Se coloca el sensor de temperatura marca Taylor para monitorear el alcance deseado a calentar el aceite.
5. Después de 4 horas, de calentamiento se alcanzó una temperatura de 61 grados centígrados se agitó el aceite y este descendió a 45°C , se procedió a cerrar las llaves de paso de las tuberías del sistema de termosifón., figura 3.9

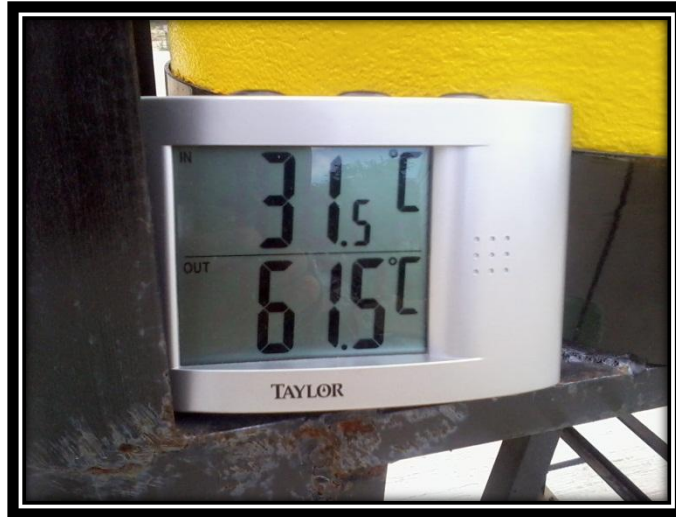


Figura 3.9. Sensor de temperatura Taylor, medición temperatura ambiental 31.5°C, medición de temperatura del aceite dentro del tambor 61.5°C

6. Se añadió el metóxido y se comenzó la agitación de la mezcla para realizar la transesterificación por 60 minutos.
7. Se dejó reposar toda la noche para extraer al otro día de la llave del reactor la glicerina y el Biodiesel. Ver figura 3.10



Figura 3.10. Extracción del biodiesel y glicerina

8. En el proceso se obtuvo una producción de 37.5 litros de Biodiesel y 5 litros de glicerina, (ver figura 3.11 y figura 3.12).



Figura 3.11. Biodiesel y glicerina producido en el reactor solar.

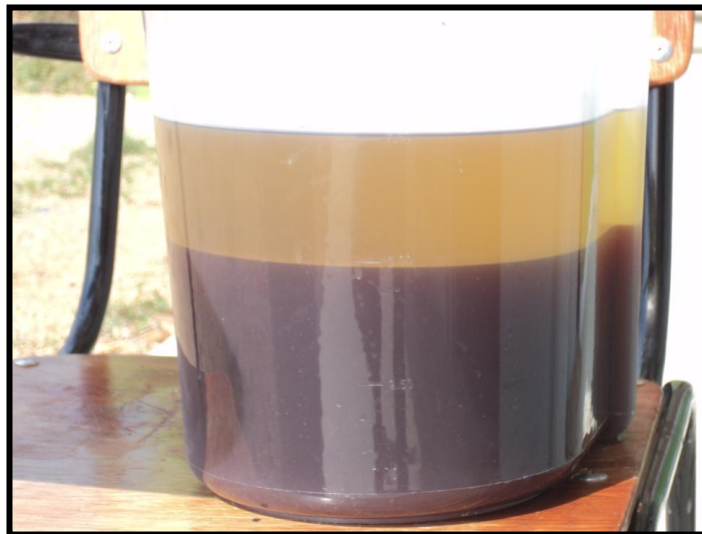


Figura 3.12. Biodiesel parte superior y glicerina parte inferior

3.7.2. Lavado de de biodiesel.

Se lavo 1 litro producido de la primer prueba del reactor solar mediante la técnica del “Dr. Pepper” (Pat Bend), después se analizó en el polo tecnológico y ser comparado con el biodiesel no lavado., ver anexo. Análisis de laboratorio del biodiesel no lavado y lavado, (muestra 1 y muestra 2).

3.7.3. La Técnica. “Dr. Pepper” (Pat Bend).

3.7.4. Primer Lavado

- Vierta un litro de biodiesel en una botella de plástico de 2 litros.
- Gentilmente vierta dentro de esta misma botella aproximadamente 500mL de agua a temperatura ambiente.
- Asegúrese que la tapadera no tenga fugas.
- GENTILMENTE rote la botella de un lado al otro por unos 30 segundos.
- Después de 30 segundos pare la botella verticalmente.
- Si ha sido GENTIL, el agua y el biodiesel se separarán inmediatamente.
- Se notará que el agua no esta clara.
- Remueva la tapadera y usando su dedo pulgar como tapón, invierta la botella, apreté los lados de la botella para que el aire no se introduzca de nuevo a la botella a través del líquido y drene el agua utilizando su dedo pulgar como una válvula.

- Cuando toda el agua haya sido drenada, invierta la botella de nuevo a suposición vertical y permita que la botella regrese a su forma original.
- El primer lavado ha sido terminado.
- Depositarlo en un embudo de separación, (Ver figura 3.13).



Figura 3.13. Primer lavado del Biodiesel

3.7.5. Segundo lavado:

- Vierta otros 500mL de agua en la botella y repita los mismos pasos del primer lavado, pero esta vez rote la botella GENTILMENTE por un minuto
- Drene el agua como en el primer lavado
- El segundo lavado ha sido finalizado.
- Se procede a depositarlo en el embudo de separación, (Ver figura 3.14).



Figura 3.14. Segundo lavado del biodiesel.

3.7.6. Tercer Lavado

- De nuevo vierta otros 500mL de agua y GENTIL, GENTIL, GENTILMENTE agite la botella por un minuto.
- Colocar la mezcla en los embudos de separación.
- Cuando el agua y el biodiesel se separen, drene el agua de la misma manera que en los lavados previos,(ver figura 3.15).



Figura 3.15. Tercer lavado del biodiesel.

3.7.7. Cuarto Lavado

- Agregue otros 500mL de agua y agite por un minuto
- Después de la separación del agua y el biodiesel drene el agua como lo ha hecho anteriormente, (figura 3.16).



Figura 3.16 Cuarto lavado del biodiesel.

3.7.8. Quinto Lavado

- Ahora se debe poder agitar relativamente fuerte.

Se sabe que el lavado ha terminado cuando, después de la agitación, el agua se ve casi transparente. Debe tener presente que durante los últimos lavados su mezcla debería poder ser agitada violentamente, sin emulsiones. El agua y el biodiesel tomarán más tiempo en separarse porque el agua forma pequeñas burbujas en el biodiesel, las cuales toman tiempo para asentarse. (Ver figura 3.17).



Figura 3.17. Quinto lavado del biodiesel

Se dejó reposar toda la noche para tener una óptima separación del agua y del biodiesel. (Ver figura 3.18).



Figura 3.18. Reposo del biodiesel, 15 horas para una óptima separación del biodiesel y de el agua espumosa.

El biodiesel lavado se ve BASTANTE NUBLOSO, mucho mas claro que el biodiesel original y frecuentemente parece jugo de naranja, (ver figura 3.19).



Figura 3.19. Lavado final del biodiesel.

3.7.9. Secado del biodiesel

Se procedió a calentar el biodiesel a 60°C por 30 minutos con una parrilla y con una agitación constante con un magneto. (Ver figura 3.20).

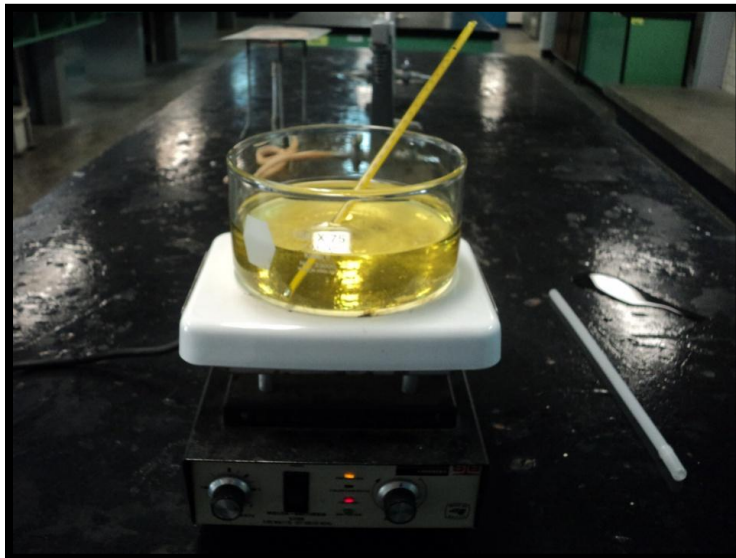


Figura.3.20. Secado del biodiesel.

3.7.10. Medición del pH del biodiesel lavado con el potenciómetro.

Después del secado del biodiesel se procedió a checar el pH con ayuda del potenciómetro Corning scholar dando como resultado 7.07 pH. a una temperatura de 25°C,(Ver figura 3.21).

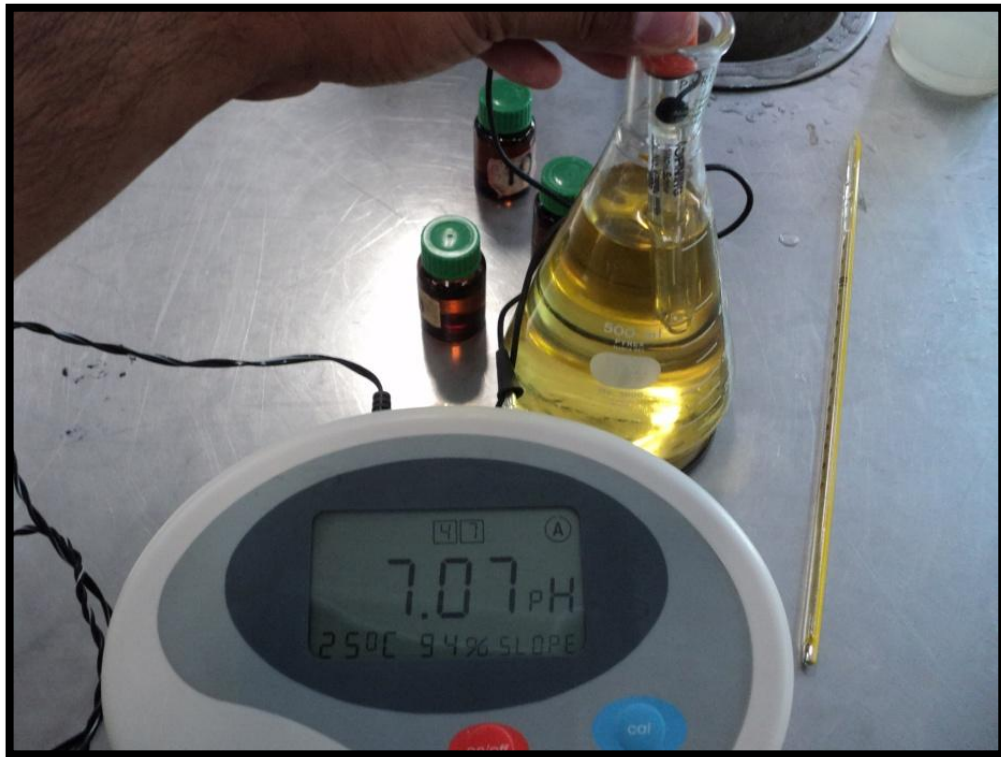


Figura. 3.21. Medición de pH del biodiesel.

3.8. MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR.

Para la medición de la radiación solar en 40, 50 litros de agua y para 45 litros de aceite en el reactor se utilizó un sensor de radiación solar portátil marca daystar, inc. El sensor Daystar solar proporciona una lectura exacta (3%) a partir de 0 - Watts/m² a 1200 cuando se señala a el sol, la resolución es de 1 W/m², la lectura de la pantalla máxima es de 1999. El valor de la irradiación se presenta en un 0,75 "fácil de leer en pantalla de LCD. El sensor es (2,5" x 4,5 "x 1,0" pulgadas) (6,4 x 11,4 x 2,5 cm) y un peso (menos de 5 onzas) (140 g) con la batería de 9 V instalada,(Ver figura 3.22). En la (figura 3.23). PV Sensor: El medidor usa una célula de silicio policristalino de PV como sensor. La célula está montada en el extremo superior de el sensor, perpendicular a la pantalla. El sensor responde a un ancho de banda spectrum de aproximadamente 0.3-1.1 micras. Un espectro genérico para una célula de silicio PV está aquí El medidor está diseñado para mediciones al aire libre de la luz solar natural. El sensor de PV se encuentra detrás de un difusor de plástico.



Figura 3.22. Sensor daystar meter

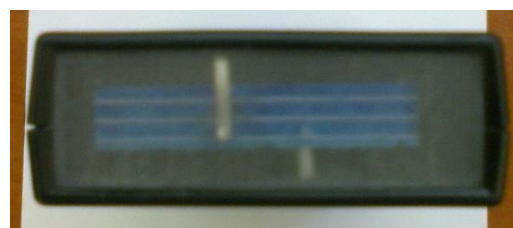


Figura 3.23. Banda spectrum.

3.9. CONCLUSION

En este capítulo se menciona que para llevar a cabo la transesterificación para la obtención de biodiesel la relación molar es de 6:1 (metanol aceite), a nivel experimental en laboratorio y en el reactor solar, la agitación no es un factor determinante en la obtención de biodiesel, basta con que ésta sea suficiente para mantener una mezcla homogénea que favorezca el contacto de los reactivos, sobretodo en las etapas donde la viscosidad de la mezcla se incrementa, una vez obteniendo el biodiesel del reactor se llevo a cabo el lavado de 1 litro a nivel laboratorio para luego ser analizado bajo la Norma Europea EN14214 en el Polo Tecnológico Nacional para el Desarrollo de Investigación y pruebas Analíticas en Biocombustibles en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 RESULTADOS DE DISEÑO

En la tabla 4.1 se presentan los parámetros, ecuaciones y rango, resultados del diseño y construcción del reactor solar.

Para un colector con eficiencia del 50%, el área necesaria para cubrir la demanda energética es de 0.9m^2 , por lo que el colector construido tiene las dimensiones siguientes: 1.2m de largo x 0.8m de ancho. La capacidad requerida del termo tanque para el experimento debe ser superior a los 50 litros, por lo que se utilizó un tanque plástico PE-HD (numero.2), con una capacidad de 60L de volumen, para obtener una producción de 50L de biodiesel por día. El calor útil para calentar el aceite a la temperatura requerida es de 0.78kW, el aislante térmico propuesto para garantizar las condiciones termodinámicas del sistema es la espuma de polietileno expandido de 9cm de espesor para recubrir el termo tanque y el colector.

Tabla 4.1 Resultados de diseño.

PARAMETROS	ECUACIONES	RESULTADO
Área Colector	$A_c = Q_u / \eta_c H_T$	115.9cm de largo x 76.7cm de ancho
Volumen del tanque		60L
Área Tanque	$A_p = \pi D h$	
Diámetro del tanque	$D=2r$ $r = \sqrt{V_1 / \pi h}$	0.54m diámetro x 0.68m de alto.
Irradiación solar más baja a la mitad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	Calor útil $Q_u = A_c H_T \eta_c$ $Q_{ac} = m C_p \Delta T$ $Q_u = Q_T + Q_{ac}$ $= 0.1042 \text{ kW} + 0.675 \text{ kW}$ $= 0.78 \text{ kW por día}$	(1.9KW) 780W
Conductividad térmica	Coficiente global de transferencia de calor $(k = \lambda / e)$ $Q_p = k_p A_p \Delta T$ $Q_t = k_t A_t \Delta T$ $Q_T = Q_b + Q_t + Q_p$	0,037 kcal/h*m * °C 9 cm de espesor
Perdida de calor	$Q_T = (93.8 \text{ kJ}) (4 \text{ hrs} / 3600 \text{ s})$	4 horas de trabajo 0.1042 kW por día

Para la construcción del prototipo del reactor solar para la síntesis de biodiesel se utilizaron materiales accesibles presentados en la tabla 4.2.

En la tabla 4.2 se presentan las características de los materiales que se utilizaron para la construcción del reactor solar de acuerdo a los resultados obtenidos de los cálculos de diseño (ver tabla 4.1), los cuales se eligieron debido a la factibilidad de los costos.

Tabla 4.2. Características de los materiales para la construcción del colector solar y sus conexiones.

No. de Lamina Galvanizada (calibre, mm)	Área de absorción de Lámina galvanizada pintada negro mate. (cm) (calibre; mm)	Tamaño y Numero de tubos de cobre Para el colector (pulgada)	Área de Vidrio(cm) y Espesor (mm)	Numero y tamaño de Conexiones (pulgada) (PVC)	Longitud total de la tubería de conexión para sistema caliente y sistema frio (cm)
2 laminas calibre (18, 1.2)	1 lamina de 103 x 66 28, 0.4	9 tubos de ½" 100 cm de largo 2 tubos de 1" de 66cm de largo 1 tubo de ¾" 62cm de largo.	2 vidrios de uno de 65 x 74.6 y el otro de 50x74.6 Espesor 3	2 llaves de esfera ¾ con rosca 2 llaves de paso de ½ 7 coplees con rosca interior exterior de ¾ 4 niples rosca exterior de ¾ 2 Tee de ¾ 2 codos a 45° de ¾ 2 tuercas universales de ¾ 3 codos a 90° de ¾	Sistema caliente 65 Sistema frio 35

4.2 El mecanismo de agitación

En la tabla 4.3 se presentan las características del mecanismo de agitación basándose en el diseño del impulsor, (Bissell et al 1947, McCabe et al 2007).

Tabla 4.3. Características del sistema de agitación

Material	Características
2 Engranajes cónicos	Hierro, de cambio direccional de movimiento
6 chumaceras de pared	1 pulgada, Hierro
2 chumaceras de piso	$\frac{3}{4}$ pulgadas
1 polea	10 pulgadas
1 polea	$\frac{3}{2}$ pulgadas
Eje de col rol	1 pulgada
Impulsor	4 paletas planas de hierro soldadas de 10cm de largo y 3mm de espesor. 2 de 30° y 2 de 90°

En la figura 4.1 y 4.2 se muestran las partes frontal y posterior del reactor solar, como podemos observar cuenta con un tanque recubierto de poliuretano como aislante, un colector solar, y un mecanismo de agitación por medio de poleas. En la figura 4.3 la parte lateral derecha se muestra el sistema de termosifón.



Figura 4.1.Reactor Solar, parte frontal



Figura 4.2. Reactor Solar, parte posterior



Figura 4.3. Reactor Solar, parte lateral derecha.

4.3. Evaluación del Sistema.

4.3.1 Evaluación con H₂O

La evaluación del reactor con agua se realizó con 45 y 50 litros de agua en el tanque del reactor. El experimento se realizó en el horario comprendido entre las 9.am y las 3.00pm.

En la figura 4.4 se presenta la variación de la radiación solar con respecto al tiempo, la radiación máxima se alcanzó a las 2:30 pm con un valor de 1016 W/m² para el día 19 de abril del 2012, lo cual nos indica que la radiación en el lugar donde se realizaron los experimento es alta.

En la figura 4.5 se presenta la variación de temperatura de 50L de agua con respecto al tiempo, alcanzando una máxima temperatura de 56°C a las 3pm, esta temperatura es suficiente para llevar a cabo la síntesis del biodiesel.

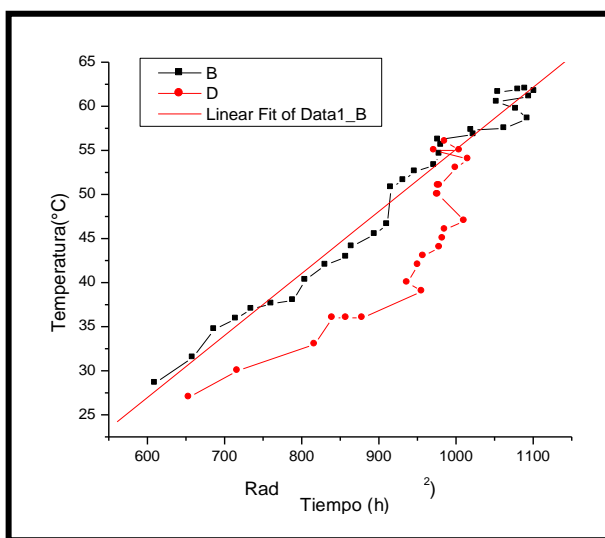


Figura 4.4. Variación de radiación solar con el tiempo de exposición.

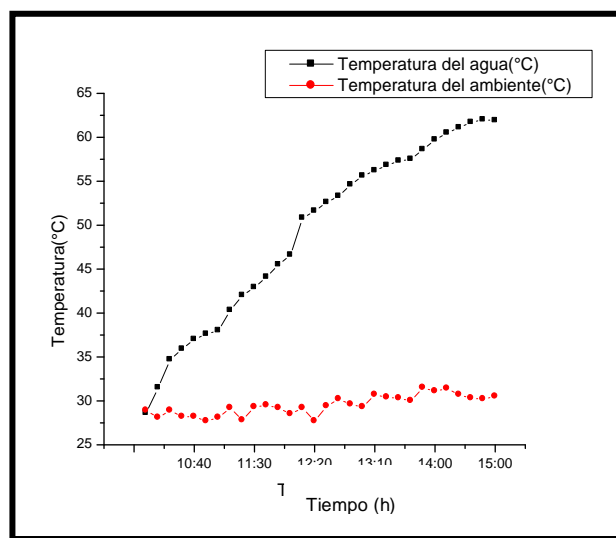


Figura 4.5. Variación de temperatura del agua con el tiempo de exposición.

En la figura 4.6. Se presenta la variación de la radiación solar con respecto al tiempo del día 23 de abril del 2012, teniendo a las 2:30pm una máxima radiación de 1102 W/m^2 .

En la figura 4.7. Se presenta el incremento de la temperatura con respecto al tiempo en 45 litros de agua dentro del tanque del reactor solar, alcanzando una máxima temperatura de 62°C a las 2:40pm, como se puede observar que en la evaluación con 45L de agua se alcanzó mayor temperatura que en la evaluación con 50L

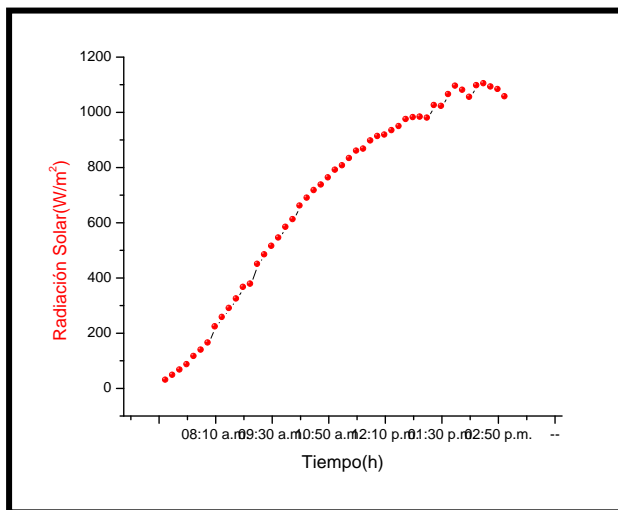


Figura 4.6. Variación de radiación solar con respecto al tiempo de exposición.

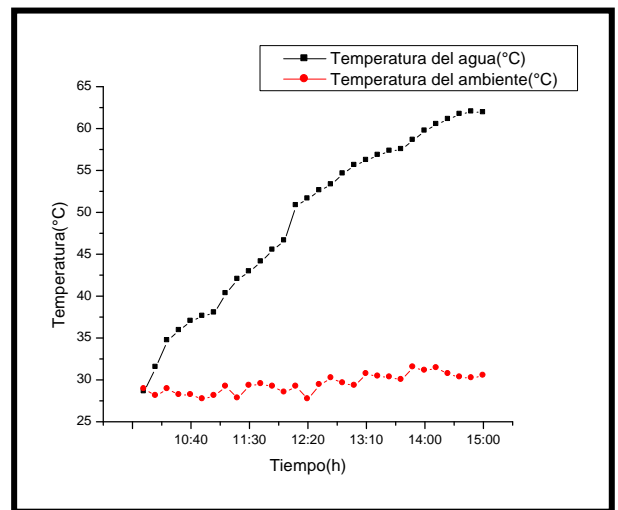


Figura 4.7. Variación de temperatura del agua con respecto al tiempo de exposición.

Como se observa en la figura 4.8 existe una relación lineal en la primera etapa de calentamiento del sistema.

Se presenta la grafica de la variación de la temperatura y de la radiación solar para (a= 45L de H₂O y para b= 50L de H₂O), en la medición de 45L se obtuvo una máxima temperatura de 62°C, con una radiación máxima de 1090 W/m² y para la medición con 50L se obtuvo una máxima temperatura de 56°C con una máxima radiación de 986 W/m²

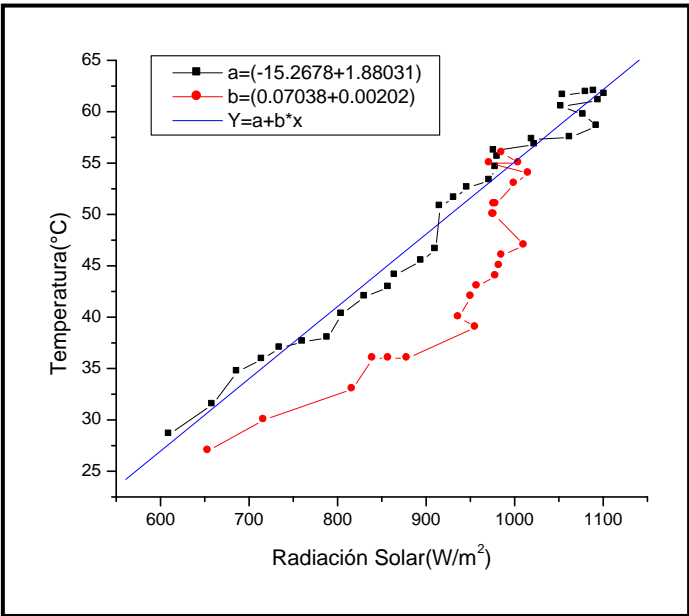


Figura 4.8. Variación de temperatura y de radiación solar para 50 L y 45L de H₂O del día 19 y 23 de abril del 2012

4.3.2. Evaluación con aceite.

Para la síntesis del biodiesel se utilizaron 40 litros de aceite limpio marca patrona, En la figura 4.9 se observa una máxima radiación de 1032 W/m² a las 12:40pm y en la figura 4.10 se aprecia un descenso considerable de temperatura entre 12:40 y 12:50 debido a la remoción del aceite. En la figura 4.11 se observa el incremento de temperatura del aceite con respecto a la radiación solar incidente.

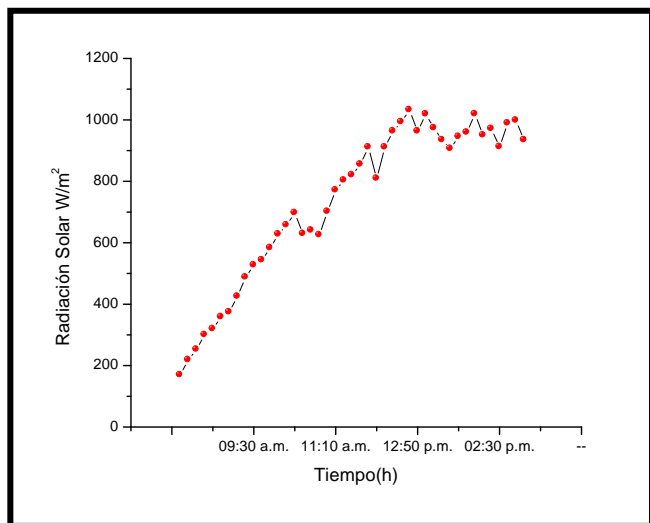


Figura 4.9.Variación de la radiación solar para 40 litros de aceite.

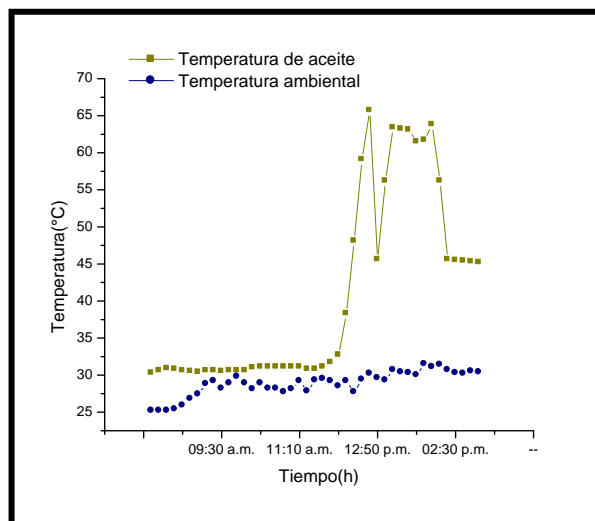


Figura 4.10.Variación de la temperatura para 40 litros de aceite.

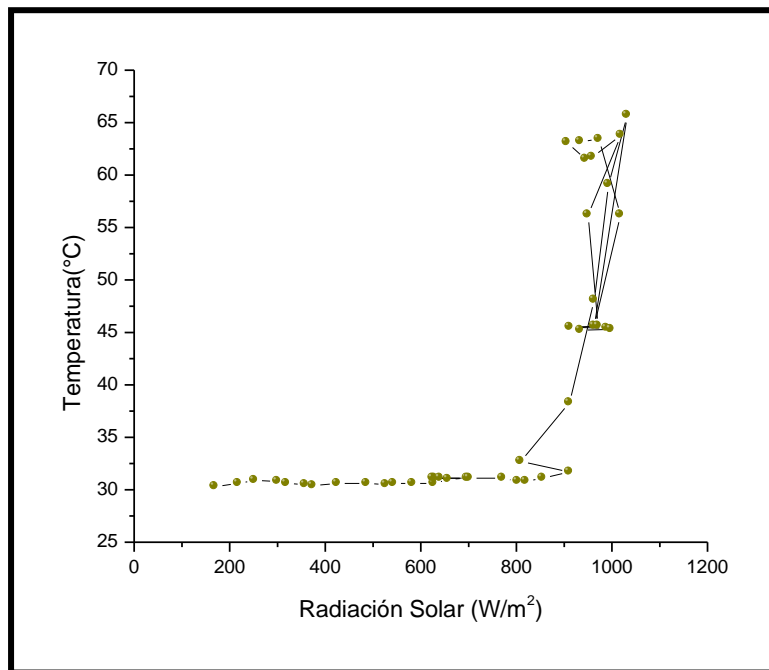


Figura 4.11. Variación de la temperatura del aceite con respecto a la radiación solar.

En la figura 4.11 se puede observar que alcanzó una máxima temperatura de 65.7°C con una radiación de 1032W/m² del día 23 de septiembre del 2012.

4.4. Caracterización del Biodiesel

En la tabla 4.4 se observan las determinaciones para el análisis del biodiesel producido en el laboratorio de Fisicoquímica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Tabla 4.4. Informe de análisis del biodiesel producido en el laboratorio de fisicoquímica a partir de aceite limpio marca patrona, bajo la norma Europea EN14214.

DETERMINACIONES	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO MUESTRA	ESPECIFICACIONES	OBSERVACIONES
1)FLASH POINT	°C	EN ISO 3679	124	120 MÍNIMO	DENTRO DE LA NORMA
2)VISCOSIDAD 40°C	mm ² /S	EN ISO 3104	5.0	3.50-5.0	DENTRO DE LA NORMA
3)NÚMERO DE CETANO	-	EN ISO 5165	120	51 MÍNIMO	DENTRO DE LA NORMA.
4)VALOR ÁCIDO	MgKOH/g	EN 14104	0.19	0.50 MÁXIMO	DENTRO DE LA NORMA
5)CORROSIÓN POR LA TIRA DE COBRE	clase	ISO+2160-1998	CLASE 1a	CLASE 1	DENTRO DE LA NORMA
6)DENSIDAD 15°C	Kg/m ³	EN ISO 3675	887.3	860-900	DENTRO DE LA NORMA

Como se puede observar los resultados de análisis del biodiesel producido en el laboratorio de la tabla 4.5 cumplen con la norma Europea EN14214.

Tabla 4.5. Análisis del biodiesel producido en el reactor solar

DETERMINACIONES	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO MUESTRA 1	RESULTADO MUESTRA 2	ESPECIFICACIONES	OBSERVACIONES
1) FLASH POINT	°C	EN ISO 3679	124	180	120 MÍNIMO	DENTRO DE LA NORMA
2) VISCOSIDAD 40°C	Mm ² /s	EN ISO 3104	4.8	4.2	3.50-5.0	DENTRO DE LA NORMA
3).NÚMERO DE CETANO	-	EN ISO 5165	52	51.7	51 MÍNIMO	DENTRO DE LA NORMA
4).VALOR ÁCIDO	mgKOH/g	EN 14104	0.47	0.48	0.50 MÁXIMO	DENTRO DE LA NORMA
5)ESTABILIDAD OXIDATIVA	h	DIN EN 14112	6.7	6.9	6 MÍNIMO	DENTRO DE LA NORMA
6).CORROSION POR LA TIRA DE COBRE	clase	ISO + 2160-1998	CLAE 1a	CLASE1a	CLASE 1	DENTRO DE LA NORMA
7).DENSIDAD 15°C	KG/m ³	EN ISO 3675	872	870	860-900	DENTRO DE LA NORMA

En la tabla 4.5 se observa los parámetros analizados del biodiesel producido en el reactor solar tomando 1 muestra de 1 litro de biodiesel no lavado (muestra 1) y 1 litro de biodiesel lavado (muestra 2).

Como podemos observar en la tabla no existe diferencia estadística significativa en las propiedades fisicoquímicas del biodiesel lavado y no lavado, cumpliendo ambas con los estándares de calidad de la norma Europea EN14214.

En cuanto a la temperatura, en el trabajo de Encinar y col. (2002) se utilizan temperaturas de 50°C a 75°C para la transesterificación del aceite de

Cynaracardunculus con etanol e hidróxido de sodio como catalizador obteniendo rendimientos mayores a 90% en contenido de ésteres totales y en un trabajo posterior Encinar y col. (2007), utilizan temperaturas de 60°C a 78°C para la transesterificación de aceite reciclado de cocina con etanol e hidróxido de potasio como catalizador con rendimientos superiores a 70%.

Cabe señalar que en las reacciones de transesterificación al aumentar la temperatura tiene tres efectos fundamentales, (Feofilova 2009).

1. Aumentar la velocidad de reacción, esto de acuerdo a la ecuación de Arrhenius.

La ecuación de velocidad de la forma

$$\text{Velocidad} = K_v(A)^{n_1}(B)^{n_2}$$

Expresa la dependencia de la velocidad de reacción con las concentraciones de los reactivos. Sin embargo, la velocidad de una reacción varía ampliamente con la temperatura, ya que para un proceso típico al aumentar ésta 10°C la velocidad se duplica o triplica

2. Aumentar la homogeneidad de la mezcla reaccionante, puesto que la viscosidad y densidad son en función de la temperatura.
3. Aumentar la solubilidad del alcohol en la grasa o aceite.

4.5. CONCLUSION

- ✓ Se diseñó, construyó y evaluó un reactor solar para la producción de biodiesel, con una capacidad de producción de 50 litros por día.
- ✓ El reactor solar utiliza exclusivamente la energía solar para su funcionamiento.
- ✓ Para el diseño propuesto la energía solar necesaria para alcanzar las condiciones requeridas para la síntesis del biodiesel fue de 1032W/m^2
- ✓ El biodiesel obtenido en el reactor solar, cumple con los estándares de calidad de la norma Europea EN14214.
- ✓ En cuanto a la eficiencia del reactor ante otros reactores convencionales eléctricos para producir biodiesel, en este reactor solar la eficiencia es de 93.5%, obteniendo 37.5 litros de biodiesel y 5 litros de glicerina.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES.

5.1. Conclusiones generales

Para la obtención de biodiesel la mejor combinación de reactivos alcohol y catalizador fue el metanol y el hidróxido de sodio grado industrial, obteniendo buenos resultados en el proceso de la obtención y separación de biodiesel y glicerina, usando aceite vegetal marca patrona.

Se utilizo la técnica de transesterificación para aceite vegetal limpio usando de manera proporcional las cantidades necesarias para llevar a cabo el proceso de la transesterificación en el reactor solar, se consiguió llevar a cabo de manera satisfactoria la producción del biodiesel y separación de la glicerina.

Por todo lo expuesto anteriormente, es posible concluir que se ha cumplido con el objetivo general de la tesis; Diseñar, construir y operar un reactor solar, para la producción de Biodiesel a partir de aceite de cocina mediante un proceso termoquímico solar.

En el proceso de transesterificación dentro del reactor solar considerando las especificaciones físicas del cilindro de material plástico, no presento ninguna reacción con el hidróxido de sodio de grado industrial.

El precalentamiento del aceite es de gran importancia para asegurar y especificar una temperatura inicial de la reacción de transesterificación.

Una de las ventajas del reactor solar ante los demás reactores convencionales de operación con resistencias de energía eléctrica, para el proceso del precalentamiento del aceite vegetal del presente trabajo fue la utilización de energía solar para dicho proceso.

En el proceso de la transesterificación de 40 litros de aceite vegetal se obtuvo 37.5 litros de biodiesel y 5 litros de glicerina. Obteniendo un 93.75% en eficacia del reactor solar.

, El Biodiesel producido por el reactor solar fue analizado y cumplió con los límites de acuerdo a la Norma Europea EN14214 en el Polo Tecnológico Nacional para el Desarrollo de Investigación y pruebas Analíticas en Biocombustibles en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. (Ver anexo 1 y 2).

5.2. Aportaciones

A continuación se expondrán una serie de trabajos futuros que sirvan para mejorar el funcionamiento del prototipo y que en el presente trabajo.

- Preparar el metóxido (mezcla de metanol y sosa cáustica) en un tambo de plástico exclusivo para esta mezcla con agitación automática.
- Optimizar y automatizar el proceso de la agitación y mezclado para llevar acabo la transesterificación en el reactor solar por medio de una bomba o motorcito eléctrico por medio de paneles solares.
- Colocarle al reactor solar un condensador para la recuperación del metanol.
- Colocarle un medidor de nivel de aceite en el reactor solar.
- Diseñar un tambo automatizado para el lavado del biodiesel.

REFERENCIAS

- Altin, R; Cetinkaya, S,; Yucesu, H.S.; 2001; The potential of using vegetable oils fuels as fuel for diesel engines; Energy and conversion management; 42: 529 – 538.
- Addison, K. (2005) Biocombustibles: Journey to Forever [on line]. Hong Kong. <http://journeytoforever.org/energiaweb> 16 de septiembre de 2005.
- APPA & PRICEWATERHOUSECOOPERS. Una Estrategia de Biocarburantes para España (2005-2010). 2005. Adaptación a los objetivos de la Directiva 2003/30/CE. España. 192 p
- BALLESTEROS, M. Fuentes, cultivos y PAC. Producciones aspectos legislativos. 2003. CIEMAT. España. 31 p.
- BISELL, E.S., H.C.Hesse, H.J.Everett y J.H.Rushton. Chem. Eng.Prog.,43:649 (1947)
- BUNYAKIAT K, MAKMEE S, SAWANGKEAW R, NGAMPRASERTSITH S.
Continuous production of biodiesel via transesterification from vegetable oils in supercritical methanol. Energy Fuels 2006; 20:812–817.
- BOUAID, A.; DIAZ, Y.; MARTINEZ, M.; ARACIL, J. Pilot plant studies of biodiesel production using Brassica carinata as raw material. Catalysis Today 106 (2005) 193–196.

- BCN, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 2007. [En línea] <<http://www.bcn.cl>>
- CIEMAT, Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel y del Diesel. 2006. 141 p.
- CNE, Comisión Nacional de Energía de Chile. Especificaciones de calidad, para la producción, importación, transporte, almacenamiento, distribución y Comercialización, de bioetanol y biodiésel. 2007. Proyecto de Ley. Chile. 3 p.
Diego Lizana R. Ingeniero Forestal. UCH. Master en Energías Renovables.
- UNIZAR.19
- COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. Comunicación de la Comisión. Estrategia de la UE para los biocarburantes. 2006. {SEC (2006) 142}. Bruselas. 31 p.
- CORPODIB, Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y producción limpia. Programa estratégico para la producción de biodiésel – combustible automotriz a partir de aceites vegetales. 2003.
- CASTRO, P.; CASTILLO, L.; NAZARIO, M.; COELLO, J.; CALLE, J. 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). 2006. Lima, Perú. 5 p.

- DE JUANA, J.; DE FRANCISCO, A.; SANTOS, F.; HERRERO, M.; CRESPO, A. Energías Renovables para el desarrollo. 2003. Thomson Editores. Paraninfo S.A. España.311 p.
- Demirbas, A.; 2008; Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections; Energy Conversion and Management; 49:2106-2116.
- E. Bravo. Biocombustibles, Cultivos Energéticos y soberanía alimentaria en América Latina. Encendiendo el debate sobre los biocombustibles. Mantera Editores, primera edición. Pps. 153 Quito, Ecuador, 2006.
- European Biodiesel Board. [En línea]. Disponible: <http://www.ebb-eu.org/>. Consultado en Julio, 2007.
- Energías Renovables para el desarrollo. 2003. Thomson Editores. Paraninfo S.A. España. 311 p.DEMIRBAS, A. Importance of biodiesel as transportation fuel. Energy Policy 35 (2007) 4661–4670.
- EBB, EUROPEAN BIODIÉSEL BOARD. 2007. Estadística de la industria del biodiésel en la UE. [En línea] <<http://www.ebb-eu.org/stats.php#>>
- European Biodiesel Board. [En línea]. Disponible: <http://www.ebb-eu.org/>. Consultado en Julio, 2007.
- EPA, Environmental Protection Agency. A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. 2002. Draft Technical Report. United Status. 126 p.

- Feofilova, E. P.; Sergeeva, Ya. E; Ivashechkin A. A.; 2010; Biodiesel Fuel: Content, Production, Producers, Contemporary Biotechnology (Review); Applied Biochemistry and Microbiology; 46: 369-378.
- Formo, M.W. (1979) Physical properties of fats and fatty acids (4ta Ed, Vol 1). John Wiley and Sons. New York. 514.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. UWET - Unified Wood Energy Terminology Uwet. 2001. Departamento de Montes. 24 p.
- FREEDMAN, B.; PRYDE, E.; MOUNTS, T. Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. J Am Oil Chem Soc 1984; 61:1638–43.
- FUNDACIÓN TERRA. Perspectivas Ambiental 24: Biocombustibles. 2002. Barcelona. España. 34 p.
- Foon C.S., May C.Y. (2004) “Kinetics study on transesterification of palm oil”. *Journal of Oil Palm Research*. (Vol. 16) 2:19 – 29
- Glatzmaier, G., Blake, D. y Showalter, S. (1998). Assessment of Methods for Hydrogen Production Using Concentrated Solar Energy. Informe: NREL/TP-570-23629. National Renewable Darnoko D., Cheryan M. (2000) “Kinetics of palm oil transesterificación in a batch reactor”. *J. Am. Oil Chem. Soc.* (Vol. 77). 12:1263 -126 Energy Laboratory (USA).

- HURTADO M, Alejandro. “Colectores Solares de Placa Plana”. Bogotá, Colombia: Universidad Autónoma de Colombia 1994
- HILAL, A.; DEMIRBAS, I. Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 2386–2398. Diego Lizana R. Ingeniero Forestal. UCH. Master en Energías Renovables. UNIZAR. 20
- HILBERT, J. Selección de indicadores que permitan determinar cultivos óptimos para la producción de biodiésel en las eco-regiones Chaco-Pampeana de la República Argentina. 2007. Instituto de Ingeniería Rural INTA. Argentina. 111 p.
- INEGI. [En línea]. Disponible: <http://www.inegi.gob.mx>. Consultada en Abril, 2006.
- ISHIKURA, C. Relatório de estágio produção de biodiesel a partir de óleos usados de fritura. 2005. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Departamento de Engenharia Química e Alimentos. Brasil. 54 p.
- J. M. García, J. A. García. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. Informe de vigilancia tecnológica. Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España, 2006.
- Jornadas “Aportación de la biomasa al desarrollo de las energías renovables” Diciembre de 2002. Organizadas por CCOO e IDAE (Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético).

- “Desarrollo en tecnología y aplicaciones industriales de combustibles líquidos”. Mercedes Ballesteros CIEMAT “Utilización de aceites usados para la obtención de biodiesel” Mercedes Martínez. Universidad Complutense de Madrid.
- J. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements and G. Knothe. Biodiesel Production Technology. National Renewable Energy Laboratory Review. Colorado, Estados Unidos de América. Julio, 2006.
- KNOTHE, G.; KRAHL, J.; VAN GERPEN, J. The Biodiesel Handbook. 2005. AOCS Press, Champaign, IL. 304 p.
- L.C. Meher, D. Vidya Sagar, S.N. Naik. Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterificación—A review. Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India. September 2004.
- LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; BALLESTEROS, R. Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils. SAE paper 2002-01-1657.
- Leung, D.Y.C; Wu X.; Leung, M. K. H.; 2010; A review on biodiesel production using catalyzed transesterification; Applied energy; 87: 1083 -1095.
- LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; BALLESTEROS, R.; FERNÁNDEZ, J. Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. 2005. Fuel 84, 773–780.

- LAROSA, R. Proceso para la producción de BIODIÉSEL (metilester o ésteres metílicos de ácidos grasos). Refinación de glicerina. 2001. 8 p.
- LAROSA, R. Proceso para la producción de BIODIÉSEL (metilester o ésteres metílicos de ácidos grasos). Descripción, materias primas y servicios necesarios. 2003. 4 p. MA, F.; CLEMENTS, L.; HANNA, M. The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. Trans ASAE 1998; 41:1261–4 MA, F.; HANNA, M. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 70 (1999) 1-15
- L.C. Meher, D. Vidya Sagar, S.N. Naik. Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification—A review. Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India. September 2004.
- Joshua Tickell. From the Fryer to the Fuel Tank, The complete guide to using vegetable oil as an alternative fuel. Pag. 35 – 88, (2003).
- J. M. García, J. A. García. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. Informe de vigilancia tecnológica. Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España, 2006.
- J. Van Gerpen, B. Shanks, R. Pruszko, D. Clements and G. Knothe. Biodiesel Production Technology. National Renewable Energy Laboratory Review. Colorado, Estados Unidos de América. Julio, 2006.
- Joseph Bornstein. Proyecto gota verde; Biodiesel: Producción y aplicaciones, Whitman Direct Action, agosto 2008.

- National Biodiesel Board. [En línea]. Disponible: <http://www.biodiesel.org/>. Consultado en Julio, 2007
- MANZANARES, P. Biocarburantes. Marco europeo, aspectos legislativos. División de Energías Renovables CIEMAT. 2007. Apuntes docentes Máster Europeo en Energías Renovables. CIRCE. España.
- MARCHETTI, J.; MIGUEL, V.; ERRAZU, A. Possible methods for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 1300–1311
- MACHUCA-MARTÍNEZ, Fiderman; MELLIZO CERÓN, Jhon Eric y ROJAS HOYOS, Jaime Andrés. Optimización de condiciones de operación en la transesterificación de aceites de higuera y palma con etanol e hidróxido de Sodio. Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas [en línea] 2010, vol. 8 [citado 2012-03-25].
- Michoacán: opera ya primera planta de biodiesel. [En línea]. Disponible: <http://www.jornada.unam.mx/ultimas/2007/09/28/inicia-operaciones-primera-planta-productora-de-biodiesel-en-mexico>. Consultada en Septiembre, 2007.
- Montgomery R.H.Ed. (1992).Energía Solar: Selección del Equipo, Instalación y Aprovechamiento. Limusa México
- Moreno, J.L.; Gutiérrez, G.C. (2002) Obtención de biodiesel a partir del aceite de higuera. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Manizales

- Monteiro Machado Cristina María. Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. 2010. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)
- M. D. Cárdenas. El biodiesel, una alternativa sostenible al gasóleo convencional. Boletín de la Universidad de Castilla-La Mancha. España, 2006. [En línea]. Disponible: <http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/pdf/boletines/7/EL%20BIODIESEL,%20UNA%20ALTERNATIVA%20SOSTENIBLE%20AL%20GASOLEO%20CONVENCIONAL.pdf>. Consultada en Junio, 2007
- Shvam S. Nandwani, Energía Solar- Conceptos Básicos y su Utilización. Calentador Solar de Agua-Folleto, Seminario, Aplicaciones Productivas y Sustentables de la Energía Solar, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2006.
- “Posibilidades de reciclaje y aprovechamiento de los Aceites Usados”. Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia. Generalitat de Cataluña. Departamento de Medio Ambiente. Ministerio de Medio Ambiente, Año 200.
- OROZCO HINCAPIE, Carlos A. “Elementos de Ingeniería Solar”. Pereira, Colombia: Publicaciones U.T.P. 1993.
- P. J. Villegas, R. Z. Vigoroux, B. Bucki, E. Bonnet, I. L. Díaz, I. Herrera y E. Viedma. Algunas Consideraciones Preliminares Acerca de la Factibilidad de la

Obtención de Biodiesel en Países en Vías de Desarrollo. ASADES. Argentina.
[En línea]. Disponible: <http://www.asades.org.ar/averma/9-2005/09-01.pdf>.
Consultada en Mayo, 2006.

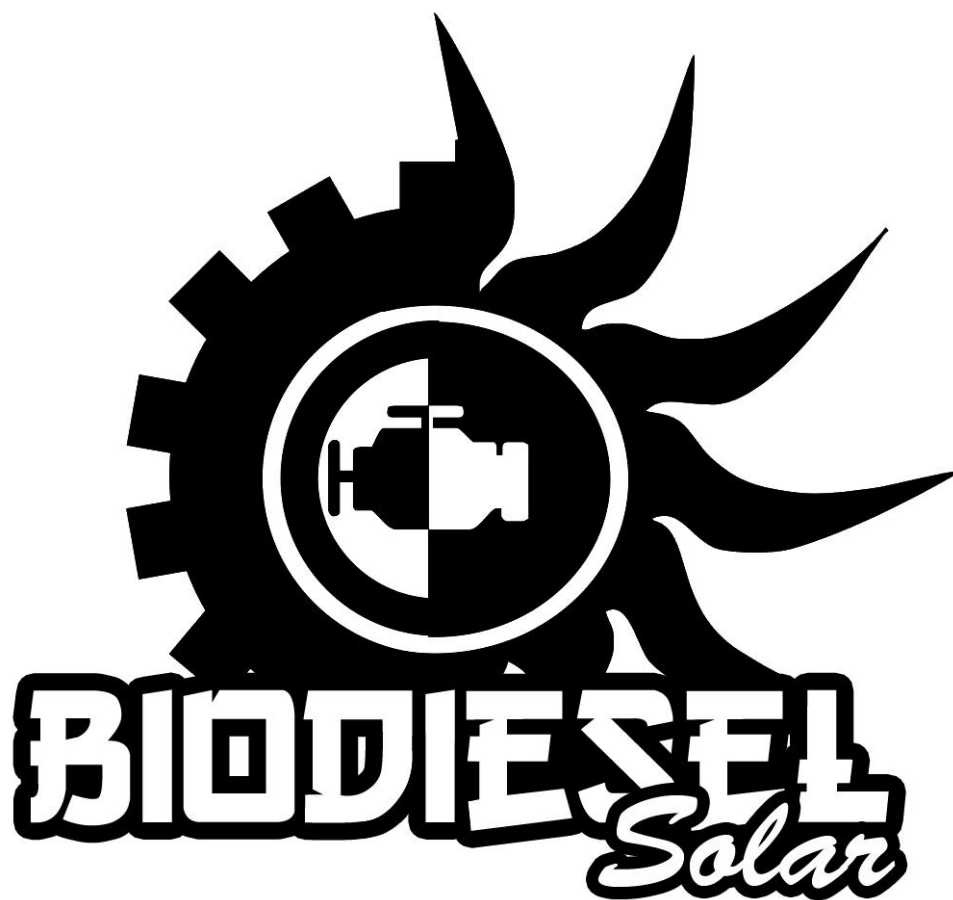
- Perea, S. (2006) Campo Tecnológico de Monterrey. Monterrey
- R. J. Larosa. Proceso Para la Producción de Biodiesel. [En línea]. Disponible: <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf>. Consultado en Mayo, 2006
- Renovada Energía. [En línea]. Disponible: <http://www.jornada.unam.mx/2005/08/01/004n1sec.html>. Consultada en Mayo, 2006.
- Reactor para fabricación de biodiesel. E-asfalto. [En línea]. Disponible: <http://www.e-asfalto.com/go/?bio/index.htm>. Consultado en Mayo, 2006.
- Stratta, J. (2002) “Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel. Investigación y Desarrollo”. Departamento de Capacitación y Desarrollo de Mercado
- Singh, S.P.; Singh, D.; 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
- Singh Nigam, P.; Singh, A.; 2011; Production of liquid biofuels from renewable resources; Progress in Energy and Combustion Science; 37: 52-68.

- Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, séptima edición McGraw Hill interamericana, 2007.
- Zhang, Y.; Dubé, M. A.; Mclean, K., M.; 2003; Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment; Bioresource technology; 89: 1-16.
- Construcción experimental de tres calentadores de agua solares. (2006)
<http://www.textoscientificos.com/energia/calentador-solar/insumos-necesarios>
- <http://www.terra.org/articulos/art01822.html>
- <http://www.suministrosolar.com/usosdelaneergiasolar>
- http://www.uib.es/facultat/ciencies/prof/victor.martinez/recerca/jornades/ManuelRomero/CSP_QUIMICA_SOLAR.pdf
- <http://www.conae.gob.mx>
Damien Gummy, Pilar Fernández-Ibáñez, Sixto Malato, Cesar Pulgarin, Octav Enea, John Kiwi, article: Catalysis Today, publicado el 15 de abril 2005 Elsevier, Supported Fe/C and Fe/Nafion/C catalysts for the photo-Fenton degradation of Orange II under solar irradiation.
- <https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet?publisherName=ELS&contentID=S092058610500074X&orderBeanReset=true>
- <http://es.scribd.com/doc/54603346/TFM-Desire-Santana>

ANEXOS

Hoja 1 de análisis del biodiesel a nivel laboratorio y Hoja 2 de análisis del biodiesel producido en el reactor solar.

Diseño del logotipo para el reactor solar.



Diseño: Biól. José Daniel Martínez Salas.