



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

**PLAN ESTRATÉGICO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL PARA
CONSUMO PROPIO EN UNA INDUSTRIA AZUCARERA
GUATEMALTECA**

ING. BYRON DE JESÚS LÓPEZ MALDONADO
ASESORADO POR MSC. ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

GUATEMALA, AGOSTO DE 2011.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PLAN ESTRATÉGICO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL PARA
CONSUMO PROPIO EN UNA INDUSTRIA AZUCARERA
GUATEMALTECA**

TRABAJO DE TESIS

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA POR

ING. BYRON DE JESUS LOPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, AGOSTO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR/A	Ing. Cesar Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR/A	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
EXAMINADOR/A	Licda. Sully Cruz Velásquez
SECRETARIO/A	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PLAN ESTRATÉGICO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL PARA CONSUMO PROPIO EN UNA INDUSTRIA AZUCARERA GUATEMALTECA

Tema que nos fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado en el año 2010.

f. _____

Ing. Byron de Jesús López Maldonado

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios:** Por haberme dado la vida y haberme iluminado siempre en conseguir todas las metas que me he propuesto.
- Mi patria Guatemala:** Bello y entrañable país que se merece todo nuestro esfuerzo para que sea cada día un mejor lugar para vivir.
- Mi hija Paula:** Bella persona que llena mi vida de felicidad y de ganas de seguir viviendo, aprendiendo y triunfando. Eres un motivo de mucha inspiración y motivación. Te amo.
- Mi esposa Flor:** Maravillosa mujer con quien comparto mi vida, formé mi familia y siempre es un gran apoyo.
- Mis Padres Rogelio y Haydée:** Seres ejemplares que me dieron la vida y desde niño me inculcaron el valor del estudio y la educación como fin para ser un buen Guatemalteco.
- Mi hermano Roger:** Persona que siempre me apoyó y con quien compartimos tantas vivencias desde la niñez.

Mi hermana Delmy:	Angelito terrenal que nos inspira a ser personas más sensibles y humanas.
Mi cuñada Tita:	Persona admirable y ejemplo de hermandad, serenidad y esfuerzo.
Mis sobrinos Alex y Astrid:	Personitas especiales que siempre desbordan tanto cariño y lo hacen a uno querer ser mejor cada día.
Mis suegros Chusita y Abelito:	Seres especiales y grandes ejemplos de amor, bondad y generosidad. Dios los tiene en un lugar muy especial.
Mis amigos :	Renato, Miriam, Paulo, Benjamín, Jeannette que son mis hermanos y que han sido guía y apoyo incondicional durante gran parte de mi vida.
Mis cuñados Lissette Annabella, Verónica y Abel:	Magníficas personas que son ejemplos de generosidad, unión y apoyo desinteresado. Los admiro mucho.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	I
LISTA DE SÍMBOLOS	III
GLOSARIO	V
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
HIPÓTESIS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
CAPÍTULO 1. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	1
1.1. Antecedentes de la producción de biodiesel	1
1.2. Proceso de producción de biodiesel.....	6
1.2.1. Proceso Discontinuo.....	8
1.2.2. Proceso Continuo	11
1.2.3. La glicerina subproducto del biodiesel	13
1.2.4. Transesterificación alcalina o medio básico	15
1.2.5. Factores que intervienen en la reacción de transesterificación	17
1.2.6. Tipo de catálisis y concentración del catalizador	18
1.2.7. Relación molar alcohol-aceite	21
1.2.8. Temperatura y tiempo de reacción	21
1.3. Características físico-químicas	23
1.4. Emisiones del biodiesel	24
1.5. Parámetros de calidad	26
CAPÍTULO 2. PRODUCCIÓN DE PLANTAS OLEAGINOSAS	31
2.1. Importancia mundial	31

2.2. Origen y desarrollo	31
2.3. Clasificación de plantas oleaginosas	34
2.3.1. La Canola	35
2.3.2. El Girasol	37
2.3.3. Ricino	39
2.4. Principales Materias primas utilizadas para la producción de biodiesel	42
2.4.1. Jatrofa (Jatropha curcas)	42
2.4.2. Girasol	44
2.4.3. Colza	45
2.4.4. Soya	45
2.4.5. Palma aceitera.....	46
2.4.6. Microalgas como fuente de biodiesel	46
2.5. Rendimiento de aceite de los compuestos oleaginosos	48
2.6. Extracción de aceite	50
2.6.1. Expresión	50
2.6.2. Extracción	51
2.6.3. Refinación	52
2.7. Comercio Mundial de Aceites Vegetales	53
CAPITULO 3. CONSUMO DE DIESEL EN UN INGENIO AZUCARERO	55
3.1. Mercado mundial y variación de los precios del diesel	62
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN-IMPORTACIÓN DE ACEITE VEGETAL	65
4.1. Mercado de aceites o biodiesel	65
4.2. Pequeña o gran escala de producción de biodiesel	66
4.3. ¿Hay espacio para la maquila?	67
4.4. Tierras y recursos disponibles para plantas oleaginosas	70
4.5. Disponibilidad internacional de aceites vegetales para uso industrial.	71
4.6. Consideraciones con respecto a la importación y comercio de aceites	72
CAPÍTULO 5. MONTAJE DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DENTRO DE PLANTA DEL INGENIO.	75

5.1. Ubicación de la planta dentro del ingenio	75
5.2. Costos de montaje	77
5.3. Costos de operación y mantenimiento	82
5.4. LOGÍSTICA DE PRODUCCIÓN Y DESPACHO DE BIODIESEL	85
5.4.1 Transporte y almacenamiento	85
CAPÍTULO 6. ANALISIS AMBIENTAL DEL PROYECTO	91
6.1. La sostenibilidad ambiental del biodiesel	91
6.2. Sostenibilidad energética del biodiesel	93
CAPITULO 7. ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO	95
7.1. TIR	97
7.2. VAN	98
CONCLUSIONES.....	99
RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS Y APÉNDICES	105

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Pasos de la reacción de transesterificación entre un triglicérido y metanol.....	8
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel sistema continuo.....	10
Figura 3. Proceso continuo de transesterificación de reactores de flujo a pistón.....	13
Figura 4. Procedimiento general para obtención de biodiesel.....	16
Figura 5. Producción mundial de oleaginosas 1965-2005.....	33
Figura 6. Producción mundial de aceites y grasas años 2001-2005.....	33
Figura 7. Usos de los aceites vegetales años 2000-2007.....	34
Figura 8. Productividad de aceite vegetal por hectárea para los distintos cultivos.....	49
Figura 9. Plantas oleaginosas y sus rendimientos por hectárea y de aceite....	50
Figura 10. Precios internacionales de oleaginosas 2005-2006.....	54
Figura 11. Área, producción y rendimiento de caña de azúcar en todo el territorio de Guatemala años 2001-2010.....	60
Figura 12. Mapa de la ubicación geográfica de la zona cañera de la costa sur de Guatemala.....	61
Figura 13. Comportamiento de precios del diesel en los Estados Unidos de 1994-2010.....	62
Figura 14. Mapa de áreas potenciales para el cultivo de la jatropha en el territorio de Guatemala.....	70
Figura 15. Vista de planta de la instalación de la planta de producción de biodiesel en el ingenio nacional donde se hace el estudio de prefactibilidad ...	76
Figura 16. Diagrama de la planta BIO11.5K cotizada.....	80
Figura 17. Planta de producción de biodiesel BIO11.5K.....	81
Figure 18 Variación de precios del diesel 2006-2010.....	105
Figura 19 Comparación de propiedades del diesel, aceites y biodiesel de distintos orígenes.....	107
Figura 20 Esquema de la reacción de transesterificación.....	110

Figura 21 Rendimiento de biodiesel por Kg de aceite	111
Figura 22 Mapa de producción mundial de aceites y sus variaciones	114
Tabla 1. Principales países productores de biodiesel.....	3
Tabla 2. Estimaciones de la producción de biodiesel entre los años 2002-2006	4
Tabla 3. Comparación de valores físico-químicos para el Biodiesel y el Diesel.	23
Tabla 4. Propiedades físico-químicas especificadas para biodiesel según normas europeas.....	24
Tabla 5. Comparativo de normas de calidad para Estados Unidos y Europa.....	30
Tabla 6. Principales países productores de canola año 2007(miles de toneladas).....	36
Tabla 7. Principales países productores de aceite semillas de girasol año 2007.	39
Tabla 8. Consumo de diesel y costo total para la zafra 2008-2009 de un ingenio nacional.....	57
Tabla 9. Consumo de diesel y costo para la zafra 2009-2010 en un ingenio nacional.....	57
Tabla 10 Consumo de diesel y costo total en la reparación 2009 en un ingenio nacional.....	58
Tabla 11 Consumo y costo de diesel durante la reparación 2010 en un ingenio nacional.....	58
Tabla 12. Costo de montaje de las instalaciones para montar la planta de producción de biodiesel.....	82
Tabla 13. Costos de producción de biodiesel por galón y tonelada métrica	84
Tabla 14. Flujos de efectivo para proyecto producción de biodiesel en ingenio nacional.....	96
Tabla 15. Análisis TIR para proyecto de producción de biodiesel en ingenio nacional.....	97
Tabla 16. Análisis VAN para proyecto de producción de biodiesel en ingenio nacional.....	98
Tabla 17 Comportamiento de precios del diesel años 1994-2010(US\$/gal)....	106

LISTA DE SIMBOLOS

AGL	Ácidos Grasos Libres
B100	Biodiesel al cien por ciento
B20	Biodiesel al veinte por ciento
BTU	British Thermal Units
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor(Reactor continuo de tanque agitado)
CO ₂	Dióxido de Carbono
US\$	Dólares de los Estados Unidos
FFA	Free Fat Acid(Ácido Graso Libre)
°C	Grado Celsius
g	Gramo
Hz	Hertz-medida de frecuencia
KOH	Hidróxido de Potasio
NaOH	Hidróxido de Sodio
h	Hora
M has	Millones de hectáreas

O ₂	Oxígeno molecular
PFR	Plug Flow Reactor(Reactor de flujo de pistón)
Wt%	Porcentaje en peso
%w/w	Porcentaje en peso-peso
Q	Quetzal(Moneda Guatemalteca)
TIR	Tasa Interna de Retorno
t	Tonelada métrica
Tn/ha	Tonelada métrica por hectárea
VAN	Valor Actual Neto

GLOSARIO

Ácidos grasos libres:

Es una biomolécula orgánica de naturaleza lipídica formada por una larga cadena hidrocarbonada lineal, de número par de átomos de carbono, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo. Cada átomo de carbono se une al siguiente y al precedente por medio de un enlace covalente sencillo o doble. Al átomo de su extremo le quedan libres tres enlaces que son ocupados por átomos de hidrógeno ($\text{H}_3\text{C}-$). Los demás átomos tienen libres dos enlaces, que son ocupados igualmente por átomos de hidrógeno (... - $\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-}$...).

Biodiesel:

El nombre biodiesel es aplicado a combustibles que se prestan a sustituir total o parcialmente el diesel de petróleo, en particular en el empleo en motores a pistón de encendido por compresión (los llamados "motores diesel"). El prefijo bio

se usa para caracterizar el origen biológico del producto, obtenidos de aceites vegetales o grasas animales. La palabra “biodiesel” se difundió por todo el mundo, aunque no siempre ganó la misma aceptación. Existe, por tanto, controversia en la definición de “biodiesel”

Catalizador: Sustancia que altera la velocidad de una reacción química, acelerándola o retrasándola, pudiendo recuperarse sin cambios esenciales en su forma o composición al final de la reacción.

Ester metílico: Producto de la separación de compuestos en una reacción de transesterificación, se le conoce más comúnmente como biodiesel.

Glicerina: La glicerina es un líquido viscoso incoloro, inodoro, higroscópico y dulce. Los términos glicerina o glicerol son utilizados indistintamente para referirse al compuesto; sin embargo, el nombre oficial IUPAC es propan-1,2,3-triol.

Ingenio azucarero: Planta de molienda y producción de azúcar a partir de la caña de azúcar. Industria que

también se encarga de proveer parte de la energía eléctrica de uso en el país durante la temporada de producción denominada zafra.

Jatropha curcas:

Conocida como piñón de tempate o jatropa, es una Euphorbiacea que tiene propiedades medicinales. Las semillas contienen un aceite no comestible,[1] que se puede utilizar directamente para aprovisionar de combustible a lámparas y motores de combustión o se puede transformar en biodiesel, mediante un proceso de transesterificación. Además se usa para fabricar jabones.

Metanol:

CH_3OH . El alcohol metílico (CH_3OH), o alcohol de madera se encuentra en el alcohol sólido y es usado como anticongelante para remover pinturas y como solvente de lacas y barnices, se obtiene por destilación de madera o por hidrogenación de monóxido de carbono. El metanol es el más simple de los alcoholes y es tóxico. A elevadas concentraciones, el metanol puede causar dolores de cabeza, mareos.

Número de cetano: Llamado también cetanaje, corresponde a la cantidad presente (porcentaje en volumen) de cetano (hexadecano) en una mezcla de referencia con igual punto de inflamación que el carburante (hidrocarburo) sometido a prueba. Guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión.

Transesterificación: Proceso para obtención del biodiesel que consiste en combinar el aceite (por lo general aceite vegetal) con un alcohol ligero, normalmente metanol, y deja como residuo glicerina, que se separa para emplearlo en otras industrias, por ejemplo, la cosmética.

Triglicérido: Son acilgliceroles, un tipo de lípidos, formados por una molécula de glicerol, que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo por tres ácidos grasos, saturados o insaturados. Los triglicéridos forman parte de las grasas, sobre todo de origen animal. Los aceites son triglicéridos en

estado líquido de origen vegetal o que provienen del pescado.

Zafra:

Se le llama así al proceso de cosecha y procesamiento de la caña de azúcar que en el caso de Guatemala tiene lugar entre los meses de noviembre y mayo.

RESUMEN

La situación económica mundial una vez más está afectada por un aumento en los precios del petróleo y por lo tanto en sus productos principales que son los combustibles, creando esto un aumento desmedido en los costos de todas las empresas y personas y a la vez elevando el índice inflacionario.

El capítulo uno expone todo lo concerniente a la producción del biodiesel y sus características físico-químicas y de calidad para el uso y con respecto al medio ambiente.

El capítulo dos estudia el mercado mundial de las plantas oleaginosas y un resumen de las de mayor uso industrial y su relación actual con el biodiesel.

El capítulo tres introduce un análisis del consumo de diesel en un ingenio guatemalteco, siendo el sector azucarero uno de los más grandes y que reporta un alto flujo de efectivo por sus consumos, producción y fuentes de empleo.

El capítulo cuatro plantea y analiza que alternativas existen para iniciar la producción de biodiesel en escala industrial, lo cual ya se da pero que no es en gran cantidad y se puede decir que está en un proceso

vacilante. También se escoge una alternativa de las tres planteadas aunque se deja abierta la opción para usar también las otras.

El capítulo cinco presenta el análisis técnico para el montaje de la planta de producción, su ubicación dentro de la planta de producción de azúcar, además de los costos de montaje y de operación y los principales asuntos logísticos a considerar.

El capítulo seis expone las características ambientales de un proyecto de biodiesel y sí es beneficioso con respecto al uso de diesel de petróleo.

El capítulo siete presenta el análisis financiero del proyecto, determinando que para autoconsumo a gran escala podría representar una buena opción de disminución de gastos, mejoramiento de emisiones y creación de empleo.

OBJETIVOS

Objetivo General: Desarrollar un plan estratégico para la producción de biodiesel para consumo propio de una industria azucarera guatemalteca.

Objetivos específicos:

1- Hacer una propuesta de un diseño de una planta de producción de biodiesel.

2-Evaluar la factibilidad para el montaje y operación de una planta de biodiesel en la industria azucarera.

3- Revisar el estado actual del mercado nacional e internacional de los aceites vegetales con fines energéticos.

4-Analizar diversas alternativas para la producción y uso de biodiesel en una industria azucarera.

HIPÓTESIS

La producción y uso de biodiesel a partir de plantas oleaginosas es una alternativa que puede disminuir costos en la industria del azúcar a la vez que mejora el ambiente y crea fuentes de empleo.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación presenta el proyecto para la producción de biodiesel en un ingenio azucarero guatemalteco situado en el Departamento de Escuintla. La importancia de este trabajo implica tanto el aprovechamiento energético de forma renovable, el cuidado ambiental al sustituir un producto de peligrosas emisiones a uno de emisiones menos peligrosas. También se contempla que este tipo de proyectos es de gran ayuda para el sistema económico del país en vista que contribuye con aumento de las fuentes de trabajo y la retención de divisas. En este trabajo se analizan las distintas posibilidades para lograr de forma más eficiente la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales y enfocándose más en la producción a partir del aceite de semillas de *Jatropha curcas* al ser esta una planta cuyo aceite no tiene propiedades comestibles y puede cultivarse también en terrenos muy agrestes donde el cultivo de la caña no sería posible. Al ser la *Jatropha* un árbol, presenta también buenas propiedades de resistencias a cambios de clima muy bruscos entre un año y otro exceptuando inundación. Se desarrolló el análisis de montaje y logística para la producción en un área escogida de la planta industrial donde se encuentran a disposición valiosos recursos como vapor, electricidad, tanques de almacenamiento y mano de obra a un costo muy conveniente. Se prevé la producción de biodiesel²⁰ para uso interno y se analiza los volúmenes de producción que se tendrían si la industria completa hiciera un proyecto como este.

CAPÍTULO 1. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

1.1. Antecedentes de la producción de biodiesel

La producción del biodiesel es bien conocida y citada extensamente en la literatura y a través de diversos medios informativos. Básicamente se elabora mediante la transesterificación de grasas y aceites con alcohol metílico en ambiente básico. Los catalizadores a emplear pueden ser soda cáustica o metilato sódico, ambos en solución metanólica.

El doctor Rudolph Diesel desarrolló un único motor en 1895. Este motor fue diseñado para operar con aceite de maní u otro combustible de base vegetal y mostró su motor en la exhibición mundial de 1900. El Doctor Diesel murió misteriosamente en 1913 y después de su muerte el motor Diesel fue adaptado para usar un derivado del proceso de refinación de la gasolina. La industria del petróleo lo llamo combustible diesel.

Durante la segunda guerra mundial, y ante la escasez de combustibles fósiles, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en el Brasil, sobre diesel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiesel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que se sucedía en el momento, y al elevado costo del petróleo.

Las primeras pruebas técnicas con biodiesel se llevaron a cabo en 1982 en Austria y Alemania, pero solo hasta el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed Methyl Ester - metil-éster aceite de semilla de colza).

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiesel en automóviles. En Europa, es producido principalmente a partir del aceite de la semilla de canola (también conocida como colza o rapeseed) y el metanol, denominado comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas diesel puro o mezclado con aceite diesel, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%, generalmente. En Alemania y Austria se usa puro para máximo beneficio ambiental. Además de la colza, en los últimos años se ha producido biodiesel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en Malasia para la producción de biodiesel PME y PEE (Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester).

La siguiente tabla muestra los principales países de Europa productores de Biodiesel para el año 2000, en la actualidad la producción se ha seguido incrementando año con año siempre manteniendo Alemania el liderazgo.

Tabla 1. Principales países productores de biodiesel

País	Capacidad instalada (tn/año 2000)	Producción (tn/año 2000)
Alemania	550.000	415.000
Francia	290.000	286.000
Italia	240.000	160.000
Bélgica	110.000	86.000
Inglaterra	2.000	2.000
Austria	20.000	20.000
Suecia	11.000	6.000
Checoslovaquia	47.000	32.000
Total	1.270.000	1.005.000

Fuente: SAGPyA, en base a "Biodiesel: El pasado del futuro" por Eugenio F. Corradini.

Tabla 2. Estimaciones de la producción de biodiesel entre los años 2002-2006

ESTIMACIONES DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIODIESEL
(En miles toneladas)

País	2002	2003	2004	2005	2006 ^a
Canadá	1	3	3	43	76
Estados Unidos	50	67	83	250	336
Austria	25	32	57	85	
Rep. Checa	--	--	60	133	
Dinamarca	10	41	70	71	
Francia	366	357	348	492	
Alemania	450	715	1 035	1 669	
Italia	210	273	320	396	
Eslovaquia	--	--	15	78	
España	--	6	13	73	
Suecia	1	1	1	1	
Reino Unido	3	9	9	51	
Polonia	--	--	--	100	
Australia	27	27	29	36	187
Japón	2	2	3	3	3
Brasil	--	--	-	0,7	60,3
China	--	20	45	64	150
India	--	--	--	--	8
Malasia	--	--	--	--	135
Filipinas	--	--	29	29	58
Tailandia	--	--	--	79	100
Otros	--	20	80	348	689
Total	1 153	1 663	2 133	2 880	4 250

Fuente: Steenblik, 2006; EBB, 2006; ANP 2007.

a/ Proyectado; -- cero o despreciable

En la Unión Europea se estipuló que para 2005, el 5% de los combustibles debía ser renovable, porcentaje que debería duplicarse para 2010: En Francia, todos los combustibles diesel poseen un mínimo del 1% de biodiesel. En Alemania, el biocombustible se comercializa en más de

350 estaciones de servicio y su empleo es común en los cruceros turísticos que navegan en sus lagos.

En Europa y los EE UU, el biodiesel es producido y utilizado en cantidades comerciales. En 1998, la DOE designó al biodiesel puro ("B100" - 100%), como un combustible alternativo y estableció un programa de créditos para el uso de biodiesel. Sin embargo el biodiesel mezclado, cuya forma más común se llama B20 (20% biodiesel, 80% diesel convencional), no ha sido designado como un combustible alternativo.

En los EE UU, flotas de carga mediana y liviana que son centralmente llenadas de combustible en el medio oeste y en el este son actualmente las principales usuarias del combustible biodiesel. Las porciones del mercado total son bajas: por ejemplo, en Alemania, donde el biodiesel está disponible en cerca de 1.000 de un total de 16.000 estaciones de llenado de combustible, la participación del biodiesel está en el orden de 0,3% del diesel vendido, lo cual equivale a 100.000 t. Se espera que esto se eleve a quizás 300.000 en el futuro anticipable, pero incluso los optimistas no esperan que la participación se eleve por sobre un 5%-10% como máximo.

Varias flotas de buses escolares y de transporte público están usando biodiesel en los EE UU. Según, el uso del biodiesel como un combustible alternativo (esto es, en su forma pura) no se espera que sea importante, pero como una mezcla puede aumentar en los EE UU y en otras partes, aunque quizá principalmente en flotas cautivas con llenado

de combustible central o nicho de mercado en áreas ambientales sensibles.

En Guatemala se inicio la investigación y desarrollo del cultivo de *Jatropha curcas* con el fin de obtener biodiesel a partir de su aceite, esto por parte de la empresa Biocombustibles de Guatemala S.A. con oficinas en 17 calle 10-31 zona 10 y planta de producción en el kilómetro 33.4 carretera al pacífico y para el año 2004-2005 ya se habían identificado diez zonas geográficas de *Jatropha curcas* con fines investigativos y en enero de 2006 se inicio el proyecto con fines comerciales.

1.2. Proceso de producción de biodiesel

El biodiesel es un combustible liquido muy similar en propiedades al aceite diesel, pero obtenido a partir de productos renovables, como son los aceites vegetales y las grasas animales.

El biodiesel - en comparación con el diesel de recursos fósiles- puede producirse a partir de aceites vegetales de diferentes orígenes, como soya, maní y otros aceites vegetales, tales como el aceite para cocinar usado, o incluso, excremento animal.

Para producir el biodiesel, el aceite se extrae de la semilla cultivada, dejando atrás harina de semilla que puede usarse como forraje animal. El aceite es refinado y sometido a la transesterificación, lo que produce glicerina como un derivado. El biodiesel puede usarse en su

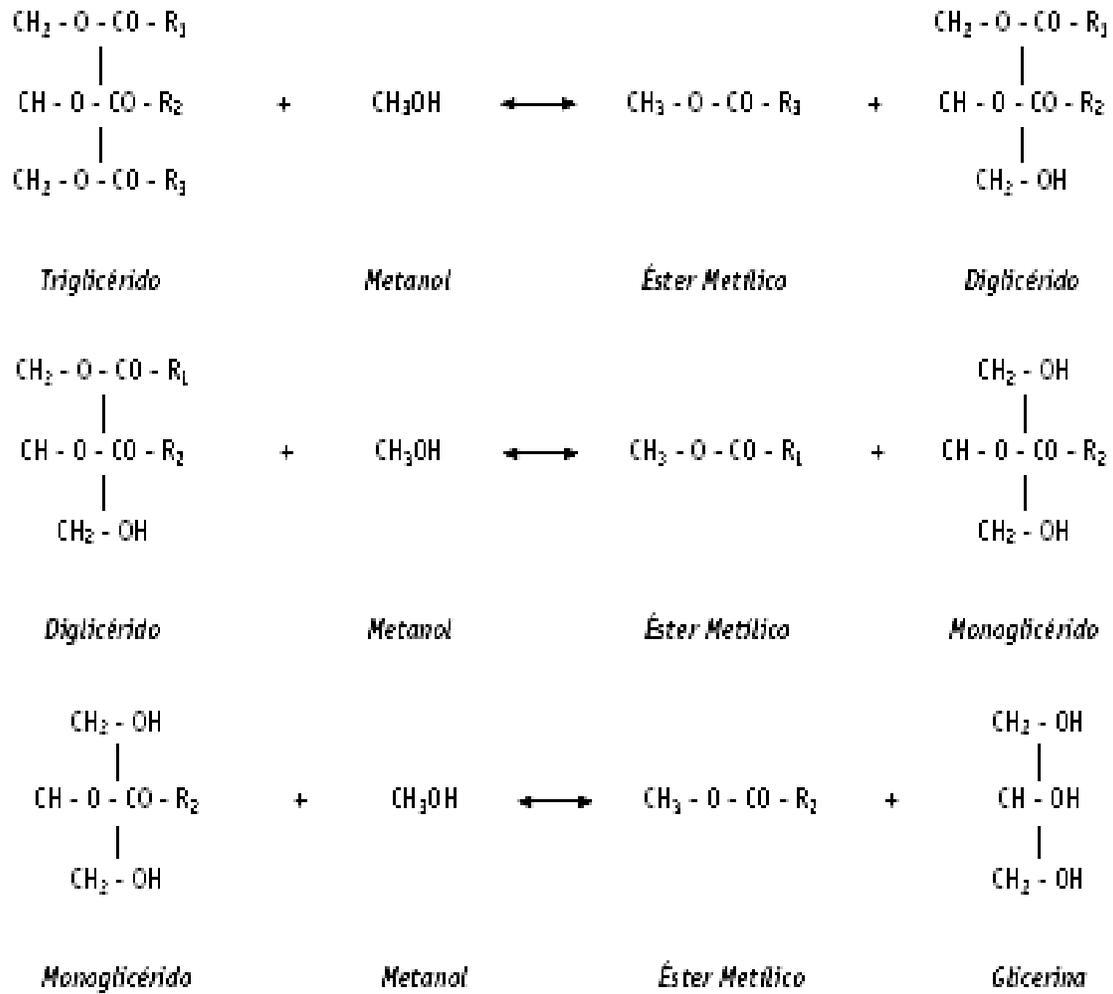
forma pura (100% biodiesel) o mezclado en cualquier proporción con diesel regular para su uso en motores de ignición a compresión.

El biodiesel puro es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilice en la transesterificación.

La reacción química como proceso industrial utilizado en la producción de biodiesel, es la transesterificación, que 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. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen las reacciones y en posteriores fases de separación, purificación y estabilización.

Las tecnologías existentes, pueden ser combinadas de diferentes maneras variando las condiciones del proceso y la alimentación del mismo. La elección de la tecnología será función de la capacidad deseada de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol y del catalizador. En general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación (utilización al mismo tiempo de aceites refinados y reutilizados) suelen utilizar procesos Batch o discontinuos. Los procesos continuos, sin embargo, son más idóneos para plantas de mayor capacidad que justifique el mayor número de personal y requieren una alimentación más uniforme.

Figura 1. Pasos de la reacción de transesterificación



Fuente: www.miliarium.com

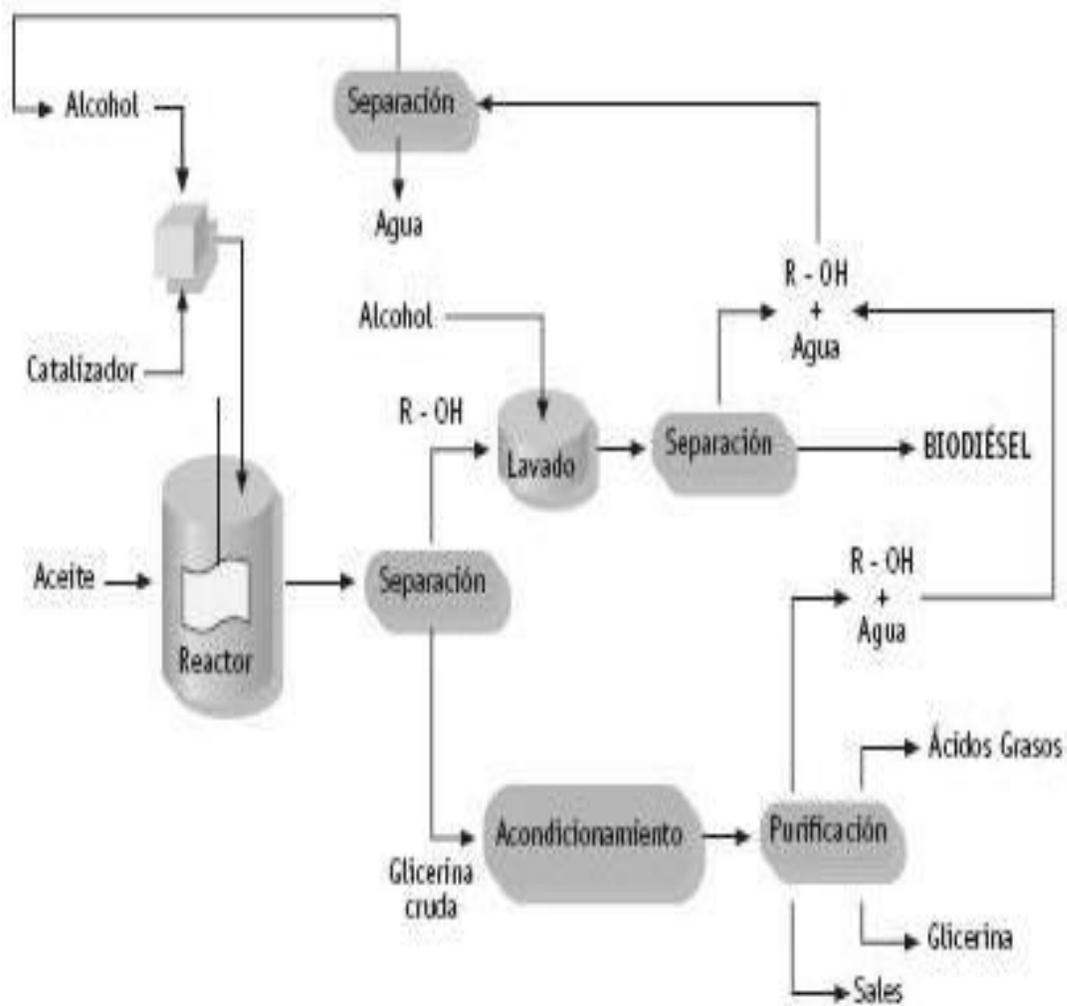
1.2.1. Proceso Discontinuo

Es el método más simple para la producción de biodiesel donde se han reportado ratios 4:1 (alcohol: triglicérido). Se trata de reactores con agitación, donde el reactor puede estar sellado o equipado con un

condensador de reflujo. Las condiciones de operación más habituales son a temperaturas de 65°C, aunque rangos de temperaturas desde 25°C a 85°C también han sido publicadas. El catalizador más común es el NaOH, aunque también se utiliza el KOH, en rangos del 0,3% al 1,5% (dependiendo que el catalizador utilizado sea KOH o NaOH). Es necesaria una agitación rápida para una correcta mezcla en el reactor del aceite, el catalizador y el alcohol. Hacia el fin de la reacción, la agitación debe ser menor para permitir al glicerol separarse de la fase éster. Se han publicado en la bibliografía resultados entre el 85% y el 94%.

En la transesterificación, cuando se utilizan catalizadores ácidos se requiere temperaturas elevadas y tiempos largos de reacción. Algunas plantas en operación utilizan reacciones en dos etapas, con la eliminación del glicerol entre ellas, para aumentar el rendimiento final hasta porcentajes superiores al 95%. Temperaturas mayores y ratios superiores de alcohol-aceite pueden asimismo aumentar el rendimiento de la reacción. El tiempo de reacción suele ser entre 20 minutos y una hora. En el gráfico 1 se reproduce un diagrama de bloques de un proceso de transesterificación en discontinuo.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel sistema continuo.



Fuente: www.miliarium.com

1.2.2. Proceso Continuo

Una variación del proceso discontinuo es la utilización de reactores continuos del tipo tanque agitado, los llamados CSTR del inglés, Continuous Stirred Tank Reactor. Este tipo de reactores puede ser variado en volumen para permitir mayores tiempos de residencia y lograr aumentar los resultados de la reacción.

Así, tras la decantación de glicerol en el decantador la reacción en un segundo CSTR es mucho más rápida, con un porcentaje del 98% de producto de reacción. Un elemento esencial en el diseño de los reactores CSTR es asegurarse que la mezcla se realiza convenientemente para que la composición en el reactor sea prácticamente constante. Esto tiene el efecto de aumentar la dispersión del glicerol en la fase éster.

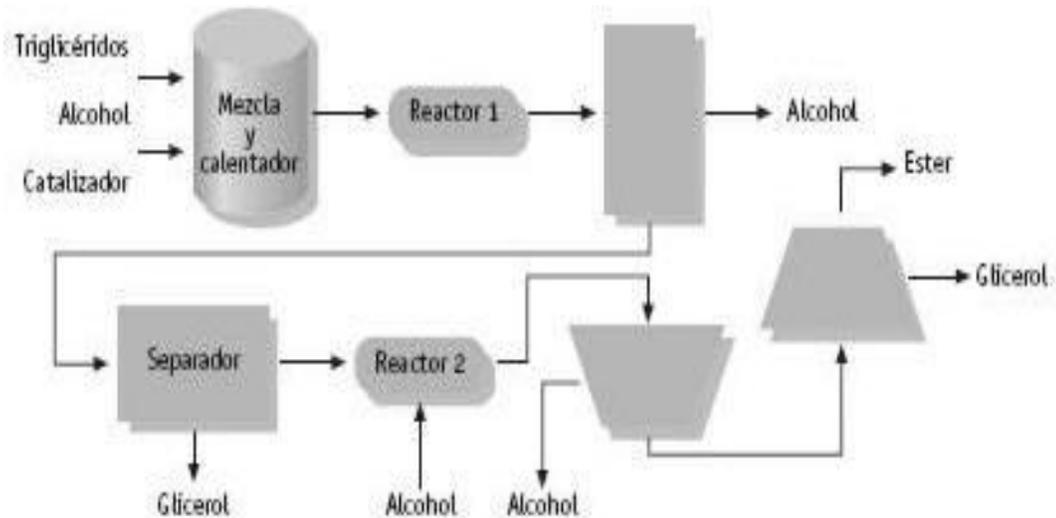
El resultado es que el tiempo requerido para la separación de fases se incrementa. Existen diversos procesos que utilizan la mezcla intensa para favorecer la reacción de esterificación. El reactor que se utiliza en este caso es de tipo tubular. La mezcla de reacción se mueve longitudinalmente por este tipo de reactores, con poca mezcla en la dirección axial. Este tipo de reactor de flujo pistón, Plug Flow Reactor (PFR), se comporta como si fueran pequeños reactores CSTR en serie. El resultado es un sistema en continuo que requiere tiempos de residencia menores (del orden de 6 a 10 minutos) –con el consiguiente ahorro, al ser los reactores menores para la realización de la reacción.

Este tipo de reactor puede operar a elevada temperatura y presión para aumentar el porcentaje de conversión.

En la figura 3 se presenta un diagrama de bloques de un proceso de transesterificación mediante reactores de flujo pistón. En este proceso, se introducen los triglicéridos con el alcohol y el catalizador y se somete a diferentes operaciones (se utilizan dos reactores) para dar lugar al éster y la glicerina.

Dentro de la catálisis heterogénea los catalizadores básicos se desactivan fácilmente por la presencia de ácidos grasos libres (FFA) y de agua que favorece la formación de los mismos. Para tratar alimentaciones con cierto grado de acidez, se prefiere la esterificación de los ácidos grasos libres con superácidos que a su vez presenten una elevada velocidad de reacción de transesterificación, lo que implica que se requiera de dos reactores con una fase intermedia de eliminación de agua. De este modo, alimentaciones con hasta un 30% en FFA se pueden esterificar con metanol, reduciendo la presencia de FFA por debajo del 1%. Esta etapa previa de esterificación se puede llevar a cabo con alcoholes superiores o glicerina que resulta atractiva en la producción de biodiesel puesto que es un subproducto del proceso.

Figura 3. Proceso continuo de transesterificación de reactores de flujo a pistón.



Fuente: www.miliarium.com

1.2.3. La glicerina subproducto del biodiesel

En la síntesis del biodiesel, se forman entre el aceite y el alcohol, normalmente metílico, ésteres en una proporción aproximada del 90% más un 10% de glicerina. La glicerina representa un subproducto muy valioso que de ser refinada a grado farmacológico puede llegar a cubrir los costos operativos de una planta productora. La glicerina es eliminada del proceso cuando se procede al lavado con agua. Sin embargo, la glicerina puede encontrarse en el biodiesel como consecuencia de un proceso inapropiado, como puede ser una insuficiente separación de la fase de glicerina o un

insuficiente lavado con agua.

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

Así, como co-producto de la producción de biodiesel se obtendría glicerina, de calidades farmacéutica e industrial. Estas glicerinas tienen un valor económico positivo y su comercialización forma parte de la rentabilidad del biodiesel. Sin embargo, la creciente oferta de glicerina está provocando ya una disminución de sus precios de venta con la consiguiente problemática de merma de rentabilidad que ello supone para el sector del biodiesel. Al nivel actual de producción, las glicerinas tienen suficientes salidas comerciales actualmente, pero conseguir una producción de biodiesel de la magnitud del objetivo fijado para el 2010 podría tener problemas en la saturación del mercado de glicerina, por lo que es especialmente relevante asegurar los canales de comercialización de este producto.

Con el aumento de la producción de biodiesel, la glicerina se enfrenta a un reto de investigación y desarrollo de cara a tener una salida para la misma debido a su aumento significativo en los próximos años. Por ello, se deben buscar nuevas salidas y aplicaciones al producto final o bien encontrar nuevas aplicaciones en las que ésta actúe como materia prima química.

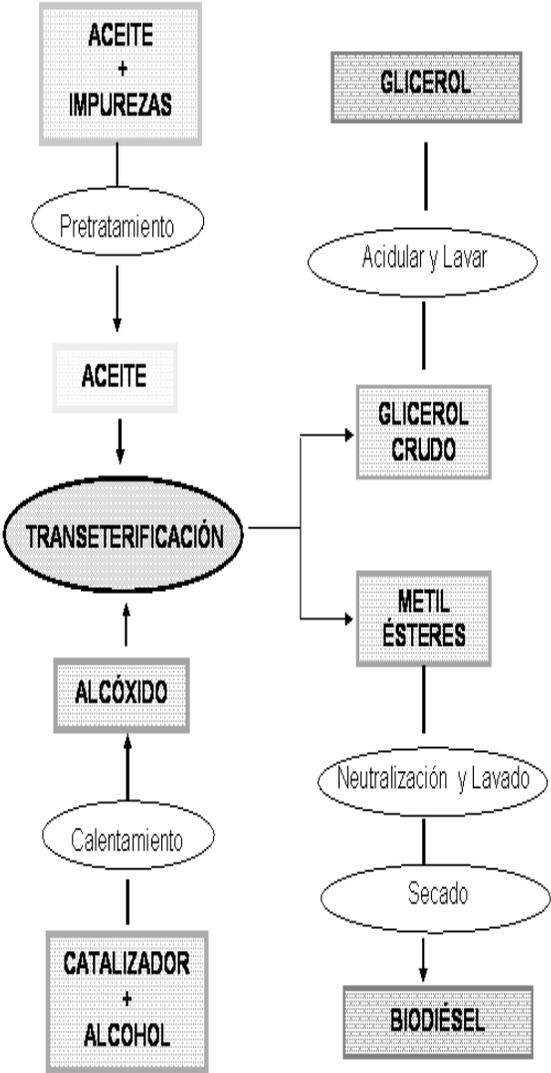
1.2.4. Transesterificación alcalina o medio básico

La transesterificación alcalina es el proceso más simple y más utilizado para obtener biodiesel. Sin embargo, requiere de un aceite con bajo contenido de ácidos grasos libres, agua y otras impurezas, o de procesos adicionales de pre tratamiento de la materia prima para asegurar esta calidad. Además, requiere de pasos posteriores de postratamiento del biodiesel para reducir su contenido de impurezas procedentes del proceso, principalmente restos de catalizador, y de postratamiento de la glicerina para purificarla parcialmente e incrementar su valor de mercado. Es por esto que otros procesos han sido desarrollados para aceites menos puros, para mejorar el rendimiento de la transesterificación, o para intentar acelerarla, pero sin embargo su uso aún no está generalizado.

La mayor parte del biodiesel se produce a partir de aceites comestibles semi-refinados con buenas características de acidez y humedad. Sin embargo, existe gran cantidad de aceites y grasas de menor calidad – y menor costo – que también podrían ser convertidos en biodiesel (por ejemplo, aceites vegetales crudos, grasas animales y aceites usados o residuales).

El problema para procesar estas materias primas baratas es que suelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres, gomas, humedad y otras impurezas que afectan el proceso de transesterificación alcalina.

Figura 4. Procedimiento general para obtención de biodiesel.



Fuente : Facultad de Ingeniería, Universidad Pontificia de Valparaiso



1.2.5. Factores que intervienen en la reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación es afectada por diferentes factores, en dependencia de las condiciones de reacción usadas, la calidad del aceite, la presencia de ácidos grasos libres, concentración y tipo de catálisis, temperatura, tiempo de reacción y la relación molar.

Presencia de ácidos grasos libres (AGL)

Un ácido graso es una molécula orgánica de naturaleza lipídica formada por una larga cadena hidrocarbonada lineal, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo, es lo mismo decir, es un ácido carboxílico de alta masa molecular.

El contenido de ácidos grasos libres y humedad son parámetros fundamentales que determinan la viabilidad del proceso de transesterificación y su presencia determina la vía catalítica por el que transcurra. Para una catálisis básica es necesario una presencia menor del 3% AGL, la alta acidez del aceite influye en una baja conversión. Aceites con más del 5% de AGL no pueden ser transesterificados por catálisis alcalina, debido a la formación de jabones los que inhibirían la separación del biodiesel de la glicerina y además llevarían a la formación de emulsiones durante el lavado. La presencia de AGL provoca la formación de jabón y dificulta la separación del producto del glicerol. Además consume catalizador reduciendo la eficiencia catalítica.

Una de las dificultades de este proceso es la presencia de agua. La

acumulación de agua que se va produciendo durante la esterificación puede llegar a detener la reacción antes de que sea completa.

En el 2004 se reportaron la catálisis ácida de aceite de soja con 1–2% de AGL con eficiente conversión del 99% después de 26 h. Para la reacción de transesterificación del aceite de fibras de arroz con metanol con un contenido de 24.5% y 49.5% a 100°C, se obtiene 62% y 73% respectivamente de metilésteres. Un incremento de la cantidad de metanol o catalizador tiene un efecto despreciable en la conversión. El agua generada durante el proceso con presencia elevada de AGL absorbe el metanol y el ácido sulfúrico lo que probablemente impide la transesterificación de los triglicéridos.

Si la grasa o aceite contiene un elevado contenido porcentual de AGL, los que pueden ser eliminados mediante la reacción de saponificación con solución de hidróxido de sodio, en cambio, para la transesterificación de AGL, puede utilizarse catálisis ácida. El proceso de transesterificación se puede llevar a cabo en dos etapas, una primera en que los AGL son convertidos en alquilésteres mediante catálisis ácida y una segunda donde es completado el proceso de transesterificación mediante catálisis básica.

1.2.6. Tipo de catálisis y concentración del catalizador

Para la conversión de los triglicéridos en alquilésteres las catálisis empleadas se clasifican en cuatro tipos: ácida, básica, enzimática y heterogénea. Entre las cuales la catálisis alcalina se produce en presencia

de hidróxido de sodio, metóxido de sodio, hidróxido de potasio o metóxido de potasio la que resulta más efectiva. Para materias primas con elevado contenido de AGL y agua es apropiada la catálisis ácida, usualmente se emplea ácido sulfúrico, sulfónico o clorhídrico. Se reporta que el hidróxido de sodio tiene mejor efecto catalítico que su metóxido correspondiente y que alcanza una mayor efectividad a 0,3 y 0,5% w /w en cebo respectivamente.

El metóxido de sodio causa la formación de diferentes subproductos principalmente formación de sales de sodio. El proceso más conocido, utilizado y hasta el momento más efectivo es el que emplea catalizadores alcalinos. Sin embargo, si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, la catálisis alcalina no es apropiada debido a que los hidróxidos reaccionan con los ácidos grasos formando jabones, lo cual reduce el rendimiento de producción de biodiesel. En este caso, se requiere otro tipo de transesterificación, o un pre tratamiento con catalizadores ácidos.

En el caso de la catálisis alcalina, es muy importante que los catalizadores se mantengan en un estado anhidro. Debe evitarse su contacto prolongado con el aire, pues éste disminuye su efectividad debido a la interacción con la humedad y con el dióxido de carbono. Los tres catalizadores cáusticos tienen ventajas y desventajas, que describiremos a continuación, y su elección depende de cada caso concreto.

Para aceites usados, en donde el contenido porcentual de AGL y de agua es mayor el tipo de catálisis es de importante significación, obteniéndose con el hidróxido de potasio los mejores rendimientos y

viscosidad de los esteres. Además ha sido evitada la formación eventual de jabones por la consecuencia de un incremento de la concentración del catalizador.

Se realizó un estudio del efecto de la concentración de NaOH en la obtención de biodiesel a partir del aceite de colza y de aceite reciclado. Los resultados muestran que el valor óptimo de concentración de NaOH para el aceites de canola es de 1,0 Wt% y para el aceite usado 1,1 Wt%. Puede concluirse que la concentración del catalizador tiene gran dependencia con el tipo de aceite usado. Utilizando 1,0 Wt% de NaOH se ha obtenido también un 89,8% de rendimientos para aceites utilizados.

Se han obtenidos rendimientos entre 88-90% de metilésteres de aceites utilizados con 0,75 Wt% de NaOH. También en la preparación directa del aceite de rapa se ha obtenido un 98,2% de conversión de los triglicéridos usando 1,1% de NaOH Wt%.

Otros investigadores en el 2006 propusieron el uso de sulfato férrico como catalizador para la esterificación ácida. Encontraron que este catalizador es ventajoso porque es sólido (catalizador heterogéneo), de manera que es fácilmente separable de los productos, es reutilizable y no contamina fuentes de agua. También es más eficiente que el ácido sulfúrico: Con una cantidad de catalizador de 2% en peso, una razón molar de 10:1 de metanol a triglicéridos (mucho menor a la necesaria cuando se trabaja con ácido sulfúrico) y una temperatura de reacción de 95° C, se alcanzó una conversión de 97% de los ácidos grasos libres de un aceite usado en

biodiesel. Además, el sulfato férrico no requiere de equipamiento costoso porque es menos corrosivo.

1.2.7. Relación molar alcohol-aceite

Una de las variables más importantes que afecta los rendimientos de los esteres es la relación molar alcohol-triglicérido. La proporción estequiométrica requerida es de tres moles de alcohol por cada mole de triglicérido para producir tres moles del éster del ácido graso y un mole de glicerol. Sin embargo, debido a la reversibilidad del proceso, se requiere un exceso de alcohol. La alta relación alcohol-aceite interfiere en la separación de la glicerina debido al incremento de su solubilidad. La proporción a utilizar depende de la materia prima que se utilice.

La transesterificación es una *reacción* reversible, es decir, se necesita un gran exceso de alcohol para forzar la reacción hacia la formación de los productos buscados, biodiesel y glicerol. Por esto, en la práctica, cuando se trabaja con metanol se recomienda una razón molar de 6:1 para asegurar una conversión máxima de los triglicéridos a esteres. En el caso del etanol, algunos estudios indican que una razón molar de 9:1 sería la más apropiada. Si la cantidad de alcohol no es suficiente, el producto contendrá monoglicéridos y diglicéridos (productos intermedios de la transesterificación), los cuales cristalizan muy fácilmente en el biodiesel y pueden causar taponamiento de los filtros y otros problemas en el motor.

1.2.8. Temperatura y tiempo de reacción

La temperatura y el tiempo de reacción son otros factores que afectan la reacción de transesterificación. La velocidad de conversión se incrementa con el tiempo de reacción. En investigaciones hechas, al cabo de un minuto se obtuvo aproximadamente un 80% de diferentes aceites y una hora después se incrementaron los rendimientos, alcanzando entre un 93% y un 97%. La relación alcohol-aceite es 6:1, con metóxido de sodio como catalizador y una temperatura de 60°C. También se realizaron estudios del efecto del tiempo de reacción en la metanólisis de grasa de res. Durante los primeros 5 minutos se observa una reacción lenta y a partir de este tiempo prosigue rápidamente. La reacción se completa al transcurso de los 15 minutos.

La transesterificación puede transcurrir a diferentes temperaturas en dependencia del tipo de aceite que se emplee. Al realizar un estudio a diferentes temperaturas se determina mediante un test ortogonal las condiciones óptimas de reacción para la transesterificación de aceites utilizados en cocinas, los mejores resultados se muestran a 50°C con una relación molar alcohol-aceite 9:1 y 1, 0 wt% de NaOH con un tiempo de 90 minutos.

Se hizo un estudio del efecto de la temperatura y el tiempo de reacción en los rendimientos de conversión de aceites en biodiesel. Para determinar el tiempo de reacción se estudia en intervalos de tiempo entre 0,75 y 24 h a 50°C con 1,25 g de catalizador para grasa de pollo utilizada y a 60°C con 2,5 g para grasas de oveja. En ambos casos los rendimientos de biodiesel

son proporcionales al tiempo de reacción.

1.3. Características físico-químicas

En la siguiente tabla se resumen las características típicas del biodiesel y del diesel de petróleo, se puede notar que los valores promedio son muy similares y el valor donde hay más marcada diferencia es en el poder calorífico y en el punto de inflamación:

Tabla 3. Comparación de valores físico-químicos para el Biodiesel y el Diesel.

Datos físico - químicos	Biodiesel	Diesel
Composición combustible	Ester metílico ac. Grasos C ₁₂ -C ₂₂	Hidrocarburo C ₁₀ -C ₂₁
Poder calorífico inferior, kcal/kg (aprox.)	9500	10800
Viscosidad cinemática, cst (a 40°C)	3,5 - 5,0	3,0 - 4,5
Peso específico, g/cm ³	0,875 - 0,900	0,850
Azufre, % P	0	0,2
Punto ebullición, °C	190 - 340	180 - 335
Punto inflamación, °C	120 - 170	60- 80
Punto escurrimiento, °C	-15 / +16	-35 / -15
Número cetanos	48 - 60	46
Relación estequiométrica Aire/comb. p/p	13,8	15

Fuente: Proceso para la producción de biodiesel, Ing. Rodolfo J. Larosa

La tabla siguiente presenta en mayor detalle los análisis más detallados realizados al biodiesel según normativas internacionales y los rangos en los cuales se debe mantener el biodiesel producido por lo que es indispensable cuando se tiene un proceso de producción de biodiesel, también contar con un laboratorio que pueda efectuar todas estas pruebas físico-químicas

Tabla 4. Propiedades físico-químicas especificadas para biodiesel según normas europeas

<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Límites</i>		<i>Método de ensayo</i>
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	
Contenido en éster ^a	% (m/m)	96,5 ^b		EN 14103
Densidad a 15 °C ^c	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad a 40 °C ^d	mm ² /g	3,50	5,00	EN ISO 3104
Punto de inflamación	°C	120	-	prEN ISO 3679 ^e
Contenido de azufre	mg/kg	-	10,0	prEN ISO 20846 prEN ISO 20884
Residuo de carbón (en 10% de residuo destilado) ^f	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Índice de cetano ^g		51,0		EN ISO 5165
Contenido de cenizas sulfatadas	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Contenido en agua	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Contaminación total ^h	mg/kg	-	24	EN 12662
Corrosión de la tira de cobre (3h a 50 °C)	Clasificación		Clase 1	EN ISO 2160
Estabilidad a la oxidación 110 °C	Horas	6,0	-	EN 14112
Índice de ácido	mg KOH/g		0,50	EN 14104
Índice de yodo	g de yodo/100g		120	EN 14111
Éster de metilo de ácido linoléico	% (m/m)		12,0	EN 14103
Ésteres de metilo poli-insaturados ⁱ (≥ = a 4 dobles enlaces)	% (m/m)		1	
Contenido de metanol	% (m/m)		0,20	EN 14110
Contenido en monoglicéridos	% (m/m)		0,80	EN 14105
Contenido en diglicéridos	% (m/m)		0,20	EN 14105
Contenido en triglicéridos ^j	% (m/m)		0,20	EN 14105
Glicerol libre ^j	% (m/m)		0,02	EN 14105 EN 14106
Glicerol total	% (m/m)		0,25	EN 14105
Metales del grupo I (Na+K) ^k	mg/kg		5,0	EN 14108 EN 14109
Metales del grupo II (Ca+Mg) ^l	mg/kg		5,0	prEN 14538
Contenido de fósforo	mg/kg		10,0	EN 14107

Fuente: www.miliarium.com

1.4. Emisiones del biodiesel

El biodiesel al ser un compuesto químico combustible también genera emisiones hacia el medio ambiente aunque éstas son

sustancialmente menores que las emisiones del diesel de petróleo. A continuación se presentan las principales emisiones para un combustible y su relación con la combustión del biodiesel:

Monóxido de carbono (CO): la emisión durante la combustión del biodiesel en motores diesel es del orden del 50% inferior (comparada con aquella que produce el mismo motor con combustible diesel). Es conocida la toxicidad del monóxido de carbono sobre todo en las ciudades.

Dióxido de azufre (SO₂): no se produce emisión de dióxido de azufre por cuanto el biodiesel no contiene azufre. El dióxido de azufre es nocivo para la salud humana así como para la vegetación.

Material particulado: esta emisión con el empleo del biodiesel se reduce del 65% respecto del combustible diesel. Las partículas finas son nocivas para la salud.

Productos orgánicos aromáticos: el biodiesel no contiene productos aromáticos (benceno y derivados) siendo conocida la elevada toxicidad de los mismos para la salud.

Balance de dióxido de carbono (CO₂): el dióxido de carbono emitido durante la combustión del biodiesel es totalmente reabsorbido por los vegetales. Por lo tanto el biodiesel puede ser considerado un combustible renovable.

1.5. Parámetros de calidad

Es muy importante fijar estándares de calidad para el biodiesel, teniendo en cuenta que, como se ha mostrado arriba, las propiedades del biodiesel varían de acuerdo con su origen (materia prima). Además, como se mostrará más adelante, en el proceso de fabricación del biodiesel se pueden formar contaminantes en el producto final que deben ser eliminados para que el biodiesel producido tenga las características adecuadas a su uso en motores diesel. Esta es la razón principal por la cual los fabricantes de vehículos tienen una postura cautelosa para mantener la garantía de sus productos para uso de B100 o mezclas con porcentajes grandes de biodiesel.

Los principales estándares de calidad son las normas ASTM D6751-03 empleada en los Estados Unidos y la norma EN 14214 usada en la Unión Europea. A pesar de tener muchos puntos en común, estas dos normas también presentan algunas diferencias importantes. La norma ASTM D6751 es considerada adecuada para mezclas B20 o menores. Para mezclas con mayores porcentajes de biodiesel, o para uso de B100, no existe aún consenso entre los fabricantes de biodiesel, de vehículos, de sistemas de inyección y usuarios en los Estados Unidos.

Como el biodiesel se propone a sustituir el diesel de petróleo, los estándares de calidad

Para biodiesel (ASTM, EU, u otras) incluyen propiedades típicas de diesel, y otras específicas para este nuevo combustible, definiendo valores máximos, mínimos o el rango permitido para cada característica, así como el método de medición de cada característica. Las normas ASTM D6751 y EN14241 difieren en muchos aspectos: ni todas las propiedades son comunes y, aunque las propiedades pueden estar en ambas normas, los métodos de medida pueden ser diferentes.

Para fines legales, sólo es considerado como biodiesel el producto que atienda todos los requisitos de la norma en uso en el país. Por ejemplo, el biodiesel de soya (aceptado como tal en Estados Unidos) no se califica como biodiesel en la Unión Europea por no atender a todas las características de la norma europea.

Las propiedades de las que constan las normas y especificaciones de calidad están asociadas a determinadas características que deben ser controladas para que la calidad del producto sea garantizada al consumidor:

El *flash point* mínimo es definido para la seguridad del manejo del producto (inflamabilidad) y para garantizar que el biodiesel no posea mucho metanol libre, que hace caer el *flash point* (0,5% de metanol hace el *flash point* caer debajo de 55°C). En la norma europea, la máxima cantidad de metanol es definida de forma explícita.

La cantidad de agua y sedimentos indica presencia de agua contaminando el combustible, lo que puede causar corrosión y ambiente para micro-organismos. La oxidación del biodiesel hace aumentar la cantidad de sedimentos, por lo que esta propiedad puede ser usada para

evaluar si el biodiesel está viejo por oxidación. La norma europea mide separadamente agua, contaminantes y estabilidad a la oxidación.

La viscosidad es muy importante para determinar el tamaño promedio de las gotas que forman el chorro de combustible inyectado en el cilindro del motor. Si la forma del chorro y tamaño promedio de gotas de combustible es muy diferente de aquellos para el cual el motor fue proyectado, habrá problemas en la combustión, formación de depósitos, y el aceite de lubricación será contaminado por esteres u otros productos de combustión incompleta.

La cantidad de cenizas sulfatadas indirectamente mide la cantidad de álcalis del catalizador u otros compuestos que producen depósitos en el inyector o en el sistema de combustible.

La cantidad total de azufre limita las emisiones de anhídridos de azufre (SO_x) producidos en la combustión y que en la atmósfera producen ácidos de azufre.

La corrosión al cobre indica si existen problemas con componentes de cobre o sus aleaciones en el sistema de combustible del motor.

El número de cetano es una medida de la calidad de ignición y un indicador del comportamiento del combustible para empezar la combustión. Mayores números de cetano mejoran el arranque en frío, disminuyen los humos blancos de arranque, mejoran la durabilidad del motor y disminuyen el nivel de ruido del motor.

El punto de enturbiamiento y otros indicadores de operación en bajas temperaturas (Cold Flow Plug Point – CFPP / Low Temperature Flow Test – LTFT) muestran las menores temperaturas ambientes donde el biodiesel puede operar sin calentamiento.

Los residuos de carbón miden la tendencia a formación de depósitos de carbón en el inyector y en la culata del motor.

El número de acidez indica el aumento de la existencia de ácidos grasos libres en el biodiesel en caso de mala calidad del producto o de degradación por oxidación.

Los valores altos de glicerina libre y total indican problemas de separación entre el biodiesel y la glicerina, así como conversión incompleta (mono, di y triglicéridos que no reaccionaron). La norma europea presenta de forma explícita los contenidos de glicéridos no transformados (mono, di y triglicéridos).

El contenido de fósforo es una medida indirecta de la eficacia de la conversión. El fósforo puede arruinar los catalizadores de los motores.

La determinación del punto de 90% recogido en la destilación ayuda a prever el comportamiento de la combustión, porque las gotas líquidas del biodiesel que entran en el motor deben evaporarse y mezclarse con el aire caliente de la compresión para entonces quemarse.

La lubricidad del biodiesel es mucho mayor que la del diesel de petróleo con baja cantidad de azufre. En realidad, la adición de un 2% de

biodiesel en el diesel mejora su lubricidad de forma importante. La lubricidad es importante porque el sistema de inyección posee alta precisión mecánica y es lubricado por el combustible.

Tabla 5. Comparativo de normas de calidad para Estados Unidos y Europa.

ESPECIFICACIONES DE DIESEL Y BIODIESEL: EUA Y UE					
Propiedad	Norma	Estados Unidos		Unión Europea	
		ASTM 975 – 04c	ASTM 6751-03a	EN 590: 2004	EN 14241: 2003
	unidad	diesel	biodiesel	diesel	biodiesel
Flash point	°C	38 (n.1D) 52 (n.2D)	130	55	120
Agua y sedimentos	% vol	0,05	0,05	---	---
Agua (max)	mg/kg	---	---	200	500
Contaminación total (max.)	mg/kg	---	---	24	24
Destilación (90% o 85%EU)	°C	<288 (n.1) 282-338	<360	<350	---
Viscosidad cinemática	mm ² /s	1,3 – 2,4 1,9 – 4,1	1,9-6,0	2,0 – 4,5	3,5- 5,0
Densidad	kg/m ³	---	---	820 - 845	860 – 900
Contenido de ésteres (min)	%vol	---	---	< 5	> 96,5
Cenizas (% peso, max.)		0,01	---	0,01	---
Cenizas sulfatadas (% peso, max.)		---	0,02	---	0,02
Azuñe (% peso, max.)		0,05 o 15ppm	0,05 o 15ppm	50 o 10 ppm	10ppm
Corrosión al cobre		< n.3	< n.3	clase 1	clase 1
Número de cetano (min.)		40	47	51	51
Índice de cetano (min.)		> 40	---	46	---
Aromaticidad (% vol max.)		35	---	---	---
PAH (% peso max.)		---	---	11	---
Uno de estos: Punto de enturbamiento CFPP / LTFT	°C,	regional	reportar	local & estación	local & estación
Residuo de carbón (% peso max.)		0,15 (n.1) 0,35 (n.2)	0,05	0,30	0,30
Número de acidez	mg KOH/g	---	0,80	---	0,50
Estabilidad a la oxidación	horas	---	---	---	> 6
Glicerina libre (% peso max.)		---	0,020	---	0,020
Glicerina total (% peso max.)		---	0,240	---	0,250
Contenido de fósforo (% peso max.)		---	0,001	---	0,001
Número de yodo		---	---	---	< 120
Metanol (% peso max)		---	---	---	0,20
Metil-linolenato (% peso max)		---	---	---	12,0
Éster poli-insaturados (% peso max)		---	---	---	1,0
Mono-glicéridos (% peso max)		---	---	---	0,80
Di-glicéridos (% peso max)		---	---	---	0,20
Triglicéridos (% peso max)		---	---	---	0,20
Na + K	mg/kg	---	---	---	5,0
Ca + Mg	mg/kg	---	---	---	5,0
Lubricidad	µm	< 520	---	< 460	---

Fuente: ASTM 6751 y EN 14241

CAPÍTULO 2. PRODUCCIÓN DE PLANTAS OLEAGINOSAS

2.1. Importancia mundial

Las plantas oleaginosas constituyen uno de los grandes grupos de cultivos de mayor producción, investigación, experimentación y comercialización mundial; precisamente por ser plantas útiles, cuyas semillas, granos o frutos tienen un alto porcentaje de ácidos grasos y proteínas de alta calidad.

Diez cultivos en la actualidad son los de mayor producción y cotizados en los mercados de todo el mundo; a saber: soya, canola, cártamo, algodón, girasol, olivo, maíz, lino, cacahuete y ajonjolí.

2.2. Origen y desarrollo

Cinco de las diez oleaginosas más importantes en el comercio mundial: el maíz, el algodón, el cacahuete, el girasol y, quizá una variedad de la colza o canola, conocida como alpiste; son plantas originarias de Mesoamérica, región geográfica y cultural que abarca México y parte de Centroamérica, lo cual significa que México cuenta con tierras que presentan condiciones agroecológicas adecuadas para el cultivo de oleaginosas y cuenta también con germoplasma indispensable para la conservación e hibridación de nuevas especies. No obstante, aún con la ventaja que tiene México de ser un país con oleaginosas silvestres, el

consumo de aceite líquido da inicio durante la Colonia, y la extracción comercial de aceite prácticamente inicia en el siglo XIX.

Cada uno de los cultivos de plantas oleaginosas se realiza en condiciones agroecológicas específicas, y suelen existir marcadas diferencias socioeconómicas entre los agentes que los producen. La mayor parte de estos cultivos son anuales, tienen respuesta relativamente rápida ante cambios en el entorno económico y, la mayoría de los productos alimenticios que se fabrican con frutos y semillas oleaginosas pueden utilizar casi cualquier tipo de oleaginosa, sin que se presenten cambios en la composición, sabor o textura del producto; es decir, son intercambiables o de fácil sustitución.

Estas tres características del cultivo: agroecológicas, económicas y fácil sustitución, hacen de las oleaginosas productos necesarios en la economía mundial, sumamente interesantes y atractivos para productores, industriales y consumidores; pero también, presentan cierto grado de riesgo en toda la cadena productiva, porque entran en un mercado de producción, distribución y precios muy competitivos.

Los cuadros a continuación muestran datos por lustros desde 1965 hasta el año 2005 sobre la producción mundial de las principales oleaginosas por producción total mundial, por tipo de oleaginosa así como la división de sus usos para los años en mención.

Figura 5. Producción mundial de oleaginosas 1965-2005.

Cuadro 1

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE OLEAGINOSAS
Perennes: palma, copra y olivera. Anuales: soja, colza, girasol y algodón

Año	Prod. Total (1000 ton.)		Prod. / capita		Área de cosecha (1000 ha)		Productividad (ton./ha)	
	Perenne	Annual	Perenne	Annual	Perenne	Annual	Perenne	Annual
1965	47015	83930	14	25	12116	72855	3,88	1,15
1970	48994	95888	13	26	13344	80634	3,67	1,19
1975	61603	118918	15	29	14951	90416	4,12	1,32
1980	73309	146667	16	33	18175	108394	4,03	1,35
1985	88976	189910	18	39	21469	116090	4,14	1,64
1990	112236	209856	21	40	23528	124933	4,77	1,68
1995	147424	244092	26	43	26321	142775	5,60	1,71
2000	188123	280414	31	46	28855	153249	6,52	1,83
2005	242811	352201	38	55	30881	177071	7,86	1,99

Fuente: Faostat, 2005.

Figura 6. Producción mundial de aceites y grasas años 2001-2005

Cuadro 2

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ACEITES Y GRASAS
(Miles de toneladas)

Aceite	2001	2002	2003	2004	2005
Aceite de soya	27829	29856	31284	30730	33540
Aceite de palma	23999	25424	27920	30920	33610
Aceite de colza	13723	13286	12548	14910	16040
Aceite de girasol	8191	7608	8915	9410	9730
Sebo y grasas animales	7693	8073	8029	8108	8186
Aceite de maní	5139	5162	4526	4750	4510
Aceite de algodón	4051	4233	3964	4410	5020
Aceite de palm kernel	2941	3033	3314	3580	3960
Aceite de coco	3511	3155	3295	3070	3250
Aceite de oliva	2761	2718	2903	2978	2730
Aceite de maíz	1962	2016	2015	2015	2055
Otros aceites y grasas	15826	16000	16667	16267	15569

Fuente: Oil World Monthlies 2006 y Oil World Annual 2005.

Figura 7. Usos de los aceites vegetales años 2000-2007.

Cuadro 5
USOS DE LOS ACEITES VEGETALES

Años	Alimentación	Usos industriales
	Millones de toneladas	Millones de toneladas
00/01	68	7
01/02	69	7
02/03	72	8
03/04	75	10
04/05	79	12
05/06	83	15
06/07	86	17

Fuente: USDA Estimates, 2006

2.3. Clasificación de plantas oleaginosas

Existe una gran variedad de oleaginosas que se utilizan de muy diversas maneras; por ejemplo la aceituna, las semillas de girasol, del cacahuate y de la almendra se disfrutan en forma natural; o bien, se les ha encontrado gran cantidad de usos, como la fibra textil del algodón y del lino, como tintura en el caso del cártamo o los aceites para combustibles. Sin embargo, el mayor provecho de las oleaginosas es para la obtención de aceites y mantecas vegetales para cocinar, elaborar pan, aderezos, frituras y nutraceuticos. Con las oleaginosas se preparan pastas para la alimentación de animales de corral de sistemas acuícolas. Gracias a tecnologías innovadoras, con las oleaginosas se han creado productos y mercados para muchos subproductos comestibles y no comestibles que incluyen compuestos de uso farmacéutico, jabones, agroquímicos, barnices, plásticos y combustibles para automotores como el biodiesel.

Cualidades y funcionalidad

Las plantas oleaginosas son muy valiosas para el ser humano y se distinguen del resto de las plantas comestibles, como los cereales, los granos y los tubérculos, porque sus frutos y semillas contienen un alto porcentaje de ácidos grasos o aceites comestibles, indispensables para la nutrición del ser humano, así como proteínas de alta calidad con la que fabrican pastas que se utilizan en la alimentación animal.

2.3.1. La Canola

2.3.1.1. Origen

Esta planta es conocida como colza o mostaza en español e italiano; kolsa en alemán; rapeseed en inglés; navet oleifere en francés, y canola en Canadá, estos son algunos de los nombres que han dado a esta planta, en la vida del ser humano. En México se le conoce como vainita, nabillo, mostacilla, nabo aceitero, y muchos agricultores la identifican como una "mala hierba" en los cultivos de trigo, maíz, alfalfa, cebada y avena; aunque también se le considera como planta silvestre, a veces invasora en terrenos descuidados.

El origen del cultivo de esta planta probablemente tuvo lugar en Asia Menor; más tarde practicado en el Mediterráneo, de tal forma que, griegos y romanos cultivaban esta planta con fines alimenticios y medicinales.

2.3.1.2. Cultivo de la canola

La canola es una planta que se adapta a climas templados y fríos y soporta temperaturas bajo cero grados en etapa de crecimiento, además, en comparación con el maíz, requiere bajas cantidades de agua, para obtener rendimientos de grano aceptables el cultivo de canola requiere sólo de 500 a 600 milímetros durante su ciclo de crecimiento.

2.3.1.3. Usos

En México el uso de esta planta o de su antecesor el nabo silvestre, ha sido como hortaliza, de la cual se consumen las ramas tiernas como inflorescencias corazones, y como vaina para alimento de los pájaros.

2.3.1.4. Producción mundial

Tabla 6. Principales países productores de canola año 2007(miles de toneladas).

País	2007
China	10,375
Canadá	8,864
India	7,097
Alemania	5,320
Francia	4,554
Resto	13,269
Total	49,479

Fuente: Byron López Maldonado

Canola council ha hecho una evaluación para estudiar el impacto de la producción y el uso Biodiesel en todas las etapas de su producción y uso. Encontrando que la producción de biodiesel utilizando como materia prima la canola se reduce la dependencia de la energía fósil en un 85% por unidad de gasóleo fósil desplazada. La producción y el uso de biodiesel también reducen las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 85 y un 110% por unidad de gasóleo fósil desplazada.

Su más notable impacto sobre la calidad del aire es la eliminación de las emisiones tóxicas. Su uso ha también demostrado que reduce las emisiones de partículas, monóxido de carbono y los hidrocarburos.

2.3.2. El Girasol

2.3.2.1. Origen

El girasol es nativo de Norteamérica. Se originó en el suroeste de los Estados Unidos y Norte de México, territorio en el cual aún crece en forma silvestre.

El tipo de planta de un sólo capítulo, con semillas muy semejantes a las del girasol cultivado, fue desarrollado y sembrado por los grupos indígenas que habitaban estas regiones desde el año 3000 a.C. e incluso existen evidencias de que pudo haberse domesticado antes de que el maíz fuera introducido a este territorio.

2.3.2.2. Descripción

El género *Helianthus* es altamente diversificado, se compone de 49 especies y 19 subespecies con 12 especies anuales y 37 perennes, las cuales representan una considerable variabilidad que puede utilizarse para el mejoramiento genético de varias características agronómicas e industriales de la especie cultivada.

2.3.2.3. Cultivo del girasol

El girasol se adapta bien en altitudes de los 0 a los 1,900 msnm. Las necesidades de agua varían de 600 a 1,000 milímetros, dependiendo del clima y la duración del período vegetativo total. Se desarrolla en una amplia gama de suelos, por lo que puede prosperar en diferentes tipos de texturas, a excepción de las extremas como la arenosa y la arcillosa.

2.3.2.4. Usos

Actualmente, se obtienen dos principales productos, la harina y el aceite, la primera es utilizada en la industria de alimentos ya que su contenido de proteína oscila entre el 40 y 50 por ciento, lo que la hace atractiva para la alimentación del ganado. Por otro lado, el aceite de girasol es uno de los aceites con mayores beneficios a la salud, por su alto contenido de grasas poli insaturadas.

Otros usos de la semilla de girasol son la elaboración de jabones, cosméticos, detergentes y hasta combustibles en algunos países.

2.3.2.5. Producción mundial

Tabla 7. Principales países productores de aceite semillas de girasol año 2007.

País	2007
Fed	
Rusia	5,006
Ucrania	3,411
Argentina	2,440
India	2,350
China	1,020
Resto	7,775
Total	22,003

Fuente: Byron López Maldonado

2.3.3. Ricino

El aceite de ricino, en muchas ocasiones mal traducido como *aceite de castor* por su denominación en inglés (*castor oil*), se obtiene a partir de la planta *Ricinus communis*, que contiene aproximadamente un 40-50 % del aceite. El aceite a su vez contiene el entre el 70-77 % de los triglicéridos del ácido ricinoleico. A diferencia de las propias semillas, no es tóxico.

Finalmente, el aceite de ricino es un producto que forma parte de la fabricación de plásticos, lacas, pinturas, lubricantes y cosméticos.

Antiguamente se utilizaba también como combustible o como añadido a la gasolina en competición.

Actualmente se baraja su aplicación en la elaboración de biodiesel (biocombustible) y se utiliza como lubricante en motores de explosión de aviones de aeromodelismo y coches de radiocontrol siendo la mezcla aproximadamente un 20 por ciento aceite de ricino, un 10 por ciento de nitro metano y el 70 por ciento restante metanol (alcohol de quemar, o también llamado alcohol metílico).

Es la mejor planta para crear biodiesel, aseguran especialistas brasileños que investigan sus propiedades desde hace años. El aceite de ricino ya tiene un mercado internacional pues es utilizado como insumo en unas 700 aplicaciones.

En la búsqueda de combustibles menos contaminantes, el uso del aceite de ricino (*Ricinus communis*) tiene beneficios ambientales y técnicos y representa una gran oportunidad de desarrollo para zonas áridas y empobrecidas, como el nordeste de Brasil.

El aceite que se extrae de las semillas de esta planta ya tiene un mercado internacional creciente, asegurado por 700 aplicaciones que incluyen usos medicinales y cosméticos y sustitución del petróleo en plásticos y lubricantes. El producto también se utiliza en la producción de fibra óptica, vidrio a prueba de balas y prótesis óseas. Además, es indispensable para impedir la congelación de combustibles y lubricantes de aviones y cohetes espaciales, a bajísimas temperaturas.

El aceite de ricino es el mejor para producir biodiesel, por ser el único soluble en alcohol, y no requerir calor y el consecuente gasto de energía que exigen otros aceites vegetales en su transformación a combustible, argumentó el investigador.

El biodiesel, químicamente denominado éste, resulta de la reacción de cualquier ácido graso con alcohol etílico (etanol) o metílico (metanol). Europa y Estados Unidos ya consumen casi dos mil millones de litros anuales de biodiesel, hecho sobre todo de colza o soja y metanol.

La planta es de fácil cultivo y resistente a la escasez de agua. Por eso es ideal para el extenso y semiárido nordeste brasileño. Allí, se dispone de casi cuatro millones de hectáreas apropiadas, donde se alcanzaría un rendimiento de hasta 1,5 toneladas de semillas de ricino por hectárea, mientras el promedio mundial es de apenas 750 kilogramos.

Sin embargo, conquistar el mercado de biodiesel requiere dos aspectos clave: la mecanización de la cosecha y superar las grandes oscilaciones de precios.

Brasil, durante décadas el mayor productor y exportador mundial de aceite de ricino, cayó al tercer lugar, superado por India y China. Su producción de 500 mil toneladas a fines de los años 80 cayó a menos de 120 mil el año pasado.

2.4. Principales Materias primas utilizadas para la producción de biodiesel

La fuente de aceite vegetal para climas fríos suele ser la colza, ya que es una especie con alto contenido de aceite y su rápida adaptación. Sin embargo existen otras variedades con mayor rendimiento por hectárea. También se pueden utilizar aceites reciclados, siendo una materia muy barata, que en otro caso serían residuales contaminantes de gran impacto en los ecosistemas naturales.

Además, existen otras materias primas en las cuales se pueden extraer aceite para utilizarlas en el proceso de producción de Biodiesel. Las materias primas más utilizadas son la jatrofa, Girasol, Colza, Soya.

2.4.1. Jatrofa (*Jatropha curcas*)

La *Jatropha curcas*, conocida como "piñón de tempate" o "jatrofa", es una *Euphorbiacea* que sus semillas rinden entre un 20 y 40 % de aceite no comestible, debido a la presencia de compuestos anti-nutricionales tóxicos. Este aceite está constituido por ácidos grasos saturados y no saturados, presenta un 14.1% ácido palmítico, 6.7% de ácido esteárico y dentro de los ácidos insaturados el ácido oleico representa el 47% y 31.6 % el ácido linoleico.

El aceite de la jatropha puede ser utilizado directamente como combustible en lámparas y motores de combustión o se puede transformar en *biodiesel*, por lo que es considerada como un potencial sustituto del

diesel. No es recomendable el uso directo del aceite obtenido de la *Jatropha* por su mayor viscosidad con relación al diesel y menor tiempo de iniciación de la combustión. Por estas razones el uso directo no ha sido ampliamente probado por largos períodos.

Un estudio teórico y experimental de la reacción de transesterificación del aceite de la *Jatropha curcas* para la producción de biodiesel realizó modelaciones mecanocuánticas para la simulación del mecanismo de reacción, considerando los puntos de mayor energía durante la reacción, así como la estructura de transición. Describen las etapas por las que transcurre el proceso. Para el proceso experimental purifican, lavan y desodoran el aceite obtenido de la especie y utilizan 100g calentando hasta 45°C, utilizando una solución catalítica básica de 0,8% disuelta en alcohol. Al transcurrir 60 minutos de reacción separan el glicerol del medio de reacción. El catalizador y el alcohol remanente son eliminados mediante lavados con agua caliente y solución de ácido cítrico al 15%w/w. Finalmente los ésteres fueron secados durante 1 hora a 130°C bajo corriente de nitrógeno.

En la revista *Biochemical Engineering* se publica un artículo en el 2008 relacionado con la producción enzimática de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha*, realizando un estudio comparativo entre células inmovilizadas y las enzimas lipasas comerciales. Las cepas fueron adquiridas en laboratorios especializados comerciales. Partieron de 5g de aceite y una relación molar alcohol-aceite (3:1) y 0,2 g de lipasas para la conversión completa de los triglicéridos en ésteres metílicos. Los alquilésteres fueron analizados por cromatografía capilar.

En el 2007, se habían realizados trabajos relacionados con la preparación de biodiesel a partir del aceite de *jatropha* utilizando enzimas lipasas, partiendo de 0,5 g de aceite y etanol en una relación de 1:4 con 0,05 g de enzimas incubadas a 45°C. Se publican enzimas que producen mayores rendimientos y grado de influencia del alcohol empleado.

2.4.2. Girasol

También llamado girasol, *calom*, *jáquima*, *maravilla*, *mirasol*, *tlapololote*, *maíz de tejaes* una planta herbácea de la familia de las Asteráceas, cultivada como oleaginosa y ornamental en todo el mundo. El girasol contiene hasta un 58% de aceite en su fruto. El aceite de girasol se utiliza para cocinar. También sirve para producir biodiesel. La harina que queda luego de realizada la extracción del aceite se utiliza como alimento para el ganado.

Se ha estudiado la optimización de las condiciones de reacción de transesterificación a partir del aceite de girasol para la producción de biodiesel. Se analizan las variables, temperatura, proporción de reaccionantes y métodos de purificación con el propósito de obtener una alta calidad del biodiesel y máximos rendimientos en el proceso.

Se realiza un estudio cinético de la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres a partir del aceite de girasol con metanol en presencia de ácido sulfúrico. También se realiza un estudio cinético de la metanólisis a temperaturas por debajo de 30°C.

Se ha obtenido un rendimiento del 97,1% de los metilésteres en condiciones óptimas de reacción, relación molar alcohol-aceite 6:1, 60°C de temperatura y una concentración catalítica de NaOH de 1% w/w.

A partir del aceite de girasol se han hecho estudios comparativos de la reacción de transesterificación con etanol y metanol mediante agitación mecánica y ultrasónica.

2.4.3. Colza

La colza es una planta de cultivo de la familia de las Brassicaceae con flores de color amarillo brillante.

2.4.4. Soya

La soja o soya es una especie de la familia de las leguminosas (Fabaceae) cultivada por sus semillas, de alto contenido en aceite y proteína. El grano de soja y sus subproductos (aceite y harina de soja, principalmente) se utilizan en la alimentación humana y del ganado.

Se realiza el estudio de diferentes factores que intervienen en la conversión del aceite en etilésteres, tales como la temperatura, relación molar etanol-aceite, acción enzimática y concentración de la enzima. La catálisis enzimática constituye una potencial alternativa en la reacción de transesterificación por su menor impacto medioambiental.

2.4.5. Palma aceitera

La palma pertenece a la familia palmaceae. El aceite de palma contiene 43% de grasa mono saturada y 13% poli saturada y además vitamina K y Magnesio.

Las condiciones de transesterificación para la obtención de biodiesel a partir del aceite de palma han sido estudiadas en condición catalítica ácida. Se determina la relación alcohol-aceite, la proporción del catalizador y la temperatura de reacción para alcanzar los mayores rendimientos .

2.4.6. Microalgas como fuente de biodiesel

Se ha reportado que diversos microorganismos tales como las levaduras *Cryptococcus curvatus*, *Cryptococcus albidus*, *Lipomyces lipofera*, *Lipomyces starkeyi*, *Rhodotorula glutinis*, *Rhodospiridium toruloides*, *Trichosporom pullulan* y *Yarrowia lipolytica* y bacterias del grupo actinomicetos tales como *Mycobacterium* spp., *Rhodococcus* spp. y *Nocardia* spp., son capaces de sintetizar triglicéridos intracelulares, bajo ciertas condiciones de cultivo, hasta en un 80% de su peso seco utilizando diversas fuentes de carbono (azúcares, ácidos orgánicos, alcoholes y aceites entre otras) y diferentes subproductos y/o residuos industriales o agrícolas (suero de leche, hidrocarburos, aceites vegetales, melazas de caña de azúcar, salvado de trigo, desechos de frutas y verduras.). El problema al utilizar este tipo de microorganismos, es el costo de producción, dado que requieren un alto consumo de oxígeno. En contraste, en las últimas décadas se ha destacado que las microalgas

representan una alternativa más conveniente que cualquier otro tipo de organismo para la producción de triacilglicéridos y su conversión a biodiesel, ya que algunas especies oleaginosas, siendo organismos fotosintéticos, sólo requieren energía solar, agua, CO₂ y algunas sales para producir muy altos rendimientos de biomasa rica en lípidos. De hecho, son los organismos fotosintéticos más eficientes, absorben más CO₂ y liberan más O₂ que cualquier planta, crecen extremadamente rápido y llegan a acumular grandes cantidades de diversos productos. Algunas microalgas doblan su biomasa en 24 h y el tiempo de duplicación de biomasa durante la fase exponencial puede ser tan corto como 3.5 h. De manera más específica, los beneficios que se obtienen al usar microalgas para la producción de biodiesel son:

a) Las microalgas tienen un rendimiento de aceite mucho mayor que cualquier cultivo convencional. Es de 10 a 20 veces mayor que el derivado del aceite de palma y de 200 a 400 veces mayor que el derivado del aceite de soya (Fig. 8).

b) Sólo este bioenergético tiene una verdadera huella ecológica pequeña, dado que requiere una superficie de 1-2 órdenes de magnitud menores en comparación a los cultivos convencionales o los árboles. Requiere de 1.5 a 3.2 millones de hectáreas (M has) para satisfacer el 50% de las demandas de energéticos de transportación en EEUU. En contraste, la soya, principal fuente de biodiesel en EEUU requiere de 330 a 450 M has para un propósito similar. En México, se ha estimado que sólo se requiere el 1% de la superficie total del país, para cubrir el 100% de la demanda actual de diesel de petróleo.

c) Con biodiesel de microalgas cultivadas en lagunas abiertas (LA), sólo se requieren 200,000 has para producir 1 cuatrillón de BTU. En contraste, se requieren aproximadamente 40 millones de has si se utiliza etanol derivado de maíz o 20 millones de has si se utiliza biodiesel derivado de frijol de soya.

d) Las microalgas oleaginosas pueden ser cultivadas en agua de mar o en agua salobre, disminuyendo así la presión sobre el agua dulce requerida para la producción de alimento. Algunas otras especies aisladas de agua dulce, pueden crecer en aguas residuales, también eliminando la competencia por el uso de agua para la agricultura.

e) Las microalgas son excelentes captadoras de CO₂. Por cada 100 ton de microalgas producidas, se consumen 183 ton de CO₂.

f) Con relación a la emisión de gases invernadero, es de los pocos bio-energéticos con un valor negativo. Es decir, no se produce CO₂ durante el ciclo de vida de producción y el valor de este parámetro para microalgas (-183 kgCO₂/MJ) es el más negativo respecto a los otros bio-energéticos con valores negativos (etanol a partir de pastos o de residuos celulósicos). En contraste, el diesel a partir de fuentes fósiles produce 83 kgCO₂/MJ y el etanol a partir de maíz produce 81-85 kgCO₂/MJ.

2.5. Rendimiento de aceite de los compuestos oleaginosos

Actualmente se nota que el mayor rendimiento para la producción de aceite de origen natural renovable, se da en el cultivo de microalgas. Estas son las que presentan el mayor rendimiento de aceite por hectárea,

siendo en un futuro próximo el más prometedor cultivo para la producción de biodiesel.

Figura 8. Productividad de aceite vegetal por hectárea para los distintos cultivos

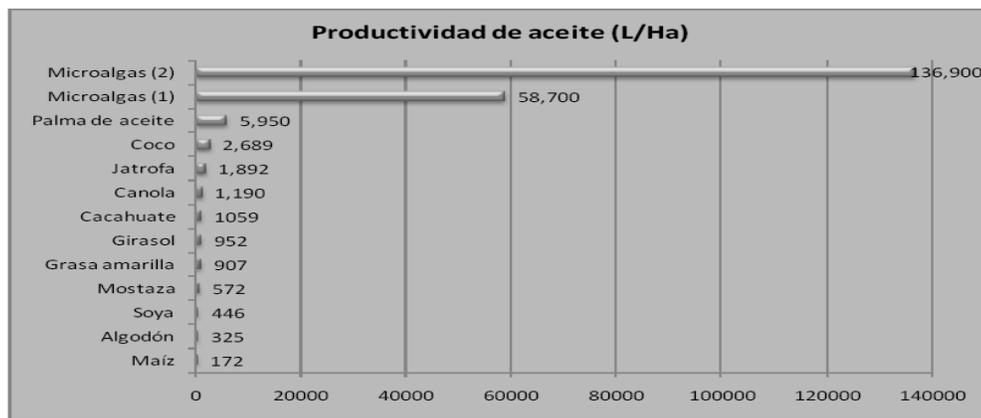


Figura 3. Productividad de aceite de las microalgas en comparación con los cultivos convencionales (Gao *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2008; Chisti, 2007)
(1) 30% de aceite en biomasa (con base a peso seco); (2) 70% de aceite en biomasa (con base a peso seco)

Sin embargo dependiendo de las condiciones climáticas y de los tipos de suelo algunos cultivos son más proclives a darse que otros en los distintos países. La preferencia que se da con la jatrofa es con respecto a la facilidad de su cultivo en muchas condiciones incluso con muy poca precipitación.

Figura 9. Plantas oleaginosas y sus rendimientos por hectárea y de aceite

Cuadro 3
ESPECIES OLEAGINOSAS

Nombres de las oleaginosas			Prod. Agrícola	Prod. Aceite	Aceite
Español	Inglés	Científico	t / ha	Litro / ha	%
Ajonjolí	Sesame	Sesamun indicus	0,8	490-700	38-40
Girasol	Sunflower	Heliantus annus	1,5-2,0	700-1100	39-48
Higuerilla	Castor bean	Ricinos comunis	0,6-2,5	620-1200	42-45
Maní	Peanut	Arachis hipogaea	1,4-2,5	700-1000	39-48
Palma aceitera	Palm	Elaeis guineensis	10-22	3000-5900	18-26
Soya	Soybean	Glycine max	1,5-3,0	350-520	17-19
Colza/Canola	Rapessed	Brassica napus	1,7-2,0	690-1100	37-46
Algodón	Cottonseed	Gossypium hirsutum	1,7-3,0	270-450	16-18
Arroz	Rice	Oriza sativa	6,0-10	700-900	18-21
Piñón	Jatropha	Jatropha curcas	1,0-5,0	950-1680	24-26
Coco (Copra)	Coconut	Cocos nucifera	1,0-5,0	2100-2510	52-60
Maíz	Corn	Zea mais	6,0-8,0	170-200	4-8
Aguacate	Avocado	Persea americana	6,0-9,0	2200-2800	10-30
Oliva	Olive	Olea europaea	2,0-12	1200-1400	12-30

Fuente: Beare-Rogers, 2001; Macedo & Nogueira, 2005

2.6. Extracción de aceite

2.6.1. Expresión

1. Los granos de las semillas son llevados dentro de una tolva por una correa transportadora y luego con un separador magnético se obtiene el hierro para prevenir que los restos del metal se mezcle con las semillas y causen daño a las partes móviles del equipo descascarador. Alguna piedra pequeña o arenilla que pase desapercibida y que haya sido mezclada con las semillas desde la granja son separadas por un diseño especial de sacar piedras antes de comenzar el descascarado de las semillas.

2. Después de empezar el triturado, las semillas descascaradas son separadas de las cáscaras por un dispositivo filtrador. Las cáscaras son sopladas a través de un conducto por un ciclón, luego separado y recolectado para ser usados como combustible para generar menor presión de vapor donde se cocinará las semillas vegetales antes mencionadas.

3. Las semillas son colocadas dentro de un expulsador a presión que obtendrá el aceite desde las semillas. Después de ser filtrado, el aceite es bombeado hacia un tanque almacenador en la sección de refinería.

2.6.2. Extracción

1. La pasta de harina expulsada desde el expulsador a presión es alimentada hacia un rodillo de ruptura donde es molido a granos finos antes de colocarlo dentro de un extractor de celdas rotativo.

2. En este punto, la consistencia de la pasta de harina seca es aproximadamente del 10% de aceite vegetal. Ya que el expulsador mecánico continuo generaba una gran pérdida de aceite, el método de extracción con solventes orgánicos es usado para extraer las sobras de aceite desde el residuo de harina. Hexano normal, que es un solvente orgánico no tóxico, fue usado en la extracción de aceite por muchos años.

3. El solvente evaporado es recuperado a través de un sistema de enfriamiento y reciclado dentro del extractor. El residuo del aceite que queda es bombeado dentro del tanque almacenador para ser refinado.

4. La pasta del extractor es descargada y transportado al tostador disolvente, donde es vaporizado. El solvente libre de harina es enfriado y transportado a un dispositivo filtrador, donde la harina o pasta cruda es separada del polvo fino. La pasta o harina cruda es asentada en el polvo fino y se agrega a la pasta filtrada.

5. El aceite puro y rico en proteínas vegetales de la harina o pasta de semillas es luego formada en bolitas de tamaños uniformes. Estas bolitas son empaquetadas en bolsas de polipropileno y vendidas como alimento animal.

2.6.3. Refinación

El crudo de aceite generalmente contiene algunos ácidos grasos libres, almidón, goma, sustancias colorantes y otras sustancias que hacen al aceite nubloso, turbio y oscuro en color y con olores indeseables. Un completo proceso de refinación purifica el aceite y lo hace aceptable para su uso en la cocina a través de una refinación alcalino-ácido, seguido de una decoloración y deodorización.

1. Los ácidos grasos libres son neutralizados con soda cáustica y ceniza de soda, formando un concentrado. Este concentrado o “pies” como comúnmente lo llaman son obtenidos a través de una fuerza centrífuga. El aceite neutralizado es bombeado hacia un tanque de almacenamiento.

2. El aceite neutralizado es mezclado con arcilla activa en la blanqueadora, cantidad por cantidad. El aceite blanqueado es separado

desde la arcilla por una presión filtradora automática. El aceite blanqueado es bombeado hacia el tanque medidor para ser desodorizado.

3. La deodorización es realizado para remover las impurezas no deseadas con una alta presión de vapor en una cámara sellada al vacío. Después de este paso final de refinación, deodorización, transparencia y neutralizado del aceite, este queda disponible para ser empaquetado.

2.7. Comercio Mundial de Aceites Vegetales

Los aceites vegetales cuentan con un amplio mercado internacional el cual alcanza los miles de toneladas por los distintos aceites de que se trate. Los aceites con mayor flujo comercial son el de colza, palma, girasol, nuez y soya. Las tablas que se presentan a continuación ejemplifican el amplio mercado de importación, exportación y consumo de algunos países del mundo donde este mercado es más significativo.

Los precios de mercado de las oleaginosas son relevantes para estructuras integradas de extracción de aceite y producción de biodiesel. La empresa debe realizar adquisiciones de materias primas en el mercado de oleaginosas, haciendo competencia con las demandas del mercado alimenticio en muchos casos.

La figura 10 presenta los precios internacionales, en los principales mercados, para el maíz, la soya y la canola. Es importante tener en cuenta que el maíz y la soya en grano pueden servir al mercado de alimentos directamente. La canola debe ser usada para extracción de aceite y

producción de harina o torta. En este periodo, los precios estuvieron muy volátiles y con tendencia de elevación a largo plazo.

Figura 10. Precios internacionales de oleaginosas 2005-2006

PRECIOS INTERNACIONALES DE OLEAGINOSAS, 2005 A SEPTIEMBRE 2006

Oleaginosa	Local – condición	Precio max. US\$ / ton	Precio min. US\$ / ton	Precio sep.2006 US\$ / ton
Maíz amar.	FOB Golfo USA	121	87	121
Maíz	Chicago	148	137	137
Soya amar.	FOB Golfo USA	269	218	223
Soya	Róterdam	399	390	399
Soya	Chicago	258	240	258
Soya	China	382	342	382
Soya	Tokio – transgenica	295	247	295
Soya	Tokio – normal	362	301	313
Canola	Winnipeg – Canadá	340	321	340

Fuente: Von Lampe, 2006.

CAPITULO 3. CONSUMO DE DIESEL EN UN INGENIO AZUCARERO

Los ingenios azucareros de Guatemala se encuentran entre los más eficientes del mundo tanto en el área agrícola con una gran producción de caña de azúcar por hectárea como en el área industrial donde en base a estudio y nuevas tecnologías se ha hecho un gran aprovechamiento de los recursos energéticos de la biomasa para producir la energía eléctrica de consumo propio como para la venta a la red interconectada.

Los ingenios en Guatemala son grandes consumidores de diesel de petróleo principalmente para el transporte de la caña desde las distintas fincas productoras hacia la planta de producción de azúcar. Esto hace que exista mucha competencia por tener las fincas propias y alquiladas lo más cerca posible y es sabido en el medio que los ingenios que han ido desapareciendo o fusionándose, lo han hecho al no soportar más la variación de precios y el alto costo del diesel para todas las labores de producción.

Los ingenios utilizan diesel de petróleo en toda la maquinaria de cultivo y cosecha, maquinaria de mantenimiento de caminos y en el área industrial, transporte de personal. También existe consumo para despacho de azúcar y melaza y para desengrasado de piezas industriales y varios usos más.

Las tablas que se presentan a continuación presentan los consumos de diesel para las dos últimas zafras y reparaciones de un ingenio nacional del área de Masagua, Escuintla contando también el precio del mismo considerando que se tiene un precio preferencial por los altos volúmenes que se manejan. El ingenio tiene una capacidad de alrededor de 19,000 toneladas de caña molida por día y una molienda por temporada en alrededor de 3 millones de toneladas de caña. Como se puede observar en la tabla del ministerio de agricultura para el segmento de azúcar, la producción nacional de caña, anda actualmente por los 25 millones de toneladas. Esta gran cantidad toneladas de caña puede indicar que el consumo de diesel por parte de la industria azucarera guatemalteca, también es de grandes proporciones y no se diga los niveles de emisiones por esta actividad agroindustrial. Guatemala tiene muchas ventajas con respecto a otros países que ya tienen estipulado en la ley el uso de una parte de biodiesel como por ejemplo tiene diversos climas y costos bajos en mano de obra.

Las tablas siguientes muestran el consumo de diesel para dos zafras y dos reparaciones consecutivas incluyendo la reparación actual en un ingenio que tiene capacidad para procesar 19,000 toneladas de caña por día que es como regularmente se mide el tamaño de un ingenio. El consumo en tiempo de zafra es tan grande como un promedio aproximado de 14,000 galones cada día o bien sobrepasando en promedio los 400,000 galones por mes.

Tabla 8. Consumo de diesel y costo total para la zafra 2008-2009 de un ingenio nacional.

ZAFRA 2008-2009

TIPO_COMBUSTIBLE	(Todas)
------------------	---------

		Datos		
AÑO	MES	GALONES	COSTO	COSTO_TOTAL
2,008	12	430,095.22	Q 18.32	Q 7,244,548.55
	11	190,446.73	Q 21.01	Q 3,761,587.40
2,009	1	494,542.05	Q 17.03	Q 6,960,563.42
	2	488,264.68	Q 16.21	Q 6,383,327.20
	3	583,547.80	Q 14.96	Q 7,071,385.94
	4	311,173.71	Q 15.93	Q 4,192,646.30
Total general		2,498,070.19	Q 16.99	Q 35,614,058.82

Fuente: Byron López Maldonado.

Tabla 9. Consumo de diesel y costo para la zafra 2009-2010 en un ingenio nacional.

ZAFRA 2009-2010

TIPO COMBUSTIBLE	DIESEL
------------------	--------

		Datos		
AÑO	MES	GALONES	COSTO	COSTO_TOTAL
2,009	11	182,319.67	Q 19.06	Q 3,475,201.44
	12	404,750.02	Q 18.86	Q 7,635,659.28
2,010	1	487,950.37	Q 19.70	Q 9,620,023.48
	2	509,154.15	Q 18.60	Q 9,469,850.77
	3	588,765.72	Q 18.94	Q 11,152,473.71
	4	445,712.68	Q 19.65	Q 8,789,869.09
	5	93,283.80	Q 20.02	Q 1,867,999.57
Total general		2,711,936.40	Q 19.18	Q 52,011,077.33

Fuente: Byron López Maldonado

Tabla 10 Consumo de diesel y costo total en la reparación 2009 en un ingenio nacional.

REPARACION 2009

TIPO_COMBUSTIBLE	DIESEL
------------------	--------

		Datos			
AÑO	MES	GALONES	COSTO	COSTO_TOTAL	
2,009	4	86,500.83	Q 13.46	Q 1,164,719.48	
	5	79,275.95	Q 12.15	Q 983,469.61	
	6	43,731.80	Q 11.65	Q 504,170.00	
	7	42,282.03	Q 13.24	Q 557,506.29	
	8	40,334.47	Q 15.02	Q 607,837.14	
	9	40,442.84	Q 16.74	Q 676,645.87	
	10	53,807.31	Q 17.40	Q 938,979.80	
	11	40,103.28	Q 18.99	Q 762,913.26	
	Total general		426,478.51	Q 14.59	Q 6,196,241.45

Fuente: Byron López Maldonado.

Tabla 11 Consumo y costo de diesel durante la reparación 2010 en un ingenio nacional

REPARACION 2010

TIPO_COMBUSTIBLE	DIESEL
------------------	--------

		Datos		
AÑO	MES	GALONES	COSTO	COSTO_TOTAL
2,010	5	82,496.20	Q 19.01	Q 1,585,882.06
	6	64,711.79	Q 16.86	Q 1,086,778.18
	7	59,755.76	Q 17.80	Q 1,063,877.39
	8	53,471.61	Q 18.30	Q 977,766.02
	9	1,466.88	Q 18.44	Q 27,047.33
Total general		261,902.24	Q 17.95	Q 4,741,350.98

Fuente: Byron López Maldonado

La figura 11 fue extraída de los datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación y muestra la cantidad de hectáreas de tierras utilizadas para el cultivo de la caña, la producción de caña de azúcar y azúcar en toneladas métricas. Se observa que las dos últimas temporadas la producción de toneladas métricas de caña de azúcar ha alcanzado los 25 millones lo cual lleva a la idea de qué cantidad de combustible fósil se ha utilizado para poder transportar esta caña desde los campos hasta las plantas industriales.

En algunos casos la caña se debe transportar hasta distancias de más de cien kilómetros para llegar al ingenio; esto debido a la falta de tierras cercanas disponibles a la compra o arrendamiento para el cultivo de caña. Si se relaciona el consumo del ingenio que se obtuvieron los datos y se relacionan con la figura 10, se podría decir que en una temporada de zafra se pueden consumir aproximadamente 25 millones de galones de diesel, esto haciendo una relación proporcional.

Figura 11. Área, producción y rendimiento de caña de azúcar en todo el territorio de Guatemala años 2001-2010.

Aspectos productivos

Área, producción y rendimiento

<i>Año agrícola 1/</i>	<i>Área cosechada (Hectáreas)</i>	<i>Producción (Miles TM) Caña Molida</i>	<i>Producción (Toneladas Métricas) Azúcar</i>	<i>Rendimiento (TM azúcar/TM caña molida)</i>
2001/02	185,220.00	16,830.81	1,885,424.15	112.02
2002/03	185,220.00	17,336.44	1,821,414.88	105.06
2003/04	185,220.00	17,430.81	1,934,081.87	110.96
2004/05	185,220.00	17,675.03	1,958,735.60	110.82
2005/06	189,000.00	16,648.60	1,761,525.38	105.81
2006/07	215,999.70	18,571.98	2,016,418.31	108.57
2007/08	215,999.70	19,007.40	1,976,043.86	103.96
2008/09 p/	219,800.00	25,210.53	2,064,044.97	81.87
2009/10 e/	219,800.00	25,462.64	2,081,176.54	81.73

p/ Cifras preliminares. e/ Cifras estimadas.

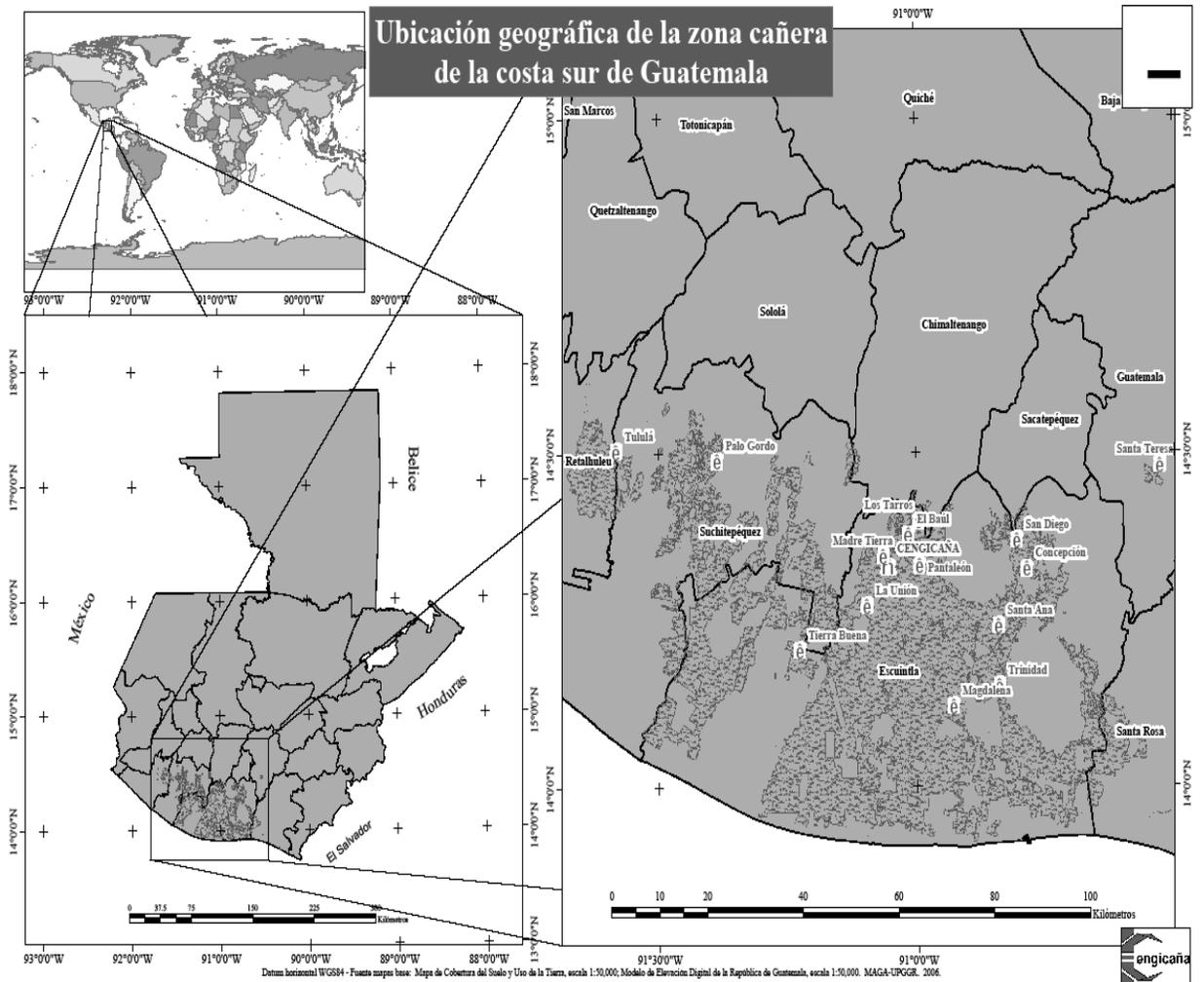
1/ Noviembre de un año a octubre del siguiente.

FUENTE: Banco de Guatemala.

Principales departamentos productores :

De acuerdo con el IV Censo Nacional Agropecuario, el 97.15% del área sembrada a nivel nacional se encuentra concentrada en 4 departamentos: Escuintla (81.9%), Suchitepéquez (11.11%), Santa Rosa (2.1%), Retalhuleu (2.03%).

Figura 12. Mapa de la ubicación geográfica de la zona cañera de la costa sur de Guatemala.



Fuente: CENGICAÑA.

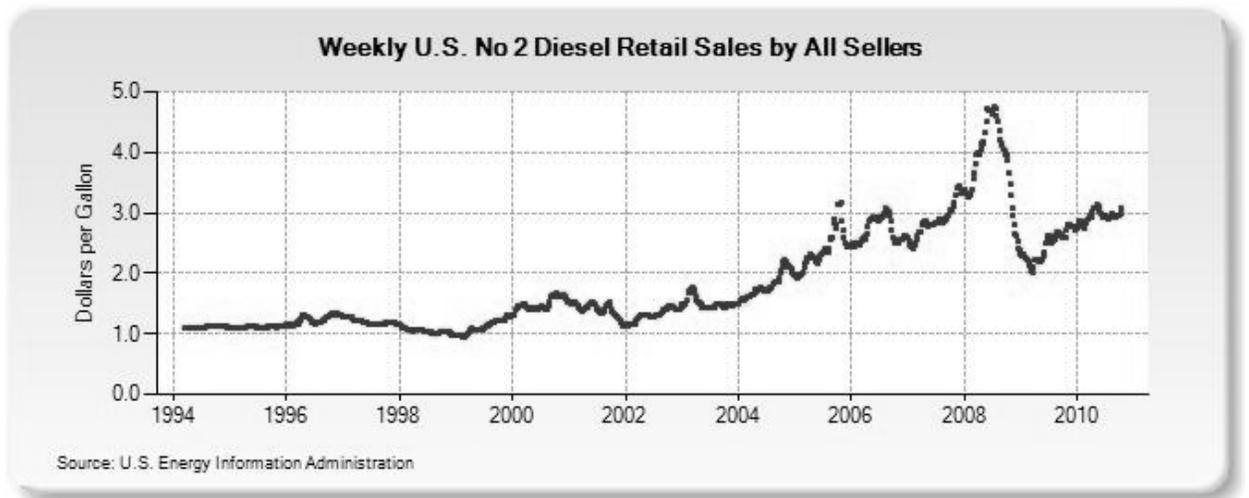
La figura 12 muestra, en un mapa del país realizado por el Centro Guatemalteco de Investigación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA), el área que ocupa el cultivo de la caña de azúcar exclusivamente en la costa sur.

3.1. Mercado mundial y variación de los precios del diesel

El diesel en el mundo es sinónimo de producción y los cambios en los precios internacionales del petróleo afectan por ende los precios del diesel y alteran los costos de los distintos sistemas productivos, incluso durante la crisis petrolera del año 2008 en que el precio del diesel llegó a ser mayor que el precio de la gasolina, muchas empresas no aguantaron el aumento de costos por el precio del diesel y tuvieron que cerrar operaciones.

La gráfica a continuación presenta el comportamiento del precio del diesel desde el año 1994 hasta el año 2010 y se nota que a partir del año 2003, el precio a denotado mucha variación o bien un comportamiento impredecible. La baja en el precio en el año 2009 se debió en gran parte a la recesión por la crisis internacional que dio inicio con la debacle de los mercados inmobiliarios de Estados Unidos y por el momento, se tiene un comportamiento al alza.

Figura 13. Comportamiento de precios del diesel en los Estados Unidos
de 1994 a 2010



CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN-IMPORTACIÓN DE ACEITE VEGETAL

4.1. Mercado de aceites o biodiesel

En los países de Centroamérica, la única oleaginosa ya producida en grandes cantidades es la palma. El aceite de palma se viene consumiendo desde hace más de 5.000 años en África, mientras que en el continente americano, el cultivo comercial de la palma empezó alrededor de 1940 en Costa Rica. En el corto plazo, la producción de biodiesel en grandes cantidades sólo puede ser hecha con el aceite de palma, pero como los precios de los aceites están relativamente altos, usar el aceite de palma para producir biodiesel puede incrementar los precios aún más por competencia entre los mercados alimenticio y energético, tornando el biodiesel sin viabilidad económica para competir con los precios del diesel local. Las exportaciones pueden ser interesantes si el mercado de la Unión Europea se abre, pues los precios del diesel en Europa son mucho mayores.

El empleo de aceites usados reciclados u otras materias primas alternativas puede ser interesante para dar inicio a la producción de biodiesel. Los pescados industrializados así como las carnicerías de ganado y cerdo pueden ser fuentes de materias grasas alternativas a los aceites vegetales si existiera la escala (logística). El ejemplo en Honduras de producción de biodiesel de aceite de pescado por una empresa que industrializa la tilapia es interesante.

Para que en el mediano o largo plazo sea posible emplear otras materias primas vegetales es necesario apoyar la producción de aceites vegetales de preferencia no comestibles. No se debe esperar producir grandes cantidades de biodiesel en corto plazo sino preparar las bases para el despegue en el futuro.

4.2. Pequeña o gran escala de producción de biodiesel

Los escenarios de producción a pequeña o gran escala se asocian al objetivo de fortalecer al pequeño productor agrícola. En el caso del biodiesel, la opción de producción a pequeña escala aún no es económica. La escala de producción es muy importante para que ocurra la viabilidad de las inversiones. La producción a pequeña escala tampoco es aconsejada por varios motivos, que se explican a continuación:

- Es necesario que el productor de biodiesel posea entrenamiento e instrucción profesionales para el almacenamiento, manejo y transporte de las materias primas y de los productos, especialmente con el manejo de metanol que es crítico.

- La glicerina producida en pequeñas unidades no tiene como ser comercializada por problemas de logística y calidad (glicerina bruta), volviéndose su disposición un problema ambiental y además de que no se logra reducir el costo de producción del biodiesel.

- La logística para adquisición de metanol y de soda o potasa es difícil para pequeños compradores. Los precios no son los mismos que

para grandes industrias y el costo de transporte para pequeñas cantidades es alto.

- La natural variación de características de la materia prima de diferentes lotes debe ser tomada en cuenta y los parámetros de operación de la planta de producción de biodiesel deben ser ajustados de forma adecuada. El pequeño productor no posee laboratorio ni conocimientos para garantizar la calidad del producto. El producto para comercialización debe atender las especificaciones técnicas. Para uso propio, las escalas son muy pequeñas.

Para apoyar a los pequeños productores agrícolas es más interesante que ellos tengan financiación para su producción y que se organicen en asociaciones o cooperativas con una única planta de producción, de forma que ellos tengan una escala que permita una gestión tecnológica y de negocio profesional.

4.3. ¿Hay espacio para la maquila?

Una posibilidad que puede auxiliar el desarrollo de la producción local de biodiesel en los países es hacer importaciones de aceites o grasas y producir el biodiesel para exportación como ya se hizo en la región con el bio-etanol. La escala sería grande para obtener costos competitivos y sería la base para la producción local.

La existencia de un país comprador, es difícil: en los Estados Unidos el consumo de biodiesel no es grande, las empresas que lo producen tienen capacidad ociosa y los incentivos fiscales no se aplican al

producto importado. En la Unión Europea, hasta el momento la producción de biodiesel tiene una característica de apoyo a los productores agrícolas locales. Ya en los años 2005 y 2006, la Unión Europea fue importadora neta de aceites vegetales. Mecanismos de apoyo internacionales a los países en desarrollo podrían ser empleados para facilitar las exportaciones de biodiesel a los países desarrollados.

Sin embargo, en internet se llega a encontrar ofertas de países que son grandes productores de oleaginosas como la *Jatropha* de la cual aparecen ofertas como la abajo expuesta. Siendo cuestión de analizar cuál sería el costo puesto en el país para luego analizar cuál sería el costo de producción y ver si compite con el precio del diesel. Lo interesante de esto sería el ahorrarse el costo de tierras y la gran maquinaria para siembra y cosecha y dando por hecho que lo que realmente se requiere son acuerdos y negociaciones exitosas y duraderas.

Se proponen varias alternativas para la producción de biodiesel en el ingenio pero debido al precio del azúcar y según varios cálculos pesimistas de precio internacional de la misma, de ninguna forma conviene cambiar tierras para cultivo de caña de azúcar por cultivo de plantas oleaginosas pensándose especialmente en *jatropha curcas*.

Esto en vista que Guatemala tiene un altísimo rendimiento de producción de caña por hectárea y es el cultivo nacional que produce más por hectárea con aproximadamente 100 Tn/ha inmensamente superior al cultivo que ocupa más área en el país que es el maíz y que produce menos de 3 Tn/ha y también que el margen de ganancia de la producción

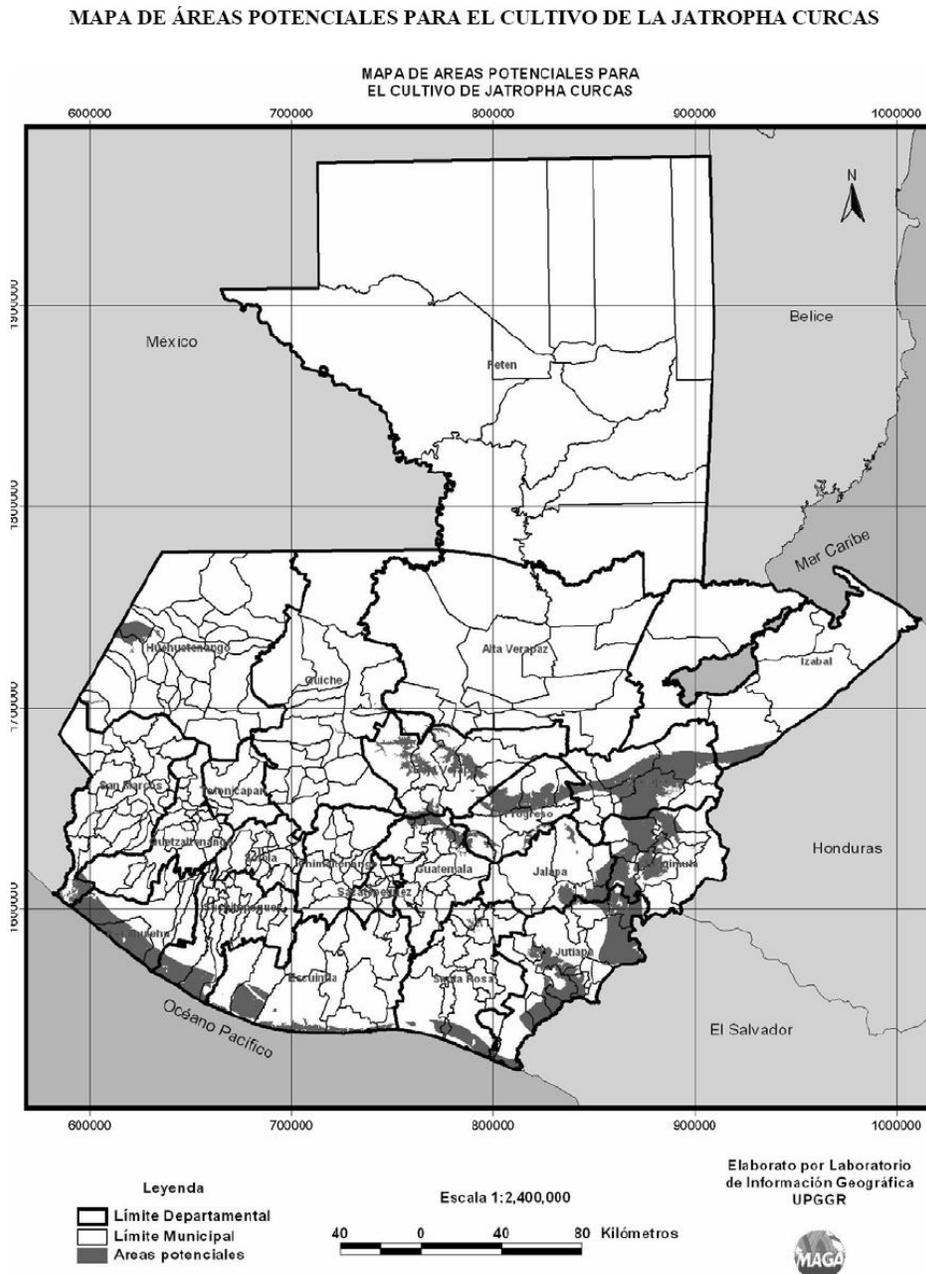
de azúcar es muy alto comparado con el margen de ganancia que tienen los combustibles y que en el caso del biodiesel podría ser parecido.

Se buscarían tierras disponibles que no fueran aptas para el cultivo de la caña o bien fuera del área azucarera como las marcadas en el mapa del siguiente subtítulo o bien en vista que el arrendamiento de tierras puede tener mucha complicación y un precio alto, se pensaría en buscar aceites de los países que lo producen y venden como materia prima siendo algunos de estos países Malasia o la India. La gran ventaja de esta alternativa sería el solamente tener área ocupada para la planta de producción y no todo el manejo de siembra, cuidado y cultivo de la planta oleaginosa, además de poder iniciar la producción a un corto plazo.

La importación de aceite de jatropha se puede hacer por medio de un contrato a una determinada cantidad de años durante los cuales puede haber producción y se tendría que haber definido el plan de plantación de Jatropha en el país o ya podría llevar un crecimiento avanzado dicho cultivo pues cinco años serían suficientes para comenzar a cosechar una cantidad de semilla por hectárea apropiada para suplir las importaciones.

4.4. Tierras y recursos disponibles para plantas oleaginosas

Figura 14. Mapa de áreas potenciales para el cultivo de la jatropha en el territorio de Guatemala.



Fuente: MAGA, 2007, Guatemala.

El mapa indica las mejores áreas del país para la siembra de la jatropha con su rendimiento más alto por lo que se sabe por experiencia y de otros países y pruebas que se han realizado en Guatemala pero ya se explicó que la jatropha puede darse en casi cualquier terreno. Hablando con personal del área agrícola de los ingenios comentaron que para el requerimiento que existe de tierras para la siembra a gran escala de jatropha, es muy difícil arrendar áreas muy grandes, incluso una finca de 2 caballerías (90 hectáreas) es casi imposible hallarla a disposición de arrendamiento. El precio promedio por hectárea por año está calculado en US \$ 400.00. Lo que significa que el costo de arrendamiento de 900 hectáreas para el cultivo de jatropha podría rondar los US \$360,000 por año (Q 2, 808,000/año).

4.5. Disponibilidad internacional de aceites vegetales para uso industrial.

Muchos países del mundo con características climáticas apropiadas están apostando por la siembra y producción de jatropha para extracción de aceite y su exportación o producción de biodiesel. En África los principales países productores son Mali, Ghana y Camerún; en Asia los principales productores son India, China, Malasia y Filipinas; en América los principales países que están produciendo aceite de jatropha son Brasil, Argentina, Paraguay y México. Estos países ofrecen grandes cantidades de aceite de jatropha en contratos a determinada cantidad de años y el precio se rige por el mercado internacional aunque se obtuvieron distintas ofertas con distintos precios para un país africano, un país de Asia y un país de América. En la sección de apéndices se pueden leer

correos electrónicos y anuncios de ofertas de aceite de jatropha en distintas partes del mundo.

4.6. Consideraciones con respecto a la importación y comercio de aceites

Con respecto a la importación de aceites se debe tomar en cuenta lo siguiente:

1) Los precios de los aceites no los fijan los productores, ni las corporaciones, ni los clientes; los precios los fija el mercado, se vive en una economía de libre mercado, la referencia para los precios son las operaciones comerciales que se realizan en Chicago, Estados Unidos y en Róterdam, Holanda.

2) Los aceites que no son commodities toman como referencia el precio de aceite de precio más bajo en Chicago, para el caso del aceite de jatropha curcas el precio de referencia es el aceite de soya.

3) Por que tomar los precios de Chicago para la venta de los distintos aceites?

La respuesta es muy simple, en América los gobiernos, cobran sus Impuestos, Tasas y Retenciones que gravan a la exportación de los aceites en base al precio del aceite en Chicago el día de embarque. Aunque en Guatemala la importación de aceite no tienen gravamen.

4.7. Análisis y elección de alternativas

Alternativa 1: Adquisición de tierras en arrendamiento para cultivar considerando que la jatropha crece casi en cualquier parte, incluso en las tierras cascajosas, arenosas y salinas, también en la tierra pedregosa más pobre, pero la jatropha no tolera estar bajo condiciones de inundación esto último muy importante por las tormentas que han afectado en los últimos seis años al país. En base a la producción promedio de toneladas métricas por hectárea y en base a la producción de biodiesel calculada para cinco meses, se estima que se necesitarían 931 hectáreas para el requerimiento de producción de Biodiesel20 para el ingenio en una planta de producción construida en las instalaciones del ingenio.

Alternativa 2: Importación de aceite de jatropha curcas desde un proveedor en Malasia a granel. Una de las limitantes de esta alternativa es el precio variable de estos aceites en el mercado pero se puede tener un precio de regular estabilidad al firmar un contrato. Estos proveedores imponen como condición una cantidad mínima de compra de 20 toneladas métricas y un contrato de compra a 5 años. Producción del biodiesel en una planta montada en las instalaciones del ingenio.

Como se mencionó esta alternativa elimina la utilización de suelo guatemalteco para el cultivo de la jatropha y el contrato aseguraría la provisión de la materia prima.

Alternativa 3: Se contempla el montaje de la planta para la producción de 325000 litros por mes de biodiesel con el fin de usar una

mezcla con diesel del petróleo al 20%, usando un contrato de compra de aceite de jatropha con un proveedor de Malasia o India o bien buscando un proveedor de América del Sur. Hacer un contrato a 5 años durante los cuales se debe elegir, arrendar e iniciar la siembra de plantas de jatropha curcas en un área aproximada de 931 hectáreas para al tercer año del proyecto comenzar a cosechar y extraer aceite para adicionar esto a la producción de biodiesel. Al quinto año del proyecto se tendría la producción suficiente de semilla para suplir la importación de aceite si se quiere seguir con la misma producción.

Alternativa seleccionada : Basándose en todos los aspectos nacionales con respecto a la falta de tierras disponibles cerca del área azucarera, teniéndose pendiente de analizar las posibilidades en áreas como el oriente, Petén u otras, se considera que la mejor alternativa es la número dos con lo que a corto plazo se podría producir biodiesel y conocer si en la práctica es totalmente conveniente económica como energéticamente. Tomando principalmente en cuenta esta alternativa, se podría pensar en pasar a la alternativa tres pues ya con la planta funcionando, se puede analizar a detalle la posibilidad de sembrar la oleaginosa en el país o comprarle las semillas o el aceite a alguien que cultive en Guatemala bajo contrato para asegurar el abastecimiento de aceite.

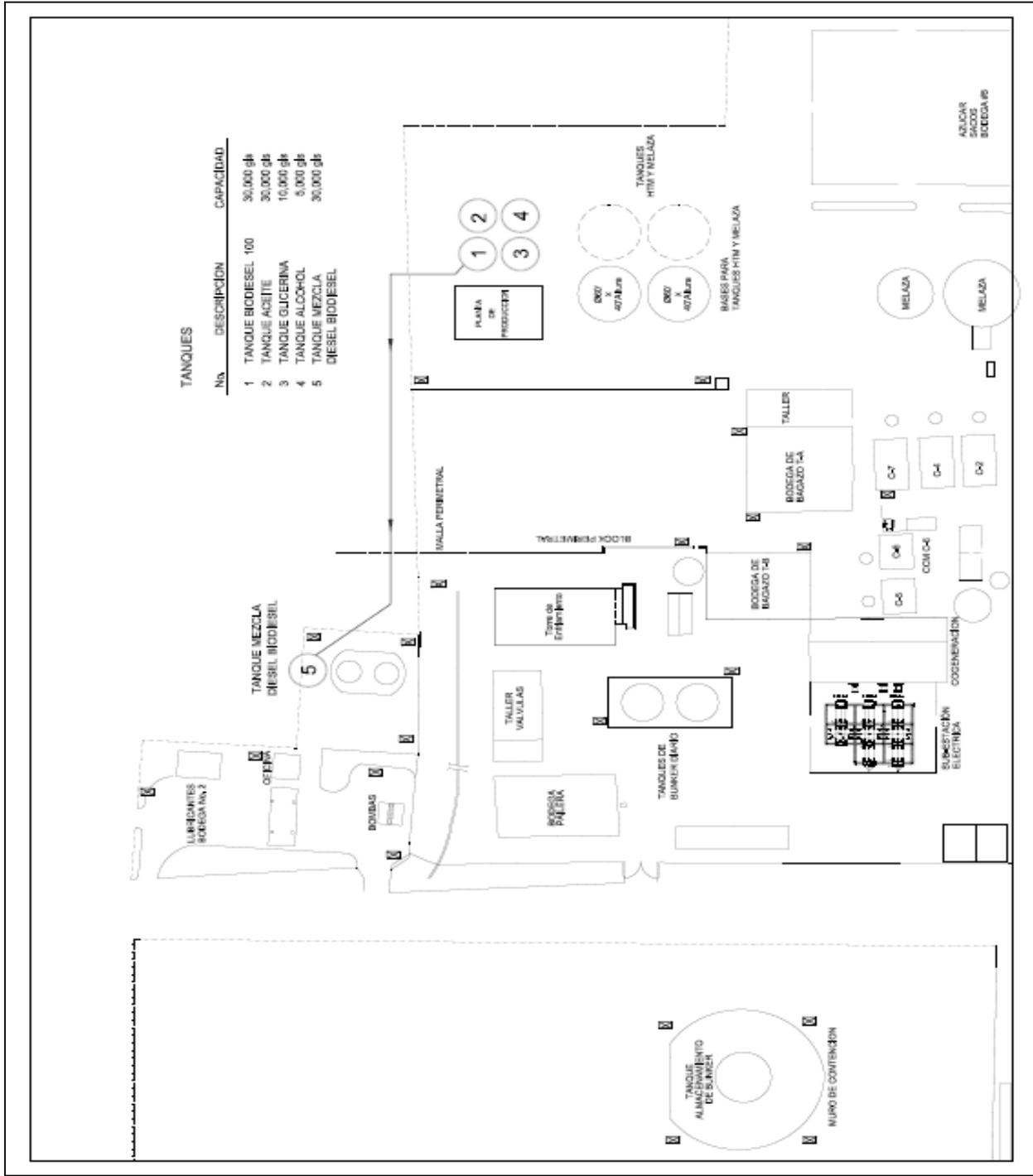
CAPÍTULO 5. MONTAJE DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DENTRO DE PLANTA DEL INGENIO.

5.1. Ubicación de la planta dentro del ingenio

El plano de la página siguiente muestra la ubicación de la planta de producción, tanques de materias primas y de producto así como la línea de distribución hacia el tanque de la gasolinera del ingenio. Todos los requerimientos de servicios se encuentran disponibles en una distancia no mayor de cien metros como sería por ejemplo la utilización de vapor para calentamiento. Energía eléctrica se encuentra disponible en sistemas monofásico y trifásico, así como instalaciones de agua de pozo.

Los tanques identificados con los círculos con los números 1, 2, 3, 4 y 5 representan la ubicación para los tanques de biodiesel100, aceite, glicerina, alcohol y mezcla ya en el área de gasolinera. El terreno donde se está ubicando la planta actualmente corresponde a una parcela del ingenio con caña pero que se puede solicitar en vista que tener caña y quemarla tan cerca de las reservas de bagazo de caña, son potencialmente peligrosas pues pueden generar incendios de gran magnitud. El rectángulo debajo de los tanque representa la planta de producción.

Figura 15. Vista de planta de la instalación de la planta de producción de biodiesel en el ingenio nacional donde se hace el estudio de prefactibilidad



5.2. Costos de montaje

Se piensa comprar una unidad completa de producción de Biodiesel que no genera residuos hacia los efluentes, de nombre BIO11.5K y de marca CENTRALBIODIESEL de fabricación argentina y con contacto también en los Estados Unidos.

La planta puede producir 11,500 litros de biodiesel por día o sea 3000 galones por día y puede producir por lo tanto la cantidad de 90,000 galones por mes siendo esta cantidad casi 5,000 galones más del valor calculado necesario para la necesidad de suplir una mezcla de biodiesel²⁰ la cual es de 85,865 galones por mes.

Esta unidad es del tipo batch/continua y permiten generar procesos de alcoholólisis en forma de batch y al mismo tiempo proveen un flujo continuo de biodiesel y glicerol como producto.

La unidad incluye:

- Reactor BIO400M7
- Unidad de medición y calentado – BIOHeat
- Unidad de Metóxido – BIOMeth
- Dos unidades de descompresión
- Unidad de extracción de Metanol excedente-BIOVac
- Tres unidades BIOClean de Pulido y Microfiltrado–

BIOClean

- Unidad Centrifuga abierta – BLOWest
- Kit de Repuestos
- Kit de Laboratorio
- Kit de Interconexión
- Entrenamiento en Sitio
- Soporte Técnico gratuito por un año
- Guías de Layout
- Descuento en expansiones

Materias primas requeridas para el funcionamiento de la planta:

La unidad BIO115K puede procesar:

- Aceites Vegetales Nuevos
- Aceites Vegetales Usados
- Aceites derivados de Grasas Animales
- Aceites de Pescado

Características del Aceite:

- Fluido a 20° Celsius
- Numero ácido entre 5.5 y 7
- Filtrado a 15 micrones o menos
- Anhidro (<0.2 % contenido de agua)

Características del Metanol:

- Calidad industrial pureza 99.9 %
- Menos de un 2% de alcohol isopropílico
- Anhidro (<0.01% agua)

Características del Hidróxido de Sodio:

- Calidad industrial pureza 99 %, en forma de perlas.
- Anhidro (<0.01 % agua)
- Libre de carbono (<0.01 % compuestos de carbono)

OTROS INSUMOS

Electricidad:

3 x 220/240/380/400/440 v.a.c.

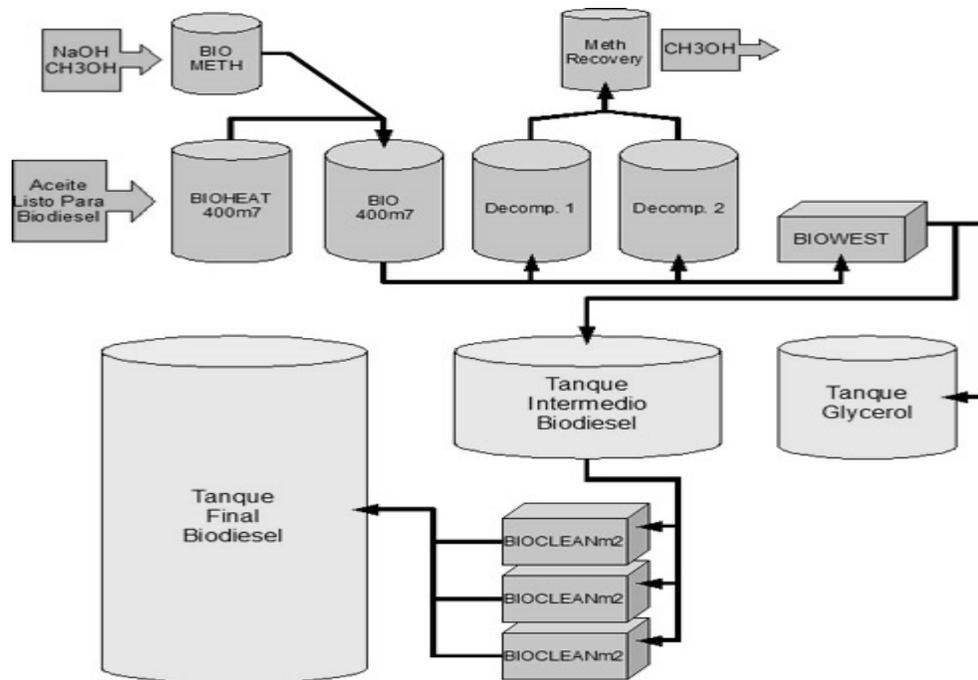
- 50/60 Hz

PRODUCTOS

La unidad BIO11.5K entrega metil éster de ácidos grasos que cumplen con normas ASTM y EN, con un grado de conversión superior al 98%, si el protocolo es respetado. No será necesario el lavado del biodiesel entregado por la BIO115K, el cual estará listo para usar.

El siguiente diagrama indica como está compuesta la planta a adquirir:

Figura 16. Diagrama de la planta BIO11.5K cotizada

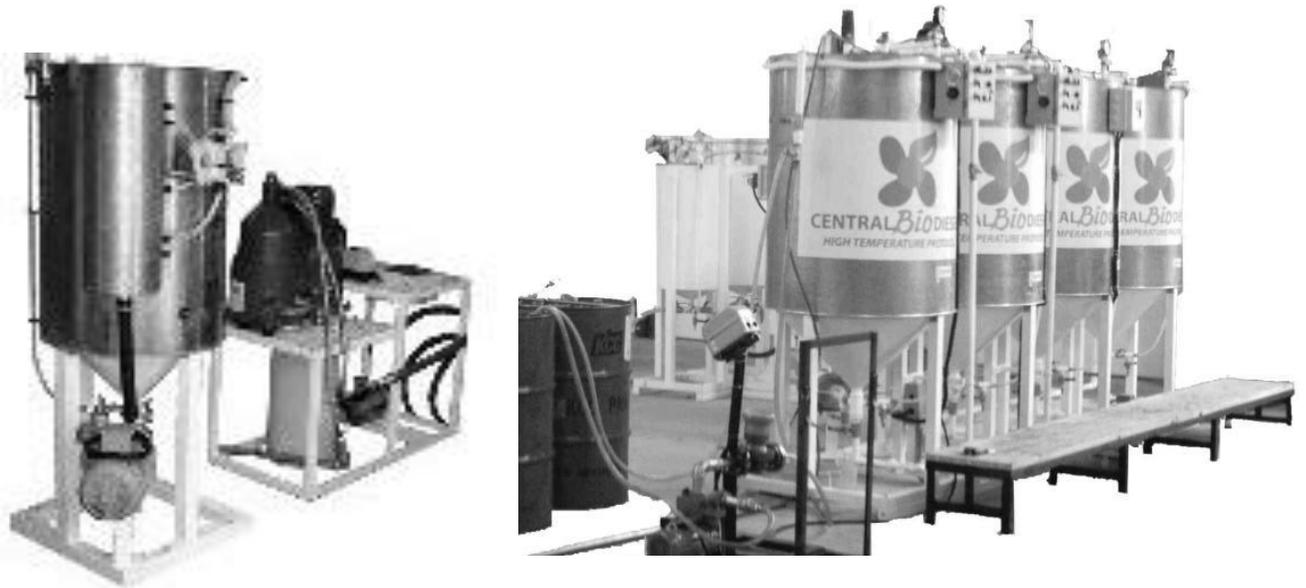


Fuente: www.centralbiodieselhttp.com

La BIO11,5K incluye nuestro reactor BIO400M7, el cual utiliza nuestro protocolo de alta temperatura presurizado (HTP), para alcanzar índices de conversión que siempre superan el 98%. El protocolo HTP provee Biodiésel que cumple con estándares ASTM D6751-3 y EN 14214-2, sin la necesidad de lavado con agua o en seco. La unidad Batch/Continua provee un suministro constante de Biodiésel y Glicerol.

Lavar el Biodiésel con agua genera una gran cantidad de efluentes contaminantes que deben ser tratados antes de desechar o reutilizar. Esto involucra largos y complejos procesos, que demandan mucho tiempo y capital. El protocolo HTP evita la necesidad de lavar con agua o en seco, sin sacrificar la calidad del Biodiésel obtenido.

Figura 17. Planta de producción de biodiesel BIO11.5K



Fuente: www.centralbiodieselhtp.com

COSTO DE PLANTA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL
BIO11.5K=\$207,692.31

Tabla 12. Costo de montaje de las instalaciones para montar la planta de producción de biodiesel

MATERIALES PARA EDIFICIO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
TANQUES PARA BIODIESEL(CAPACIDAD 30000 GAL C/U)	2	C/U	Q 44,467.15	Q 88,934.29
TANQUE PARA GLICERINA	1	C/U	Q 55,052.08	Q 55,052.08
BOMBA NEMO MOD. NM038SY01L06B 40-100 LTS/MIN. NETZSCH	4	C/U	Q 17,431.40	Q 69,725.60
VIGA H 8" X 8" X 31 LBS.	160	PIE	Q 117.39	Q 18,782.40
VIGA W 10" X 26 LBS.	160	PIE	Q 89.29	Q 14,286.40
LAMINA TROQUELADA TRASLUCIDA CAL. 150 DE 42" X 20'	40	C/U	Q 571.43	Q 22,857.20
LAMINA TROQUELADA CAL. 24 42" X 20'	20	C/U	Q 391.07	Q 7,821.40
TUBO HIERRO NEGRO CED. 40 0.280" WALL 6"	300	PIE	Q 85.46	Q 25,638.00
VALVULA COMPUERTA 150 WSP C/FLANGE 6"	4	C/U	Q 5,002.00	Q 20,008.00
FLANGE (SLIP ON) HIERRO NEGRO 150 LBS. 6"	8	C/U	Q 200.89	Q 1,607.12
VIGA W 6" X 25 LBS.	80	PIE	Q 98.21	Q 7,856.80
MANO DE OBRA				Q 83,142.25
		TOTAL		Q 415,711.54
		TOTAL (\$)		\$ 53,640.20

Fuente: Byron López Maldonado

COSTO TOTAL PLANTA DE PRODUCCIÓN= \$ 261,332.51

5.3. Costos de operación y mantenimiento

Los costos y precios de oleaginosas y aceites vegetales se han observado en tablas anteriormente y se sabe que varían según el mercado y la oferta y la demanda. Según las experiencias de productores de biodiesel, el costo de las materias primas constituye desde el 75% hasta el 85% de los costos totales de producción de biodiesel. Los costos indirectos (de inversión, administrativos, mano de obra) constituyen el segundo rubro de costos en un rango entre el 10% y el 15%. El costo de capital amortizado para una planta de gran capacidad incrementa el costo del biodiesel producido en algo como US\$ 35 por tonelada de producto. Los costos del alcohol y del catalizador para el proceso responden por 2%

hasta 3% (metanol). Otros costos, como energía eléctrica y calor, son pequeños.

La producción del biodiesel emplea energía eléctrica y calor de proceso. Aunque los costos de estas utilidades no sean significativos, deben ser tomados en cuenta en una evaluación económica detallada. NREL estima estos costos en alrededor de US\$ 20 por tonelada de biodiesel aunque en un ingenio que cogenera y puede tener sobrantes de vapor este costo sería más bajo.

La mano de obra asociada a la producción del biodiesel es pequeña, pocos trabajadores y técnicos conducen la producción de grandes plantas de biodiesel. El peso de este rubro en los costos no es elevado.

Otros costos que deben ser considerados para análisis más detallados son mantenimiento, seguros, transporte de materias primas y productos, mercadeo, manejo de desechos, etc.

El siguiente cuadro muestra un desglose de los costos aproximados por galón de biodiesel y por tonelada de biodiesel en US\$ según costos promedios de los últimos años.

Tabla 13. Costos de producción de biodiesel por galón y tonelada métrica

COSTOS DE PRODUCCIÓN	US\$/galon	US\$/TON
METANOL	0.15	45.00
CATALIZADOR NaOH	0.05	15.00
SERVICIOS	0.0552	16.56
MANO DE OBRA	0.06	18.00
MANTENIMIENTO	0.073	21.90
DEPRECIACIÓN DE CAPITAL	0.0635	19.05
TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS	0.048	14.40
COSTOS SIN MATERIAS PRIMAS	0.4997	149.91
MATERIAS PRIMAS	2	600.397
COSTO TOTAL	2.4997	750.41

El valor obtenido por galón que es de US\$2.49 o sea al cambio actual de Q19.11, muestra un costo bajo comparado con los precios que está llegando a alcanzar el diesel en el país debido a la crisis en los precios del petróleo producto de los problemas en los países árabes y demás problemas que lo pueden encarecer.

El biodiesel tiene entre sus limitantes que las cantidades a producirse no pueden llegar a ser tan altas como para lograr tener una competencia más ventajosa frente al diesel de petróleo y en varias ocasiones como la crisis de precios del petróleo del año 2007-2008 el precio del diesel llegó tan alto que comparado con lo que costaba hacer biodiesel en ese momento, podía haber una diferencia precio de diesel de petróleo-costos de biodiesel de hasta Q 10.00, con lo que una industria que lo fabricara podría entrar a vender a más bajo precio y obtener un buen margen de ganancia pero la crisis terminó el diesel bajó de precio y ya no daba rentabilidad el producir y vender biodiesel. En el caso que se estudia aquí hubiera habido la ventaja que era para consumo propio y no se hubiera esperado un margen de ganancia sino un margen de ahorro.

5.4. LOGÍSTICA DE PRODUCCIÓN Y DESPACHO DE BIODIESEL

5.4.1 Transporte y almacenamiento

5.4.1.1 Estabilidad

La estabilidad puede referirse a dos cuestiones de los combustibles: la estabilidad de almacenamiento a largo plazo o el envejecimiento y la estabilidad a elevadas temperaturas o las presiones como el combustible se recircula a través del sistema de combustible de un motor. Para los motores diesel de petróleo, la estabilidad de almacenamiento a largo plazo que comúnmente se conoce como la estabilidad oxidativa. La estabilidad térmica es el término común para la estabilidad de los combustibles a elevadas temperaturas del sistema de combustible.

Por Biodiesel100, la estabilidad de almacenamiento es la principal preocupación, por lo que D6751 incluye un requisito de estabilidad a la oxidación. La prueba de estabilidad a la oxidación, EN14112 (también conocido como el aceite de Estabilidad Índice [OSI] o la prueba de Rancimat), consiste en calentar una cantidad determinada de Biodiesel100 a 230 ° F (110 ° C) mientras que el aire se burbujea a través de un caudal determinado. El aire pasa a través de un baño de agua que recoge los ácidos volátiles formados en la oxidación. Un medidor de conductividad se utiliza para controlar el agua. Un Biodiesel100 estable puede ir por muchas horas en estas condiciones sin que se formen los productos volátiles de oxidación. Este período de tiempo, antes de formar productos

de oxidación, se llama el tiempo de inducción o período de inducción. El calor y la luz del sol acelerarán este proceso. Ciertos metales como el cobre, latón, bronce, plomo, estaño y zinc, se acelerará el proceso de degradación y de forma aún más altos niveles de sedimento.

5.4.1.2. Contaminación microbiana

Biocidas se recomiendan para los combustibles convencionales y el biodiesel donde el crecimiento biológico en el combustible ha sido un problema. Si se produce la contaminación biológica, la contaminación del agua se debe sospechar y tendrá que ser controlado por el hongo aeróbico, las bacterias, levaduras y microorganismos HC-que utiliza por lo general crecen en la interfase agua de combustible. Colonias anaeróbicas, que suele reducir el azufre, pueden estar activas en los sedimentos en la superficie del tanque y causar corrosión. Debido a que el trabajo de los biocidas en la fase acuosa, los productos que se utilizan con combustibles diesel funciona igual de bien con el biodiesel.

5.4.1.3. Efecto de limpieza

Los esteres metílicos se han utilizado como de bajo VOC (compuestos orgánicos volátiles), productos de limpieza y disolventes durante décadas. Los esteres metílicos hacer limpiadores de piezas excelentes, y varias empresas ofrecen los esteres de metilo como de bajo VOC, no tóxico de reemplazo de los solventes volátiles utilizados en lavadoras de piezas. Porque Biodiesel100 comprende esteres metílicos que cumplan la norma ASTM D6751, se disolverá los sedimentos acumulados en el almacenamiento de diesel y tanques de combustible del

motor. Si esto ocurre, puede causar depósitos en el inyector de combustible e incluso el fracaso del inyector. Si se va a utilizar o almacenar Biodiesel100 por primera vez, se deben limpiar los tanques y las piezas en el sistema de combustible en los sedimentos o los depósitos se pueden producir antes de llenar los tanques con el Biodiesel100. El nivel de limpieza depende de la cantidad de sedimentos en el sistema (si el sistema está libre de sedimentos no debería haber ningún efecto), así como la mezcla de biodiesel de nivel (el más alto es el nivel de mezcla, mayor será la limpieza de potencial).

5.4.1.4. Reacción con algunos materiales:

Algunos materiales con el Biodiesel100 no tienen buena compatibilidad y se degradan, suavizan, o se filtran a través de algunas mangueras, juntas, sellos, elastómeros, adhesivos y plásticos con la exposición prolongada. Algunas pruebas se han hecho con materiales comunes a los sistemas diesel, pero se necesitan más datos sobre la gran variedad de grados y variaciones de los compuestos que se pueden encontrar en estos sistemas, en particular con Biodiesel100 en las solicitudes de EE.UU, compuestos de caucho nitrilo, vinilo de polipropileno, y materiales de Tygon son particularmente vulnerables. Si el equipo no es compatible con el B100, los materiales deben ser reemplazados con materiales como el teflón, vitón, plásticos fluorados, y nylon.

5.4.1.5. Tanques de Almacenamiento y Dosificación

La mayoría de los tanques de equipos diseñados para almacenar combustible diesel guardará Biodiesel100 sin ningún problema. Los materiales aceptables para el tanque de almacenamiento incluyen aluminio, acero, fluorados de polietileno, polipropileno fluorado, Teflon , y la mayoría de fibra de vidrio. Latón, bronce, cobre, plomo, estaño y zinc pueden acelerar la oxidación de los combustibles diesel y biodiesel y crear insolubles de combustible (sedimentos) o geles y sales, cuando se hace reaccionar con algunos componentes de los combustibles, soldaduras de plomo y los revestimientos de zinc se debe evitar, al igual que tubos de cobre, los reguladores de bronce, y piezas de cobre.

5.4.1.6. Transporte

Al igual que con el diesel de petróleo, el Biodiesel100 deben ser transportado de una manera que no conduce a la contaminación. Los siguientes procedimientos se recomiendan para camiones y vagones de ferrocarril y son utilizados por los distribuidores y transportadores de derivados del petróleo diesel:

Asegurarse que los camiones y vagones están fabricados en aluminio, acero al carbono o acero inoxidable.

- Garantizar la correcta inspección o lavado (lavado de certificados) antes de la carga.

- Verificar que la carga anterior transportada y residual. En general, sólo el combustible diesel o biodiesel es aceptable como un residuo. Si el buque no ha pasado por un lavado, algunos residuos (incluidos los

productos alimentarios, los aceites vegetales crudos, gasolina o lubricantes) no puede ser aceptable.

- Asegurarse de que no hay agua residual en el tanque.
- Revisar que las mangueras y las juntas estén limpias y hechas de materiales que sean compatibles con el B100.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS AMBIENTAL DEL PROYECTO

6.1. La sostenibilidad ambiental del biodiesel

La evaluación de emisiones de contaminantes presentes en los gases eliminados por el motor es importante pero no toma en cuenta la producción del combustible. Para evaluar la sostenibilidad ambiental del biodiesel, EPA (2002) empleó el método de análisis de ciclo de vida.

Para el diesel, se evaluaron las emisiones por toda cadena del petróleo hasta la combustión del combustible en el motor. Para el biodiesel, se evaluó la cadena agrícola de producción de soya y las etapas industriales (extracción de aceite y transesterificación), incluyendo el empleo de derivados de petróleo en forma de abonos o fertilizantes agrícolas, y uso de combustibles fósiles en la cadena de producción. El análisis de ciclo de vida mostró que:

- Las emisiones de dióxido de carbón –el principal gas del efecto invernadero– es mayor para el biodiesel que para el diesel hasta en un 3%. Como la mayor parte del carbón del biodiesel es proveniente de la biomasa, su contribución al efecto invernadero no existe pues es un carbón que ya estaba en la atmósfera y fue absorbido durante el crecimiento de la oleaginosa (ciclo del carbón). Al contrario, el carbón del diesel es de origen fósil y estaba presente en el petróleo.

- Las emisiones de dióxido de carbón, a pesar de ser mayores, son casi todas de origen renovable. El análisis de ciclo de vida muestra que la

parte no renovable se debe al uso de derivados de petróleo (combustibles, defensivos agrícolas, extracción por solvente, etc.) a lo largo de la cadena de producción del biodiesel. Las reducciones netas de dióxido de carbono están en alrededor de 78% en el caso de la soya, pero este valor puede ser aún mayor para otras oleaginosas.

- El ciclo de vida del biodiesel produce 32% menos partículas y hollín y 35% menos monóxido de carbono.

- Las emisiones de óxidos de nitrógeno son 13% mayores para el biodiesel.

- Las emisiones de hidrocarburos son 35% mayor para el biodiesel debido al uso de fertilizantes agrícolas en las plantaciones de soya y empleo de hexano en el proceso de extracción del aceite. Esto ocurre a pesar de que existe fuerte reducción de emisiones de hidrocarburos en el gas de escape de los motores. Para otras oleaginosas y para otros tipos de proceso de extracción estos valores pueden cambiar mucho de forma favorable al biodiesel.

- La generación de aguas residuales contaminadas es 80% menor para la producción del biodiesel que para la producción del diesel. Lo mismo ocurre para residuos sólidos peligrosos en magnitud aún mayor: el biodiesel genera sólo un 5% de los residuos de la producción de diesel.

- El consumo de agua para producción de biodiesel es alrededor de tres órdenes de magnitud, mayor que para la producción de diesel, es decir, 1.000 veces mayor.

6.2. Sostenibilidad energética del biodiesel

La sostenibilidad energética es evaluada de modo muy similar al método de ciclo de vida para contaminantes. El National Renewable Energy Laboratory (Sheehan y otros, 1998) de los Estados Unidos efectuó una evaluación de la energía total que se emplea para la producción de diesel y de biodiesel y la cantidad de energía contenida en cada uno de estos combustibles. La evaluación toma en cuenta, para el caso del diesel, la energía fósil empleada para la extracción de petróleo (92%), refinación para obtener los derivados (5,4%), transporte del petróleo y del diesel (2,6%). En el caso el biodiesel, se toma en cuenta la etapa agrícola de la soya (21%), la extracción del aceite de soya (26%), la transesterificación (48,5%) y el transporte de la soya del aceite y del biodiesel (4,5%).

Para producir una unidad de energía en el diesel se emplean 1,2 unidades de energía fósil. Para el biodiesel, para cada unidad de energía en el producto se emplean tan sólo 0,3125 unidades de energía fósil. De otra forma, para el diesel, se obtiene 0,83 unidades de energía para cada unidad de energía fósil, mientras que para el biodiesel se obtienen 3,2 unidades de energía por unidad de energía fósil empleada en la producción. Se debe resaltar que este efecto multiplicador es lo que confirma el carácter renovable del biodiesel.

Resultados similares se obtuvieron en otros estudios de la colza en Europa. Los números varían de acuerdo con los subproductos considerados, pero en el peor caso (sólo el biodiesel) se emplea 0,74 unidades de energía fósil para cada unidad de energía obtenida en el biodiesel de colza; en el mejor caso, se obtuvo un factor 0,26.

Los mejores valores de sostenibilidad se obtienen para la palma africana: de 0,178 unidades de energía fósil por unidad de energía en el biodiesel hasta el 0,104 (es decir, 5,6 hasta 9,6 unidades de energía en el biodiesel por unidad de energía fósil empleada).

A pesar de las ventajas ambientales y de la sostenibilidad energética de su producción, el biodiesel no puede ser visto como la solución final para la sustitución de todo el diesel porque las áreas de siembra necesarias son muy elevadas y la competencia por tierra podría causar daños a la producción de alimentos. Los volúmenes de diesel consumidos son muy elevados.

Finalmente, es importante tener en cuenta que los beneficios ambientales del biodiesel deben ser entendidos como una compensación extra y no como el principal motivo para su empleo. Para países en desarrollo, los compromisos con el Protocolo de Kyoto no son obligatorios. Además, la cantidad de diesel a ser sustituida es pequeña y los beneficios ambientales serán proporcionales al grado de sustitución.

CAPITULO 7. ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO

El montaje de una planta y la importación del aceite desde un proveedor en Asia es la mejor elección para tener una producción más inmediata de biodiesel y analizar con más detenimiento la siembra, cosecha y extracción del aceite para el uso propio en la industria azucarera. Como se vio en la parte de arriba, el arrendamiento de 900 hectáreas para la producción de jatropha para lograr mezcla biodiesel²⁰ puede llegar a costar US\$360,000 por año lo cual para una producción estimada de 540000 galones en un año al producir 6 meses, le provocan a dicha cantidad una subida de costo por galón de US\$ 0.67 o sea Q5.20 al cambio de Q7.8/1US\$. Este valor de arrendamiento ya representa un 33% del costo de materia prima con respecto a la importación del aceite.

Se hizo el siguiente análisis de inversión para el caso de montaje de planta de paquete e importación de aceite de jatropha con contrato de 5 años.

Tabla 14. Flujos de efectivo para proyecto producción de biodiesel en ingenio nacional.

COSTO DE INVERSIÓN	Q 1,954,711.20	
CANTIDAD A PRODUCIR	540000	GAL
PRECIO DEL DIESEL/GAL	Q 28.00	
COSTO BIODIESEL 1ER AÑO	Q 19.50	

	VENTA BIODIESEL	VENTA DE GLICERINA	COSTO BIODIESEL	GANANCIA BRUTA	ISR	GANANCIA NETA
1ER AÑO	15120000	73580	10530000	4663580	1538981.4	Q 3,124,598.60
2do AÑO	14040000	73580	11583000	2530580	835091.4	Q 1,695,488.60
3er AÑO	12960000	73580	12741300	292280	96452.4	Q 195,827.60
4to AÑO	16200000	73580	14015430	2258150	745189.5	Q 1,512,960.50
5to AÑO	15120000	73580	14716201.5	477378.5	157534.905	Q 319,843.59

Fuente: Byron López Maldonado

Para este análisis se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Se supuso que el precio del diesel en el primer año era de Q28.00, que dicho precio iba a registrar una baja de Q 2.00 quetzales el segundo año; una baja de Q 4.00 con respecto al primer año para el tercer año; un aumento de Q 2.00 quetzales el 4to año con respecto al primero y el quinto año el mismo precio que el primer año.

Esto debido a que efectivamente como en la crisis petrolera del año 2007-2008, el diesel puede bajar y también puede volver a subir, caso que es extremadamente difícil determinar hasta por parte de los economistas más especializados.

De cualquier forma una de las medidas que tendrían los países productores de petróleo para no verse disminuidos en sus ventas y que haya combustibles alternativos, es bajando precios. También se consideró un aumento de costos de producción del biodiesel de 10% cada año con

respecto al otro y para el quinto año el 5%. Con esto se presenta un cuadro en cierto grado pesimista.

Con respecto a el impuesto sobre la renta, se consideró para lo mismo, para hacer el caso lo más pesimista posible y así determinar si conviene un proyecto de estos. En vista que el producto sería para consumo propio y comentando con un abogado, lo más seguro que no se tendría que pagar esto a menos que se declare la planta de biodiesel como una unidad de negocios aparte que le venda al ingenio, caso que no convendría.

7.1. TIR

Se presenta la tasa interna de retorno para el proyecto de montaje de planta en el ingenio usando de aceite de jatropha importado. La comparación hecha para determinar la ganancia neta se hace tomando en cuenta el posible precio del diesel que podría quedar rondando los US\$ 3.59 o bien los Q 28.00.

Tabla 15. Análisis TIR para proyecto de producción de biodiesel en ingenio nacional

ANALISIS TIR	
INVERSION	Q (1,954,711.20)
1ER AÑO	Q 3,124,598.60
2do AÑO	Q 1,695,488.60
3er AÑO	Q 195,827.60
4to AÑO	Q 1,512,960.50
5to AÑO	Q 319,843.59
TIR	112%

Fuente: Byron López Maldonado

7.2. VAN:

El análisis de Valor Actual Neto refleja un resultado positivo lo que también determina que el proyecto puede constar de muy buena viabilidad económica.

Tabla 16. Análisis VAN para proyecto de producción de biodiesel en ingenio nacional.

ANALISIS VAN	
INVERSIÓN	Q (1,954,711.20)
1ER AÑO	Q 3,124,598.60
2do AÑO	Q 1,695,488.60
3er AÑO	Q 195,827.60
4to AÑO	Q 1,512,960.50
5to AÑO	Q 319,843.59
VAN	Q3,666,161.49

Fuente : Byron López Maldonado

En este caso el análisis financiero indicaría una buena probabilidad de tener éxito a la hora de llevar a cabo el proyecto. Este valor actual neto también nos refleja junto con el valor obtenido para la TIR que la recuperación de la inversión podría darse en términos de un año luego de puesto a lo cual es muy atractivo para un grupo de inversores exigentes.

CONCLUSIONES

1. La propuesta de diseño de una planta de producción de biodiesel en un ingenio, se adecua a las instalaciones y servicios existentes.
2. El estudio de prefactibilidad financiera para un proyecto de producción de biodiesel con aceite importado presenta valores de TIR y VAN que indican que el proyecto reduciría costos en combustible.
3. El estado actual del mercado nacional e internacional del aceite, muestra que Guatemala no tiene la capacidad para producir aceite para uso en la producción de biodiesel, concentrando la producción para el consumo.
4. Importar aceite de jatrofa en el mercado internacional es la mejor alternativa para iniciar a corto plazo un proyecto de producción de biodiesel que daría los indicadores de confianza para incrementar la producción y uso con respecto al tiempo.

RECOMENDACIONES

1. El gobierno por medio del ministerio de energía y minas debe crear incentivos para la producción de biodiesel a fin de reducir en parte la dependencia de los combustibles fósiles
2. La industria Guatemalteca tiene que someter a análisis y estudio el uso de energía renovable como el cultivo de oleaginosas y producción de biodiesel para la creación de fuentes de empleo y mejoramiento de medio ambiente.
3. El ministerio de ambiente debe tener más participación en el desarrollo de uso de energías renovables y en el caso de la jatrofa, proponerla como un cultivo que puede activar la economía de las partes secas del país.

BIBLIOGRAFÍA

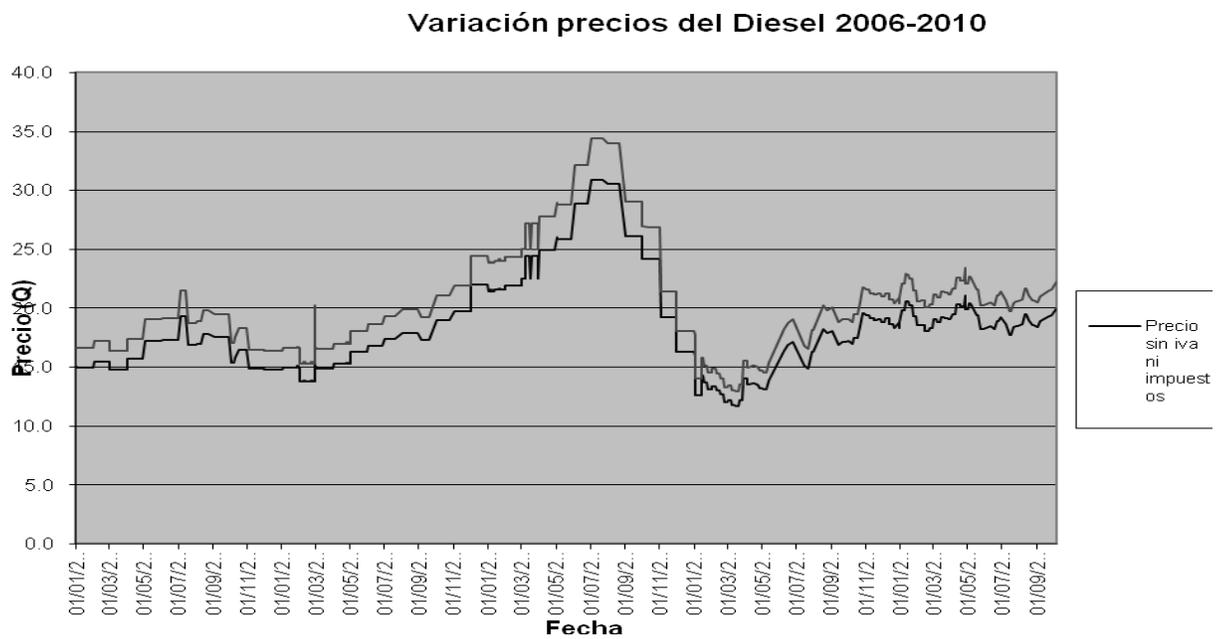
1. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo. 2007. Perspectivas para el biodiesel en Centro América: Costa Rica, El salvador, Guatemala y Honduras. CEPAL. Consultado el 20 de septiembre de 2010 Disponible en: www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf.
2. MAGA-UPGGR. 2006. Guatemala. Mapa de Cobertura del Suelo y Uso de la Tierra, escala 1:50,000.
3. Thomas Mielke. 2007. El Mercado de Aceites en el nuevo contexto. Disponible en www.asagir.org.ar.
4. Francisca Fernández-Tirado*, Carlos Parra-López. 2008. Objetivos de sostenibilidad para el modelo de producción y consumo de biodiesel en España. Disponible en: www.uibcongres.org/imgdb/archivo_dpo4228.pdf
5. Maribel M. Loera-Quezada y Eugenia J. Olguín. 2010. Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. Disponible en: www3.inecol.edu.mx/.../loera_olguin_2010_revlatinoambiotecnol_ambalgal_v1n1.pdf.
6. Rodolfo José Larosa. 2004. Proceso para la producción de biodiesel. Disponible en : www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/46bib_arch.pdf.

ANEXOS Y APÉNDICES

Apéndice A.

Comportamientos del precio del petróleo con respecto al tiempo.

Figure 18. Variación de precios del diesel 2006-2010



Fuente : US Energy Information Administration

Tabla 17. Comportamiento de precios del diesel años 1994-2010(US\$/gal)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1994			1.107	1.107	1.100	1.103	1.110	1.123	1.125	1.122	1.131	1.113
1995	1.098	1.088	1.088	1.104	1.126	1.120	1.100	1.105	1.119	1.115	1.120	1.130
1996	1.145	1.145	1.183	1.275	1.273	1.201	1.176	1.201	1.265	1.323	1.323	1.309
1997	1.291	1.280	1.229	1.212	1.196	1.173	1.151	1.165	1.160	1.183	1.192	1.166
1998	1.120	1.084	1.063	1.067	1.069	1.041	1.029	1.007	1.024	1.039	1.022	0.973
1999	0.967	0.959	0.997	1.079	1.073	1.074	1.122	1.172	1.215	1.228	1.263	1.292
2000	1.356	1.461	1.479	1.422	1.420	1.421	1.434	1.466	1.637	1.637	1.621	1.565
2001	1.524	1.492	1.399	1.422	1.496	1.482	1.375	1.390	1.495	1.348	1.259	1.167
2002	1.153	1.152	1.230	1.309	1.305	1.286	1.299	1.328	1.411	1.462	1.420	1.429
2003	1.488	1.654	1.708	1.533	1.451	1.424	1.435	1.487	1.467	1.481	1.482	1.490
2004	1.551	1.582	1.629	1.692	1.746	1.711	1.739	1.833	1.917	2.134	2.147	2.009
2005	1.959	2.027	2.214	2.292	2.199	2.290	2.373	2.500	2.819	3.095	2.573	2.443
2006	2.467	2.475	2.559	2.728	2.897	2.898	2.934	3.045	2.783	2.519	2.545	2.610
2007	2.485	2.488	2.667	2.834	2.796	2.808	2.868	2.869	2.953	3.075	3.396	3.341
2008	3.308	3.377	3.881	4.084	4.425	4.677	4.703	4.302	4.024	3.576	2.876	2.449
2009	2.292	2.195	2.092	2.220	2.227	2.529	2.540	2.634	2.626	2.672	2.792	2.745
2010	2.845	2.785	2.915	3.059	3.069	2.948	2.911	2.959	2.946			

Fuente: U.S. Energy Information Administration

Apéndice B : Propiedades de combustibles

Figura 19 Comparación de propiedades del diesel, aceites y biodiesel de distintos orígenes

Cuadro 6

COMPARACIÓN DE PROPIEDADES: DIESEL, ACEITES Y BODIESEL

Combustible	Poder calorífico	Densidad	Índice de Yodo	Viscosidad	Número Cetano	Punto Fulgor
	kJ/kg	g/litro		mm ² /s 38 °C		°C
Diesel	45 343	810-870	-----	1,5-4,5	45	58
Aceite de soya	39 623	914	117 – 143	32,6	38	230
Biodiesel soya	39 760	885	125 - 140	4,1 (40°C)	48 ^a	156
Aceite girasol	39 575	918	110 – 143	37,1	37	274
Biodies. girasol	40 579	878	126	8,5	49	183
Aceite algodón	39 468	912	90 – 119	33,5	42	234
Biodie. algodón	40 580	880	106	3,8	51	110
Aceite de colza	39 709	914	94 – 120	59	38	246
Biodiesel colza	40 880	874	97	6,0 (40°C)	54	174
Aceite de maiz	39 500	915	103 – 140	34,9	38	277
Biodiesel freír	39 700	872	123	5,8 (40°C)	58	124
Biodie. Ganado	39 400	876	30-56	4,1 (40°C)	68	157
Biodie. Cerdo	--	870	60-70	3,9	65	--
Biodiesel Coco	---	---	15-40	2,6 (40°C)	68	104
Biodi. Jatropha	39 340	881	--	3,6 (40°C)	58 ^a	174
Biodiesel Palma	36764	868	44-58	5,3 (40°C)	62	191

Fuente: Knothe y otros (1997), NREL/SR-580-24089, p.173, Allen y Watts (2000).

a/ Gran dispersión de resultados.

Apendice C : Ofertas de Aceite de jatropha

1. Oferta de productor de Malasia

Oil Type: Jatropha Oil

Post: We supply all kinds of edible and crude, and all forms of edible oil, Origin of the oil is: Malaysia, Quantity Available: 400,000 MT Delivery Time: 3 weeks Shipment for bulk order, Minimum Order Quantity: 20 MT Delivery terms: CIF First delivery: can start immediately. we are shipping Re-conditioned Drums, We can supply more than 10,000 mt very month for 5 years contract. We are a service orientated in Malaysia our company specializes in the international we supply Soyabean Oil, Sunflower Oil Coconut Oil, Palm Oil and Vegetable Oil, Biodiesel Oil, Jatropha Oil, Palm Oil, e.t.c with specific emphasis focused on foreign trade and international marketing, so as to provide perfectly tailor solutions to our customer needs. Do get back to us with your order for us to proceed with your order. Regards Mrs. Aminah Binti Harun, Tel:+60193285630 begin_of_the_skype_highlighting +60193285630 end_of_the_s kype_highlighting, Email: realoiltd@yahoo.com

Production:2010-05

Country:Malaysia

Incoterms :CIF (Incoterms 2000)

Quantity:

Dear

Sir,

Thanks for your prompt reply, regarding your order about the incoterm is CIF prices, we packed in 1 or 2 Litres,bulk,flexi tank or drum, 200lts plastic drums or in customer prefer, we have attach a copy of SGS Certificate with this mail, Our Payment terms is: Bank T/T Wire Transfer, we can supply more than 5000 mt per month for long term contract of 5 years. Do get back to us with your order for us to proceed with your order.

Regards

Mr.Muhammed

Abdul

Tel:

+60123816127

Fax:

+60364023710

Email:

realoiltd@yahoo.com

Skype: realoiltd.

2. Oferta de productor de Camerún

HIGH QUALITY REFINED JATROPHA OIL

FOB Price:	US \$500 - 600 / Metric Ton
	<u>Get Latest Price</u>
Port:	Douala
Minimum Order	20 Metric Ton/Metric Tons
Quantity:	
Supply Ability:	10000 Metric Ton/Metric Tons per Quarter
Payment Terms:	L/C,T/T

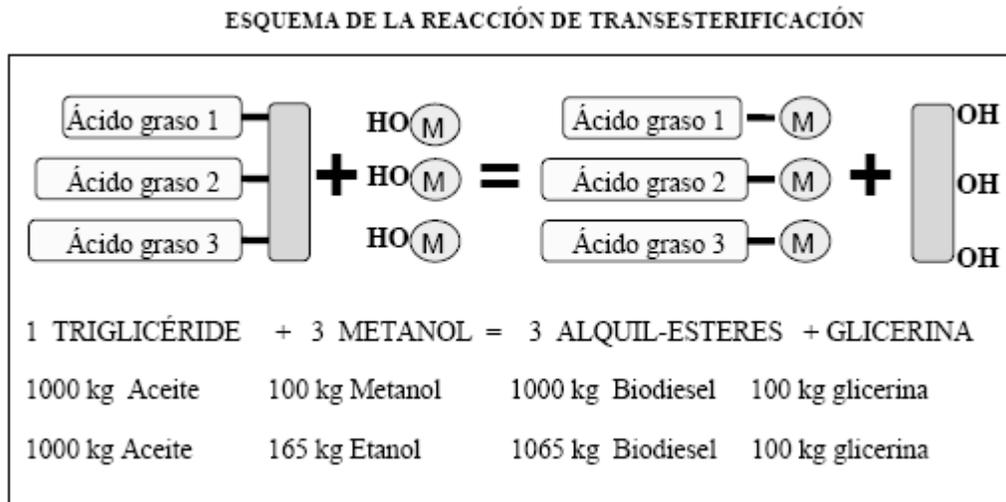
3. Oferta de productor de Argentina

Mail: jatrophacurcas@argentina.com

Usted entro a esta página web porque está interesado en COMPRAR ACEITE o BIODIESEL. Nosotros podemos proveer de aceite a 800 dólares la tonelada FOB. Firmamos contratos a largo plazo.

Apéndice D: Rendimiento de la reacción de transesterificación

Figura 20 Esquema de la reacción de transesterificación



Fuente: www.miliarium.com

Figura 21 Rendimiento de biodiesel por Kg de aceite

CANTIDAD DE BIODIESEL OBTENIDA DE 1.000 KG DE ACEITE			
Materias primas		Productos del proceso	
Reactivos	Peso / kg	Productos	Peso / kg
Aceite	1 000	Biodiesel	942,4
Metanol	140	Glicerina + impurezas	206,9
Hidróxido de potasio	9,3	-----	----
Total reactivos	1 149,3	Total productos	1 149,3

Fuente: Candeia y otros, 2006

Apéndice E: Ofertas de alcohol metílico

1. Alcohol metílico

- Lugar del origen: **Tianjin China (Mainland)**
- Número de modelo: **LJC--0031**
- Precio Fob: **FOB Xingang US\$ 350~500**
- Puerto: **Xingang**
- Condiciones de pago: **L/C, T/T**
- Cantidad de orden mínima: **20 Metric Ton/Metric Tons 1fcl**
- Capacidad de la fuente: **1500 Metric Ton/Metric Tons per Mes aún más**
- Paquete: **el hierro 200KG tecllea, 20mt por 20 FCL**
- Plazo de expedición: **en el plazo de 15-20 días sobre reciba el LC o el pago**

2. Alcohol metílico el 99%

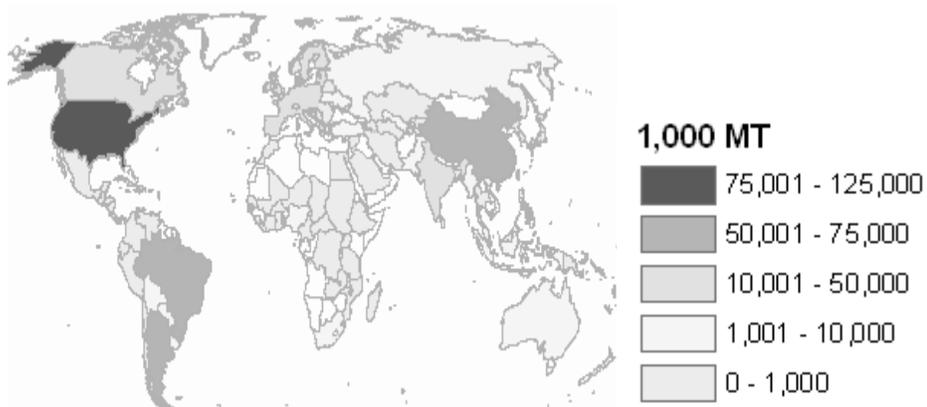
- Lugar del origen: **Tianjin China (Mainland)**
- Número de modelo: **99%**
- Precio Fob: **FOB xingang US\$ 300~600**
- Puerto: **xingang**
- Condiciones de pago: **L/C,T/T**
- Cantidad de orden mínima: **20 Metric Ton/Metric Tons**
- Capacidad de la fuente: **2000 Metric Ton/Metric Tons per Mes**
- Paquete: **el hierro 200KG tecllea, 20mt por 20 FCL**
- Plazo de expedición: **en el plazo de 20 días sobre reciba el LC o el pago**
- Marca: **LJC**

Apéndice F: Mapas de producción mundial de aceites vegetales

Figura 22 Mapa de producción mundial de aceites y sus variaciones

Office of Global Analysis

- **Oilseed Production 2010/2011**



- **Change in Production from Prior Month**



- Source: Production, Supply and Distribution (PSD) Database, August 12, 2010
<http://www.fas.usda.gov/psdonline/>