



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN**

**PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE
BIODIESEL A PARTIR DE PALMA
AFRICANA EN MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A

MARISOL VALADEZ VITE

ASESOR: Q. CELESTINO SILVA ESCALONA

CUAUTILÁN IZCALLI ESTADO DE MÉXICO

AÑO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

U. N. A. M.

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**



**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: TESIS

Procesos de producción de biodiesel a partir de Palma Africana en México

Que presenta la pasante: Marisol Valadez Vite

Con número de cuenta: 300265532 para obtener el Título de: Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de marzo de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	IQ. Margarita Castillo Agreda	
VOCAL	Q. Celestino Silva Escalona	
SECRETARIO	IQ. María Elena Quiroz Macias	
1er SUPLENTE	IQ. Elvia Mayen Santos	
2do SUPLENTE	IQ. Paula Alvarez Fernández	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).
HHA/pm

DEDICATORIAS:

La principal dedicatoria y agradecimiento es para mis padres, por brindarme su apoyo en todo momento, a mi madre por su amor incondicional a la que siempre he admirado por su fortaleza.

A mis hermanos Oscar y Joseline, principalmente deseando que este trabajo sea una motivación para mi hermana menor, para la obtención en un futuro de un título profesional.

A una persona muy especial, con la que he compartido gran parte de esta vida, y he recorrido el camino de nuestra formación académica, por su apoyo y amor incondicional en todo momento. Con todo mi amor, gracias: Jesús Ramón Ayala Barrera.

A mi asesor Q. Celestino Silva Escalona, por ser mi guía en la culminación de este trabajo, por su esfuerzo, apoyo y dedicación, mi más sincero agradecimiento.

Mi admiración y principal agradecimiento por el apoyo brindado y por ser un ejemplo a seguir, con mucho cariño y respeto: Ing. Rodolfo A. López Ortega.

Marisol Valadez Vite

INDICE

INTRODUCCIÓN	4
Objetivo General	5
Objetivos Particulares.....	5
CAPÍTULO 1. BIODIESEL	6
1.1. Antecedentes del Biodiesel.....	6
1.2. Definición del Biodiesel	9
1.3. Materias Primas para la Obtención de Biodiesel	10
1.4. Propiedades del Biodiesel.....	15
1.5. Rendimiento de diversas especies para obtener Biodiesel.....	19
1.6. Reacciones Químicas en la elaboración del Biodiesel.....	20
1.7. Ventajas del Uso de Biodiesel	29
1.8. Limitaciones del Uso del Biodiesel	31
1.9. Análisis de los sectores económicos.....	33
1.10. La Demanda del Biodiesel.....	34
1.11. Leyes de los Bioenergéticos	35
CAPÍTULO 2. OLEAGINOSAS COMO MATERIA PRIMA	37
2.1. Descripción de Variedades de Oleaginosas	37
2.2. Historia de la Palma Africana.....	43
2.3. El Fruto de la Palma Africana	44
2.4. Especificación del Aceite de Palma.....	45
2.5. Usos del Aceite de Palma	47
CAPÍTULO 3. EL SURESTE MEXICANO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	49
3.1. Balance Nacional de Energía	49
3.2. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero asociadas al consumo de combustibles.....	51
3.3. Producción de Palma Africana en México	53
3.4. Condiciones Ambientales	54
3.5. El Sureste Mexicano y la Producción de Palma Africana.	56
CAPITULO 4. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	65
4.1. Etapas de Extracción del Aceite de Palma	65
4.2. Procesos Industriales para la Producción de Biodiesel.....	73
4.3. Tecnologías usadas a nivel mundial para la producción de biodiesel.....	82
4.4. Campeche y la Producción de Biodiesel.	91
4.5. Proceso de Producción de Biodiesel a Partir de Aceite de Palma en Campeche.....	94
4.6. Plantas de Biodiesel en México.....	104
4.7. Costos del Biodiesel	105
CONCLUSIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	108

INDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Ciclo del CO ₂	9
Figura 2. Estructura de un Triglicérido	13
Figura 3. Tipos de Ácidos Grasos	14
Figura 4. Estructura de un Acido Graso Libre.....	15
Figura 5. Reacción de Transesterificación.....	21
Figura 6. Reacción de implicadas en la Transesterificación	22
Figura 7. Reacciones de Saponificación y Neutralización.....	23
Figura 10. Fruto de la Palma Africana.....	44
Figura 11. Usos del Aceite de Palma.....	48
Figura 12. Estructura de Producción de Energía Primaria 2011.....	50
Figura 13. Estructura de las Emisiones de GEI asociadas al consumo de combustible por sector 2011	52
Figura 14.-Estados productores de Palma Africana en México.....	53
Figura 15. Estados Productores de Palma Africana en México.....	56
Figura 16. Municipios del Estado de Chiapas	57
Figura 17 Municipios del Estado de Veracruz.	59
Figura 18. Municipios del Estado de Tabasco.....	61
Figura 19. Municipios del Estado de Campeche	62
Figura 20. Tolla de recibo de racimos de fruto fresco, Góndolas	66
Figura 21. Esterilizador	67
Figura 22. Tambor Desfrutador	67
Figura 23. Tanques Clarificadores.....	69
Figura 24. Tanques de Almacenamiento	69
Figura 25. Desfibrador.....	70
Figura 26. Extracción Industrial de Aceite Crudo de Palma Africana.....	71
Figura 27. Esquema General del Proceso para la Obtención de Biodiesel	72
Figura 28. Proceso Batch o Discontinuo.	75
Figura 29. Proceso de Producción de Biodiesel mediante Reactores de Flujo Pistón.	77
Figura 30. Proceso de Esterificación para la Producción de Biodiesel.....	78
Figura 31. Proceso combinado Esterificación-Transesterificación para la Producción de Biodiesel	79
Figura 32. Proceso en condiciones supercríticas para la producción de Biodiesel	81
Figura 33. Proceso Henkel.	84
Figura 34. Proceso de Deglicerolización Continua (CD) para Transesterificación	86
Figura 35. Tecnología y Transesterificación Estereco.....	87
Figura 36. Tecnología y Transesterificación Ballestra.	89
Figura 37. Flujo del Proceso Batch.	91
Figura 38. Regiones Productoras de Palma de Aceite en Campeche.....	92
Figura 40. Proceso de Producción de Biodiesel de Aceite de Palma.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales Materias Primas para la Producción de Biodiesel.....	13
Tabla 2. Propiedades de Ácidos Grasos	16
Tabla 3. Propiedades del Biodiesel en función de su composición	17
Tabla 4. Comparación del Biodiesel y Diesel	18
Tabla 5. Rendimiento de Cultivos Oleaginosos	19
Tabla 6. Especificaciones sensoriales del Aceite de Palma	46
Tabla 7. Especificaciones Físico-químicas del Aceite de Palma	46
Tabla 8. Especificaciones de Ácidos Grasos de Aceite de Palma	47
Tabla 9. Condiciones Edafoclimatológicas de la Palma de Aceite.....	55
Tabla 10. Producción de Palma Africana en Chiapas	58
Tabla 11. Producción de Palma Africana en Veracruz	60
Tabla 12. Producción de Palma Africana en Tabasco	61
Tabla 13. Producción de Palma Africana en Campeche. Gobierno del Estado de Campeche 2011.....	62
Tabla 14. Plantas Extractoras de Aceite de Palma en México.....	64
Tabla 15. Plantas Refinadoras en la República Mexicana.....	93

INDICE DE GRAFICOS

Grafico 1. Composición de diferentes Materias Primas	17
--	----

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una alta dependencia energética de petróleo en el mundo, la volatilidad de sus precios y el agotamiento inminente de sus reservas nos coloca en una situación vulnerable. Asimismo el problema del cambio climático, en especial el resultado del calentamiento global provocado por la acumulación de los gases de efecto invernadero, es un tema que en los últimos años ha tomado una gran relevancia, por el deterioro ambiental que está sufriendo nuestro planeta.

Se señala como principal responsable del calentamiento global al dióxido de carbono, pues la quema excesiva de los combustibles fósiles en las plantas generadoras de electricidad y el transporte automotor, han incrementado excesivamente el lanzamiento de emisiones de CO₂ a la atmósfera, por ello es necesario empezar a voltear hacia nuevas energías alternas, como lo es el biodiesel, un biocombustible alternativo del diesel del petróleo.

El biodiesel se obtiene a partir de aceites producidos de semillas vegetales provenientes de plantas, que a su vez realizan mediante el proceso de fotosíntesis la purificación del CO₂ del ambiente.

El presente trabajo busca realizar un análisis de los diversos procesos de producción de biodiesel a partir del aceite de palma africana y proponer cual es el más factible para la instalación de una planta productora de biodiesel en el sureste de la república mexicana, de los cuales se eligió el estado de Campeche, ya que actualmente el estado cuenta con 5,939.9 Ha que generan un volumen de producción de 40, 090.48 toneladas de palma africana.

La gran variedad de subproductos derivados del fruto de palma de aceite, actualmente presentan una alta demanda, debido a sus diferentes usos y propiedades químicas. Aunado a lo anterior es importante aprovechar el clima de las regiones tropicales de nuestro país, por medio del impulso a la producción del cultivo de la palma de aceite, para abastecer el mercado nacional.

Objetivo General

Analizar los diversos procesos de obtención de biodiesel a partir del aceite de palma africana en México y proponer el más factible para la instalación de una planta en el sureste de la República Mexicana (Campeche).

Objetivos Particulares

- Analizar las ventajas y desventajas de la palma africana para la producción de biodiesel en México.
- Analizar el proceso de extracción del aceite de palma africana, para su posterior transformación en biodiesel.
- Indicar cuáles son los principales productores de biodiesel a partir del aceite de palma en el sureste mexicano.

CAPÍTULO 1 BIODIESEL

1.1. Antecedentes del Biodiesel

La historia de los biocombustibles como su desarrollo y utilización se puede fijar desde los años ochenta, su principal visión estaba encaminada al desarrollo de los motores de combustión¹, es necesario recordar a dos de los pioneros de la industria automotriz: Rudolph Diesel y Henry Ford.

El primero es Rudolph Diesel, Ingeniero alemán inventor del motor de combustión de alto rendimiento que lleva su nombre, el motor diésel.² Motor aplicable a la locomoción, presentado en la feria internacional de París en 1898, como el primer motor que usa aceite vegetal como combustible y posteriormente llamado "motor de combustión", que tomaría el nombre de su inventor.

Posteriormente Henry Ford, retoma los conocimientos anteriores del motor diesel, y produce sus primeros automóviles estadounidenses que funcionaban por medio del bioetanol. En la publicación del New York Times en 1925, Ford manifestaba que el etanol sería el combustible del futuro: “Existe combustible en cada partícula de materia vegetal que puede ser fermentable. Existe suficiente alcohol en la cosecha de un año de un acre de papas como para movilizar la maquinaria necesaria para cultivarla por 100 años.”

Durante las dos guerras mundiales se intensifica el desarrollo tecnológico en el campo de los motores diesel, gracias a los problemas de abastecimiento de los productos petrolíferos, recurriendo a los biocombustibles como solución.

¹ A. Murugesan, C.U., R. Subramanian, N. Nedunchezian., *Biodiesel as an alternative fuel for diesel engines. -A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2007.

² Meher, S., Naik., *Aspects of biodiesel production by transesterification. -A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2006.

En el año 1973, se presenta la primera crisis del petróleo, se plantea el ahorro de la energía y la utilización de recursos energéticos renovables, reiniciándose entre otras la investigación en el campo de los biocombustibles líquidos de origen vegetal.³

Como respuesta a la crisis del petróleo de 1973, las políticas energéticas de los años ochenta favorecieron la búsqueda de alternativas en la dependencia de los combustibles fósiles. En el año 1975, se da la aprobación del Programa Nacional de Alcohol, en Brasil, al entrar en práctica es considerado como el primer y mayor programa de energías renovables a gran escala, cuyo objetivo era el de estimular la sustitución de las gasolinas por alcohol, y en consecuencia, reducir la dependencia del país frente a la utilización de combustibles fósiles.

Sin embargo, el uso de aceites vegetales brutos como combustible en los motores Diesel originaba diversos problemas, tales como, taponamientos de filtros, líneas e inyectores, depósitos de carbón en la cámara de combustión, excesivo desgaste del motor, degradación del aceite lubricante por polimerización, entre otras.

Como solución a estos problemas, se han planteado diversas alternativas⁴:

1. Crear motores completamente nuevos para los combustibles alternativos.
2. Modificar los motores actuales para que se adapten a los combustibles alternativos.
3. Utilizar los motores actuales, modificando los combustibles alternativos.

Siendo esta última la que goza de mayor difusión actualmente, cuyo objetivo principal es rebajar la viscosidad de los aceites vegetales hasta valores cercanos al de origen fósil, para poder ser usados en los motores Diesel. Los investigadores han planteado cuatro técnicas para conseguirlo: mezclas de aceite gasóleo, microemulsión, pirólisis y transesterificación⁵, siendo

³ Larosa R. J. "Proceso para la Producción de Biodiesel," (Mayo, 2006)

⁴ Idem

⁵ Meher, S., Naik., Aspects of biodiesel production by transesterification. Reviews. 2004.

esta última la alternativa más viable, la más estudiada y la que mejores resultados ha ofrecido hasta la fecha.

Las primeras pruebas técnicas con biodiesel se realizaron en 1982, en Austria y Alemania, y fue en 1985 cuando en Silberberg (Austria) se construyó la primera planta piloto de producción del mismo. Actualmente países como Alemania, Francia, Austria, Estados Unidos, Canadá, Suecia y Brasil, son pioneros en el desarrollo, producción y utilización del biodiesel.

La percepción actual es que los biocombustibles no podrán sustituir totalmente a los combustibles fósiles, pero sí complementarlos en forma de diferentes mezclas con el fin de reducir la dependencia respecto del petróleo.

Por último, es preciso recordar que uno de los principales impulsos del actual desarrollo de los biocombustibles está relacionado con sus características medioambientales, a la volatilidad del precio del petróleo, al eventual agotamiento de los combustibles fósiles y en especial, con el hecho de que son la medida de mayor efecto para disminuir las emisiones del sector transporte y reducir su efecto en relación con el cambio climático.

El biodiesel que se obtiene a partir de aceites vegetales producidos de plantas oleaginosas, que a su vez realizan mediante el proceso de fotosíntesis la purificación del aire absorbiendo el CO₂ del ambiente, se muestra en la figura 1.

Figura. 1 Ciclo del CO₂

1.2. Definición del Biodiesel

El término Biodiesel se refiere a los aceites vegetales, grasas animales o sus ésteres metílicos que pueden ser utilizados como combustibles. La ASTM (American Society for Testing and Materials) define al biodiesel como un éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para ser utilizados en motores Diesel.⁶

Para la producción de biodiesel se utiliza una gran variedad de materias primas, como las que se mencionan a continuación.

⁶ FRAMES. *Biodiesel, una alternativa viable*. Informes especiales Argentina, Oro Verde, Ciudad Universitaria 2007.

1.3. Materias Primas para la Obtención de Biodiesel

Las materias primas que se pueden emplear en la obtención de biodiesel son muy variadas y pueden clasificarse en:⁷

Aceites Vegetales Convencionales

Las materias primas utilizadas convencionalmente en la producción de biodiesel han sido los aceites de semillas oleaginosas como el girasol, la colza, la soja, el coco; y los aceites de frutos oleaginosos como la Palma Africana.

Aceites Vegetales Alternativos

Además de los aceites vegetales convencionales, existen otras especies más adaptadas a las condiciones del país donde se desarrollan y mejor posicionadas en el ámbito de los cultivos energéticos. En este sentido, destacan la utilización, como materias primas de la producción de biodiesel, los aceites de *Camelina sativa*, *Crambe abyssinica* y *Jatropha curcas*.

Aceites Vegetales Modificados Genéticamente

Los aceites y las grasas se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites con proporciones altas de ácidos grasos insaturados, como el aceite de girasol o de *Camelina sativa*, mejoran la operatividad del biodiesel a bajas temperaturas, pero disminuyen su estabilidad a la oxidación, que se traduce en un índice de yodo elevado. Por este motivo, se pueden tener en consideración, como materias primas para producir biodiesel, los aceites con elevado contenido en insaturaciones, que han sido modificados genéticamente para reducir esta proporción, como el aceite de girasol de alto oleico.

⁷ Fangrui M.A., *Biodiesel production a review*. 1999.

Aceites de Fritura Usados

El aceite residual de cocina es uno de los grandes responsables de la contaminación del agua. Los aceites comestibles provenientes de materias primas como el girasol, soja, oliva, maíz o palma, forman en una superficie del agua una película difícil de eliminar que afecta su capacidad de intercambio de oxígeno y altera el ecosistema.

La necesidad de refinado de algunos aceites vegetales no los hace económicamente factibles para la producción de biodiesel, debido al alto costo de la materia prima y de producción. El costo del aceite refinado representa un 75 a 85% del precio total del biodiesel.

Los aceites residuales de cocina usados, son principalmente obtenidos de la Industria de restaurantes o reciclados en sitios especiales. Puede no tener ningún costo o un 60% menos que los aceites refinados dependiendo de la fuente y la disponibilidad, los aceites usados presentan un gran nivel de reutilización, y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible. Sin embargo, estos aceites tienen propiedades tanto del aceite crudo como del refinado. El calor y el agua aceleran la hidrólisis de los triglicéridos y aumenta el contenido de ácidos grasos libres en el aceite. El material insaponificable, la viscosidad y la densidad aumentan considerablemente debido a la formación de dímeros y polímeros, pero el índice de yodo y la masa molecular disminuyen. Por estas razones, la utilización de aceites usados presenta dificultades logísticas y técnicas, no sólo por su recolección, sino también por su control y trazabilidad debido a su carácter de residuo. Otros problemas encontrados al utilizar aceites reciclados para producir biodiesel tienen que ver con los altos contenidos de material insaponificable, cantidad de agua y el alto contenido de ácidos grasos libres, por lo cual requiere de varios procesos para acondicionar el aceite para la transesterificación.

Grasas Animales

Esta materia prima incluye los subproductos (sebos) de una gran variedad de animales domésticos tales como vacas, aves, cerdos. Las grasas animales son caracterizadas por contener un gran porcentaje de ácidos grasos saturados en comparación con los aceites

vegetales. Esto afecta las propiedades del biodiesel y su comportamiento a bajas temperaturas, lo que representa un problema para operar en invierno. Por otro lado presentan un gran poder calorífico y un alto número de cetano. Las grasas animales normalmente son consideradas como productos de desecho, por esta razón normalmente son mucho más baratas que las otras materias primas de primera generación, lo cual las hace atractivas para la producción del biodiesel. Debido a su alto grado de ácidos grasos libres estas grasas requieren una transesterificación en dos etapas, en la cual primero se hace un pretratamiento con una catálisis ácida (H_2SO_4), seguida por una catálisis convencional con una base fuerte (NaOH o KOH). Dependiendo de su origen el biodiesel puede presentar problemas de estabilidad a la oxidación y requiere la adición de antioxidantes.

Aceites de otras fuentes

Microalgas.- Las microalgas son organismos fotosintéticos, procariotas o eucariotas, que pueden crecer rápidamente y reproducirse en condiciones extremas debido a su simple estructura unicelular o multicelular. Ejemplos de microorganismos procariotas son las Cianobacterias (Cyanophyceae), y de microalgas eucariotas son las algas verdes (Chlorophyta) y las diatomeas (Bacillariophyta). Producir biodiesel de algas requiere un sistema de cultivo y recolección a gran escala, con el reto de reducir el costo por unidad de área. A gran escala, las algas necesitan condiciones cuidadosamente controladas y un ambiente natural óptimo. Las actuales limitaciones para extender la utilización de esta materia prima para la producción de biodiesel tienen que ver con la optimización de la recolección de las microalgas, los procesos de extracción, y el suministro de CO_2 para una mejor eficiencia de la producción de microalgas. También la luz, los nutrientes, temperatura, turbulencias, niveles de CO_2 y O_2 necesitan ser ajustados cuidadosamente para proporcionar condiciones óptimas y de esta manera obtener los mejores rendimientos del contenido de aceite y biomasa.

En el presente trabajo se utilizará como materia prima, una semilla oleaginosa perteneciente al grupo de los “Aceites Vegetales Convencionales”, la Palma Africana.

Tabla 1. Principales Materias Primas para la Producción de Biodiesel⁸.

Aceites Convencionales	Aceites Vegetales Alternativos	Otras fuentes
Girasol	Brassica carinata	Aceite de semillas modificadas genéticamente
Colza	Cynara curdunculus	Grasas animales (sebo de vaca, grasa de pollo y de pescado)
Coco	Camelina sativa	Aceites de microalgas
Soja	Crambe abyssinica	Aceite de producciones microbianas
Palma	Pogianus	Aceites de fritura

Los aceites y grasas usados como materia prima para la producción de biodiesel presentan diferentes composiciones que es necesario conocer, y las cuales se describen a continuación.

Composición de los Aceites y Grasas⁹

Los aceites y grasas están compuestos principalmente por moléculas denominadas triglicéridos, que son ésteres de 3 ácidos grasos unidos a un glicerol, como se muestra en la Figura 2.

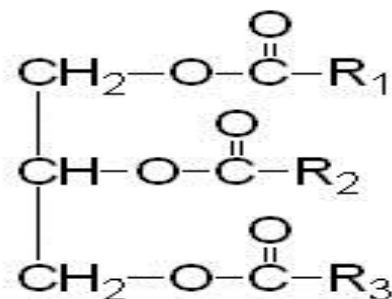


Figura 2. Estructura de un Triglicérido

⁸ <http://www.biodisol.com/biodiesel> 10-05-2012

⁹ LAWSON H. (1994). *Aceites y grasas alimentarios - Tecnología, utilización y nutrición* Zaragoza: Editorial Acribia.

Tipos de ácidos grasos¹⁰

Los ácidos grasos se clasifican según el número de dobles enlaces que poseen. Las grasas saturadas no contienen dobles enlaces, las monoinsaturadas contienen uno y las poliinsaturadas dos o más enlaces, esto se puede observar en la Figura 3.

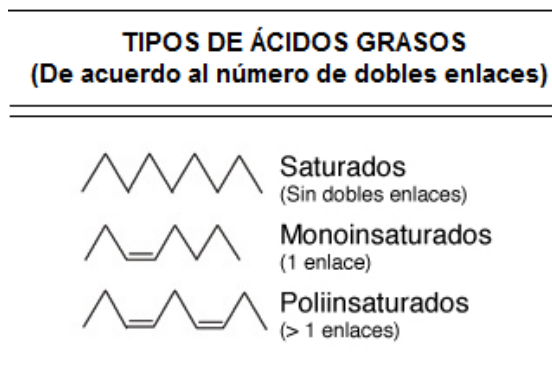


Figura 3. Tipos de Ácidos Grasos

Los dobles enlaces entre átomos de carbono son más reactivos que los enlaces simples y pueden, por ejemplo, reaccionar con hidrógeno para transformarse en enlaces simples. Un ácido graso con dos o más insaturaciones (*poliinsaturado*) es más inestable y reacciona con hidrógeno, oxígeno y otros elementos aún más fácilmente que los ácidos grasos monoinsaturados.

Cualquier ácido graso no unido a glicerol o a alguna otra molécula en un aceite o grasa se denomina *ácido graso libre* (AGL). La mayoría de los aceites no refinados contienen cantidades relativamente altas de AGL. El aceite de soya crudo, por ejemplo, contiene típicamente entre 0,5 y 1,5%. El aceite crudo de palma contiene entre 3% y 5% de ácidos grasos libres. En la Figura 4, se muestra la estructura de un Acido Graso Libre AGL.

¹⁰ Idem.

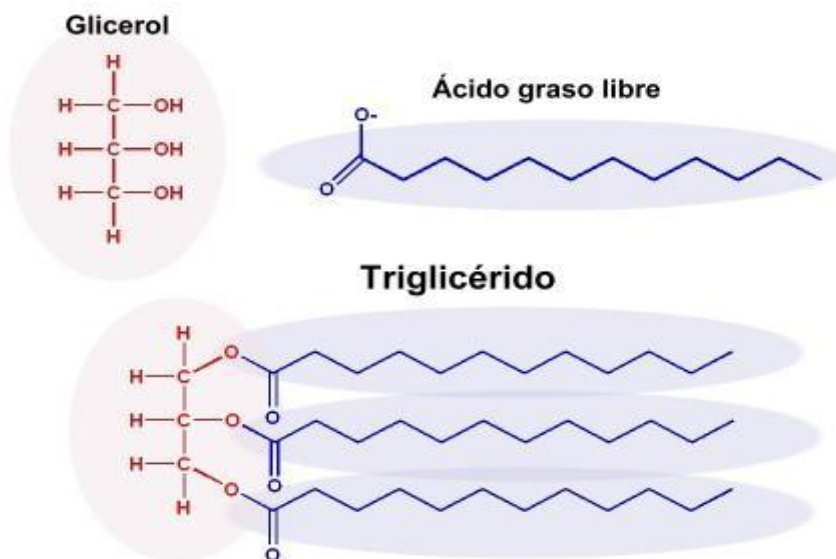


Figura 4. Estructura de un Acido Graso Libre¹¹

Los aceites recién extraídos de semillas oleaginosas se denominan *brutos* o *crudos*. Además de los triglicéridos, contienen cantidades variables de otras sustancias presentes naturalmente, como ácidos grasos libres, estos ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiésel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel.¹²

1.4. Propiedades del Biodiesel

Las propiedades del biodiesel varían de acuerdo con la materia prima que se esté utilizando, es decir de la proporción de cada tipo de ácido graso en el aceite o grasa empleada.¹³ En la Tabla 2, se muestran algunas propiedades de los ácidos grasos encontrados más frecuentemente en los aceites vegetales. La nomenclatura del acrónimo indica el tamaño de la cadena de carbón y la existencia de enlaces dobles: C18:1 indica que la cadena carbónica es de 18 átomos de

¹¹ <http://industrialactea2010.wikispaces.com/caracteristicas> 13-05-2012

¹² ZHANG Y., DUBEE M.A., MCLEAN D.D., KATES M. (2003). «Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment». *Bioresource Technology* 89 (2003)

¹³ Perspectivas para el Biodiesel en Centroamérica. Convenio CEPAL. República Federal Alemana 2007.

carbón y existe un enlace doble en la cadena. Los enlaces dobles caracterizan el grado de saturación del ácido como se menciono anteriormente, los saturados no poseen enlaces dobles de carbón; los insaturados poseen un enlace doble y los poliinsaturados poseen dos o más enlaces dobles. Asimismo podemos observar que el punto de fusión crece con el tamaño de la cadena de átomos de carbón, los poli-insaturados poseen los más bajos puntos de fusión. De modo general, el número de cetano, el calor de combustión, el punto de fusión y la viscosidad aumentan con el tamaño de la cadena carbónica y disminuyen con el aumento de la insaturación.

Tabla 2. Propiedades de Ácidos Grasos¹⁴

Ácido graso	Acrónimo	Masa molecular	Punto de fusión °C	Punto de Ebullición °C	Número Cetano	Calor de combustión Kcal/mol
Caprílico	C8:0	144,22	16,5	239,3	--	--
Cáprico	C10:0	172,27	31,5	270,0	47,6	1 453,07
Láurico	C12:0	200,32	44,0	231,0	--	1 763,25
Mirístico	C14:0	228,38	58,0	250,5	--	2 073,91
Palmitico	C16:0	266,43	63,0	350,0	--	2 384,76
Estearico	C18:0	284,48	71,0	360,0	--	2 696,12
Oléico	C18:1	282,47	16,0	286,0	--	2 657,4
Linoléico	C18:2	280,45	-6,0	230,0	--	--
Linolénico	C18:3	278,44	-11,0	232,0	--	--
Erúxico	C22:1	338,58	33,0	265,0	--	--

Fuente: Briggs y otros, 2005.

El criterio de saturación nos ayuda a evaluar como varían las propiedades del biodiesel de diversas materias primas de las cadenas de ácidos grasos. En la Tabla 3, se indican de modo cualitativo, como la saturación afecta tres propiedades importantes: el número de cetano, el punto de enturbamiento y la estabilidad a oxidación. El biodiesel producido por ácidos grasos saturados posee mayor número de cetano y estabilidad que los insaturados, pero es difícil de emplear en bajas temperaturas (alto punto de enturbamiento).

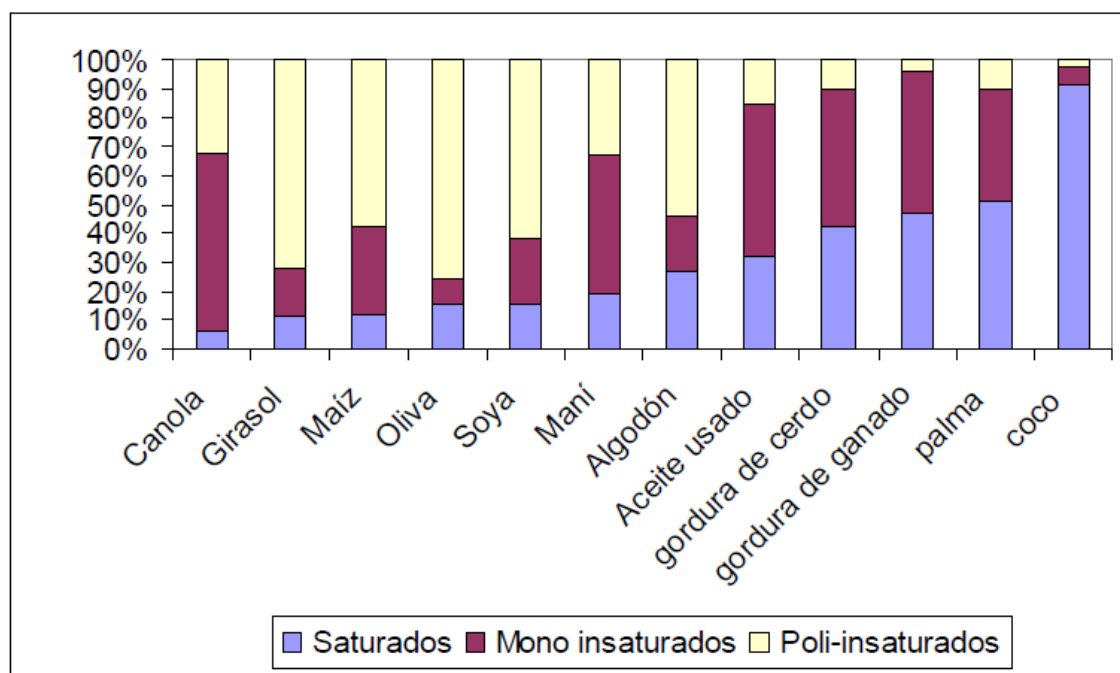
¹⁴ Perspectivas para el Biodiesel en Centroamérica. Convenio CEPAL. República Federal Alemana 2007.

Tabla 3. Propiedades del Biodiesel en función de su composición¹⁵.

	Saturados	Mono-Insaturados	Poli-insaturados
Ácido graso	C12:0 a C22:0	C16:1 a C22:1	C18:2; C18:3
Número de cetano	Alto	Medio	Bajo
Punto de enturbamiento	Alto	Medio	Bajo
Estabilidad	Alto	Medio	Bajo

Fuente: USDOE, 2006

Para poder tener un entendimiento más claro de cuáles son las materias primas que presentan las características mencionadas en la tabla 3, podemos observar el grafico 1, que nos muestra la composición de una gran variedad de materias primas.



Fuente: USDOE 2006, biodiesel.

Gráfico 1. Composición de diferentes Materias Primas¹⁶

El aceite de palma es saturado solamente en un 50%, su composición en promedio es:

- 50% ácidos grasos saturados (principalmente ácido palmítico)
- 40% ácidos grasos monoinsaturados (principalmente ácido oleico)
- 10% ácidos grasos poliinsaturados.

¹⁵ Perspectivas para el Biodiesel en Centroamérica. Convenio CEPAL. República Federal Alemana 2007.

¹⁶ Idem.

Asimismo es importante conocer las propiedades del biodiesel con las del diesel, las cuales se observan en la tabla 4, que se muestra a continuación:

Tabla 4. Comparación del biodiesel y diesel¹⁷

Propiedades	Biodiesel	Diesel
Metil éster	95.5->98%	
Carbono (%peso)	77	86.5
Azufre (%peso)	0.0024	0.05 máx.
Agua (ppm)	0.05 % máx.	161
Oxígeno (%peso)	11	0
Hidrógeno (%peso)	12	13
Número de cetano	48-55	40-55
PCI (KJ/Kg)	37700	41860
Viscosidad cinemática (40°C)	1.9-6.0	1.3-4.1
Punto de inflamación (°C)	100-170	60-80
Punto de ebullición (°C)	182-338	188-343
Gravedad específica (Kg/L) (60°C)	0.88	0.85
Relación aire/combustible	13.8	15

Se observa que las propiedades de ambos combustibles no presentan grandes diferencias; sin embargo, el biodiesel presenta mejor lubricidad, por lo que en proporciones menores al 20% constituye un aditivo lubricante del combustible (menor fricción del motor), favoreciendo el funcionamiento del circuito de alimentación y de la bomba de inyección. Asimismo el biodiesel prácticamente no tiene compuestos aromáticos, ni azufre, contiene oxígeno que permite una adecuada combustión con menor relación de aire/combustible y la temperatura de inflamación mayor reduce el peligro de incendios durante su manejo y almacenamiento. La biodegradabilidad, es una característica del biodiesel que incentiva su uso, desapareciendo en menos de 21 días, con una degradación 4 veces más rápida que con el diesel del petróleo. No es soluble en agua; con una toxicidad inferior a la del diesel del petróleo.

¹⁷ Fuentes: Biodiesel Handling And Use Guidelines NREL (2001); Los Biocombustibles (M. Campus y F. Marcos).

Después de conocer las diferentes materias primas para la obtención del biodiesel, así como sus propiedades, es importante mencionar el rendimiento que estas diversas especies aportan para la fabricación de biodiesel.

1.5. Rendimiento de diversas especies para obtener Biodiesel.

Diversos aceites han sido probados para la producción del Biodiesel, generalmente los que abundan en la zona o país. En Estados Unidos se utiliza principalmente el aceite de Soya, mientras que en Europa el de colza, otros países como Nicaragua han explorado el tempate y Malasia la palma africana. Actualmente en nuestro país se está trabajando con la *Jatropha* y la Palma Africana. La palma de aceite es la plantación más eficiente y con el mayor rendimiento por unidad de área en la producción de aceite vegetal. Se pueden establecer de 120-150 palmas por hectárea de acuerdo al tipo de suelo y potencial. Plantaciones del sureste de Asia dan rendimientos de 5 t/ha/año en el primer año, se estima que los rendimientos aumentan después del cuarto año y llegan a alcanzar 20t/ha de Racimos de Fruta Fresca (RFF). En cuanto a producción de aceite alcanza hasta 5550 L/ha, como se observa en la tabla 5, un rendimiento elevado en comparación con otras materias primas¹⁸.

Tabla 5. Rendimiento de cultivos oleaginosos de ABATEC 2002

RENDIMIENTO DE DIVERSAS ESPECIES PARA OBTENER BIODIESEL	
Especies	Rendimientos (litros/ha)
Soya	420
Arroz	770
Girasol	890
Maní	990
Colza	1100
Ricino	1320
<i>Jatropha</i> /tempate/piñon	1590
Aguacate	2460
Coco	2510
Cocotero	4200
Palma	5550

¹⁸ Sener/ BID/ GTZ (Edit.): Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México, D.F., Noviembre 2006.

1.6. Reacciones Químicas en la elaboración del Biodiesel

Después de hablar un poco de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel así como de sus propiedades y rendimientos, es importante conocer cuáles son las reacciones involucradas en la producción del biodiesel, ya que una vez obtenida la materia prima y extraído el aceite, este es sometido a un proceso llamado transesterificación.

Transesterificación

Tradicionalmente el biodiesel es obtenido mediante una transesterificación de aceites o grasas, haciendo reaccionar un alcohol de cadena corta (usualmente metanol) en presencia de un catalizador (usualmente NaOH). La reacción de transesterificación depende principalmente de la naturaleza de la materia prima, la concentración del catalizador, la relación molar alcohol-aceite, la temperatura, la agitación, presión y tiempo de reacción, el contenido de humedad, y de ácidos grasos libres¹⁹.

En la reacción de transesterificación (Figuras 5 y 6), un mol de triglicéridos reacciona con tres moles de alcohol para formar un mol de glicerol y tres moles de los respectivos alquilésteres, en una secuencia de tres reacciones reversibles donde los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, monoglicéridos y finalmente glicerol.

El glicerol y los ésteres son productos inmiscibles que se distribuyen en dos fases después de la reacción. Estas fases pueden ser separadas después de decantar o centrifugar.

¹⁹ Singh, S.P., Singh, D. (2010) *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (1): p. 200-216.

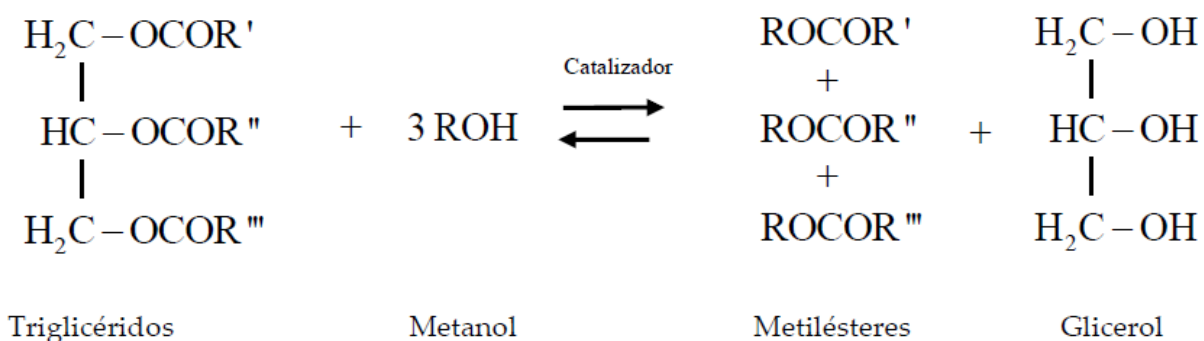
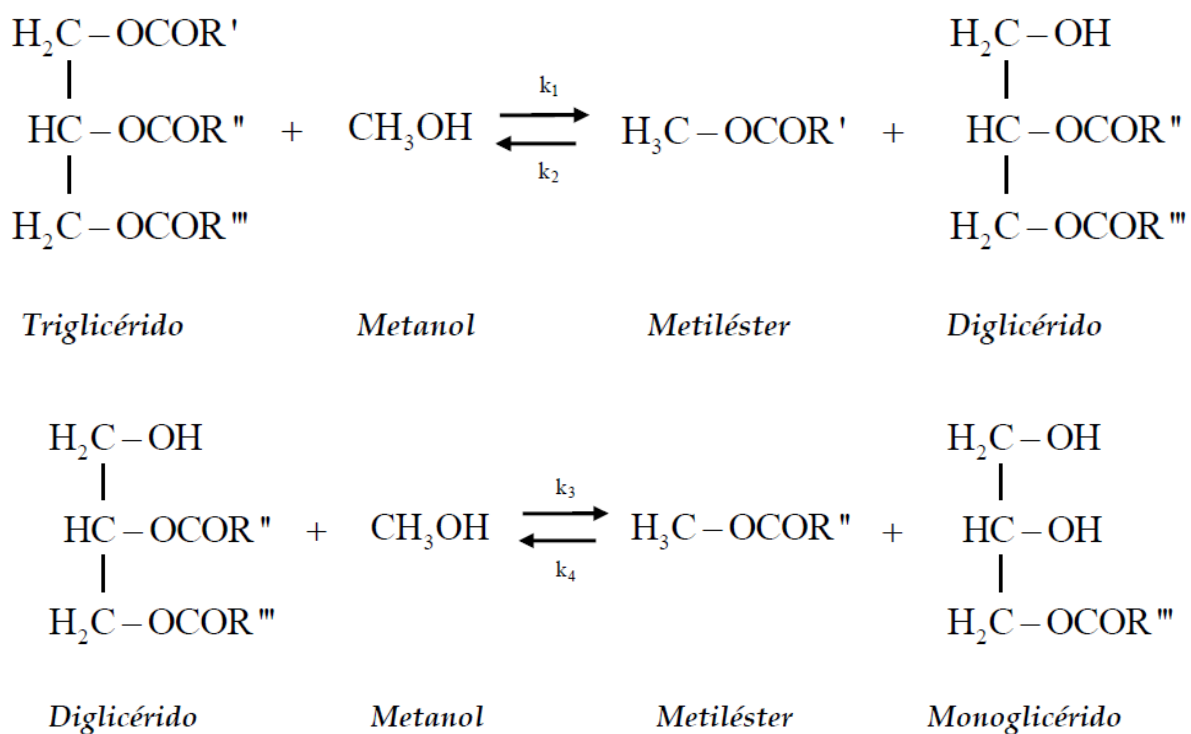


Figura 5. Reacción de Transesterificación²⁰



²⁰ García, Juan Manuel y García José Ángel. *Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol* Madrid España, Universidad de Alcalá, 2006 vol. 1

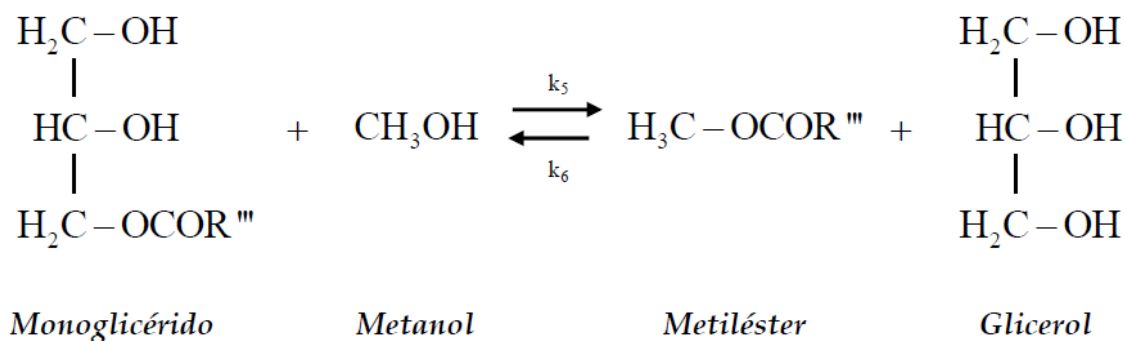


Figura 6. Reacción de implicadas en la Transesterificación²¹

En la figura 6, se muestra cuales son las reacciones involucradas en la transesterificación, estas consisten químicamente 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.

Existen varios tipos de catálisis para la transesterificación pero comercialmente para la producción de biodiesel la más comúnmente utilizada es la catálisis homogénea, que se puede dividir principalmente en alcalina y ácida. También se han utilizado otros tipos de catalizadores heterogéneos (en fase sólida). Otras alternativas interesantes pueden ser la utilización de catalizadores enzimáticos como las lipasas.²²

Catálisis Homogénea

- **Catálisis Básica**

La transesterificación homogénea alcalina, es el proceso preferido por la industria para producir biodiesel. Generalmente es más rápida y menos costoso, comparado con la ácida u otros tipos de catalizador. Las bases fuertes como el NaOH y el KOH son los catalizadores más usados. Estos hidróxidos presentan altas conversiones a condiciones moderadas y tiempos

²¹ García, Juan Manuel y García José Ángel. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol Madrid España, Universidad de Alcalá, 2006 vol. 1.

²² Haas, M.J. (2005) *Improving the economics of biodiesel production through the use of low value lipids as feedstocks: vegetable oil soapstock*. Fuel Processing Technology p. 1087-1096.

de reacción cortos, además son menos corrosivos para los equipos industriales y requieren pequeños volúmenes de alcohol, lo que representa reactores económicos y de menor tamaño.

Una desventaja de utilizar este tipo de catálisis es que la reacción de saponificación se ve favorecida cuando se opera con hidróxido de potasio o sodio, ya que los iones OH⁻ son los responsables de esta reacción. Por tanto, al utilizar estos catalizadores, se debe tener especial precaución con las condiciones en que se produce la reacción, especialmente la temperatura y la concentración, para reducir al máximo la saponificación. Los metóxidos sólo contienen el grupo OH, lo que determina que operando con ellos prácticamente no se producen jabones. En cualquier caso, se deben utilizar aceites y alcoholes esencialmente anhidros, ya que el agua favorece la formación de jabones. Ésta se debe eliminar, mediante evaporación, en los aceites con altos contenidos en humedad, antes de llevar a cabo la transesterificación (ver Figura 7).

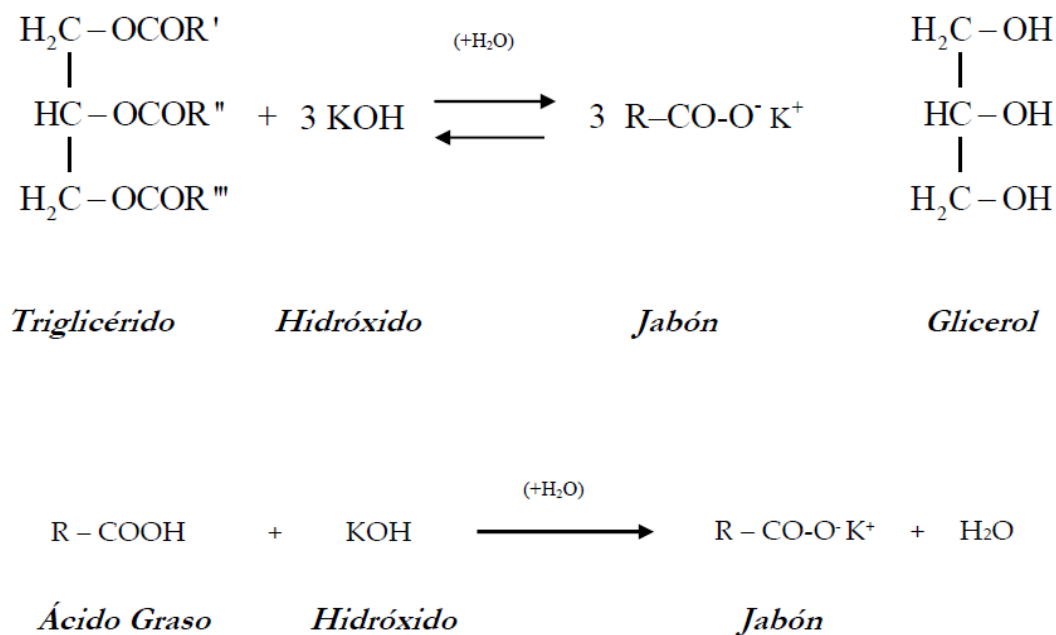


Figura 7. Reacciones de Saponificación y Neutralización.

- **Catálisis Ácida**

En la transesterificación homogénea ácida, es un proceso menos utilizado que la catálisis básica. Este proceso es unas 4000 veces más lento que la catálisis básica. Los ácidos más utilizados son los ácidos fosfórico, sulfúrico, sulfónico y clorhídrico.²³ Los catalizadores ácidos son recomendados para transesterificar aceites con un alto contenido de ácidos grasos libres tales como el aceite de palma o los aceites reciclados. La catálisis ácida también se emplea para pretratar algunos aceites como una etapa previa a la transesterificación básica, debido a que también esterifica los ácidos grasos libres contenidos en las grasas y los aceites consiguiéndose altos rendimientos. Sin embargo, la reacción es lenta y requiere temperaturas y presiones más altas, y de igual manera demanda mayores cantidades de alcohol. Al igual que la catálisis básica la reacción es fuertemente afectada por la presencia de agua, disminuyendo el rendimiento de la transesterificación.²⁴

Catálisis Heterogénea

Los catalizadores heterogéneos son aquellos que se encuentran en una fase diferente a la de los reactantes, es decir que no se encuentran disueltos en el alcohol o en el aceite, sino que son sólidos y fácilmente recuperables por decantación o filtración al final de la reacción. Los catalizadores heterogéneos se pueden separar más fácilmente de los productos de reacción. Las reacciones de saponificación no deseadas pueden evitarse mediante el uso de catalizadores ácidos heterogéneos. Permiten la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales con alto contenido de ácidos grasos libres, como los aceites de fritura de restaurantes o de procesos de transformación de alimentos. Utilizando catalizadores sólidos para la síntesis de biodiesel pueden reducir los costes debido a la reutilización de los catalizadores y la posibilidad de llevar a cabo la transesterificación y la esterificación al mismo tiempo.²⁵

²³ Helwani, Z., Othman, M.R., Aziz, N., Kim, J., Fernando, W.J.N. (2009) *Solid heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides with methanol: A review*. Applied Catalysis A: General 363 (1-2): p. 1-10.

²⁴ Enweremadu, C.C., Mbarawa, M.M. (2009) *Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (9): p. 2205-2224.

²⁵ Meng, X., Chen, G., Wang, Y. (2008) *Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test*. Fuel Processing Technology 89 (9): p. 851-857.

Se han utilizado catalizadores heterogéneos como hidrotalcitas, carbonato de calcio, óxidos de estaño, magnesio y zinc, entre otros. Esta catálisis sólo requiere de la evaporación del metanol sin producción de efluentes residuales, además también se obtiene un glicerol puro sin contaminantes.

Catálisis enzimática

Los catalizadores enzimáticos como las lipasas son capaces de catalizar la transesterificación de los triglicéridos. Tienen la ventaja de ser reutilizables y hacer que el glicerol sea fácilmente eliminado, convierten los ácidos grasos libres en ésteres y no son inhibidas por la presencia de agua. Sin embargo, el metanol o el glicerol pueden inactivar las enzimas al acumularse, pero su mayor inconveniente es que los costos de producción de las lipasas son mayores que los catalizadores alcalinos o los ácidos.²⁶

Alcoholes

Los alcoholes que tradicionalmente se usan en la transesterificación son de cadena corta, principalmente metanol y etanol. Se pueden utilizar otros alcoholes como propanol, isopropanol, butanol y pentanol, pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua, además son más costosos y requieren grandes relaciones molares y temperaturas altas el metanol tiene un menor costo y presenta algunas ventajas químicas y físicas sobre el resto de los alcoholes, como su rapidez de reacción con los triglicéridos y que disuelve fácilmente el NaOH. Es importante resaltar la alta toxicidad del metanol y su inflamabilidad, y que éste se obtiene principalmente de fuentes fósiles no renovables como el gas metano.

El etanol, en cambio, proviene de materias primas renovables: caña de azúcar, remolacha azucarera, y otros vegetales celulósicos. Por eso el etanol es de particular interés principalmente porque es menos costoso que el metanol en algunas regiones del mundo.

²⁶ Fukuda, H., Kondo, A., Noda, H. (2001) *Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils*. Journal of Bioscience and Bioengineering 92 (5): p. 405 - 416.

El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para permitir la difusión. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, en la metanólisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. En cambio en la etanólisis esta emulsión no es estable y se complica mucho la separación y purificación de los ésteres etílicos. La emulsión está causada en parte por la formación de monoglicéridos y diglicéridos intermedios que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares.

La relación estequiométrica para la transesterificación requiere tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de ésteres y un mol de glicerol. La transesterificación es una reacción de equilibrio reversible que necesita un exceso de alcohol para conducir la reacción hacia la derecha. El exceso de metanol puede ser recuperado después de la reacción. Para una conversión máxima se recomienda utilizar una relación molar de 6:1, sin embargo esta relación dependerá del tipo de materia prima utilizada.

Un valor alto de relación molar de alcohol afecta a la separación de glicerina debido al incremento de solubilidad. Cuando la glicerina se mantiene en la solución hace que la reacción revierta hacia la izquierda, disminuyendo el rendimiento de los ésteres. Por otro lado si la cantidad de alcohol no es suficiente, el producto contendrá monoglicéridos y diglicéridos, los cuales cristalizan muy fácilmente en el biodiesel y pueden causar obstrucción de los filtros y otros problemas en el motor.²⁷

Temperatura y Presión

La transesterificación puede ocurrir a presión atmosférica y a diferentes temperaturas dependiendo de la materia prima utilizada. El rendimiento de la reacción es directamente proporcional a la temperatura. Frecuentemente la transesterificación se lleva a cabo a una temperatura cercana al punto de ebullición del alcohol (a 60°C cuando se utiliza metanol); sin embargo se han estudiado temperaturas que varían desde 25 a 250°C.

²⁷ Agarwal, A.K. (2007) *Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines*. Progress in Energy and Combustion Science 33 (3): p. 233-271.

Tiempo de reacción

El rendimiento de la transesterificación es directamente proporcional al tiempo de reacción, sin embargo puede variar dependiendo del tipo de materia prima y del catalizador que se utilice. La formación de metilésteres es abundante en los primeros minutos con una buena agitación y condiciones óptimas, pero es casi nula con el avance de la reacción después de 90 minutos.²⁸

Homogenización de los reactivos

El aceite es inmisible con el metanol, lo que indica que la reacción debe ser homogeneizada de alguna manera. La agitación mecánica de los componentes es el método de homogeneización más comúnmente usado, porque permite el contacto íntimo de los reactivos con buenos resultados en el proceso batch y en continuo. También existe como alternativa la de añadir un solvente común al alcohol y al aceite, tales como el tolueno o tetrahidrofurano Sin embargo el consumo de solvente puede ser muy alto y al final el metanol y el solvente deben ser recuperados por destilación.

Separación de fases

Después de la reacción de transesterificación ocurre una separación espontánea de fases debido a su inmiscibilidad; entre ellas el glicerol (fase inferior) debe ser retirado y se puede hacer por simple decantación o centrifugado.

Purificación del biodiesel

Después de la separación de fases, cada una debe lavarse para purificarse y alcanzar la mayor concentración de metilésteres. En la industria el metanol es recuperado por calentamiento de la fase éster. Las trazas de glicerol y catalizador pueden ser eliminadas por lavados con agua acidulada o agua pura hasta neutralizar. Los ácidos grasos libres pueden ser recuperados de la

²⁸ Darnoko, D., Cheryan, M. (2000) *Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor*. Journal of the American Oil Chemists Society 77 (12): p. 1263-1267.

fase éster por destilación, aprovechando el hecho de que los FAME (Ésteres metílicos de ácidos grasos) por sus siglas en ingles (fatty acid methyl ester), por lo general destilan a 30-50°C menos que los AGL, sin embargo este proceso eleva demasiado los costos de producción. Otra alternativa es hacer pasar los metilésteres a través de materiales adsorbentes como la sílica gel o silicatos de magnesio sintetizados, así como también se acostumbra usar sulfato ácido de sodio²⁹.

Secado y almacenaje

Una vez lavado el biodiesel, éste debe ser secado a 110°C con una agitación suave para eliminar el agua remanente. El agua puede presentarse disuelta en el biodiesel o en forma de gotas en superficie. La normativa de calidad permite una cantidad de agua máxima de 500 ppm. Sin embargo el biodiesel debe mantenerse seco. Esto es una dificultad debido a que muchos tanques contienen agua en el fondo debido a la condensación. El agua suspendida en el biodiesel es un problema en el equipo de inyección porque corroe las partes del sistema. El agua también puede contribuir al crecimiento de microorganismos en el combustible (también sucede en el diesel), que contribuyen al aumento en la acidez y la formación de lodos que taponarán los filtros del combustible.

El contacto con aire (estabilidad oxidativa) y agua (estabilidad hidrolítica) son los mayores factores que afectan la estabilidad del biodiesel. La oxidación es usualmente acompañada por un incremento en la acidez y en la viscosidad del combustible o sus mezclas. Cualquier biodiesel que vaya a ser almacenado por largos períodos deberá ser tratado con aditivos antioxidantes. De igual manera, con el fin de evitar la oxidación del biodiesel, a la carga de los camiones y los tanques de almacenamiento se les aplica una inyección de nitrógeno para evitar su degradación durante el transporte.

²⁹ Predojevic, Z.J. (2008) *The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps*. Fuel 87 (17-18): p. 3522-3528.

El uso del biodiesel como combustible renovable presenta tanto ventajas como deficiencias que es necesario conocer, para de alguna manera intentar corregirlas, estas se mencionan a continuación.

1.7. Ventajas del Uso de Biodiesel

Actualmente los países de la Unión Europea, Estados Unidos, Francia, Brasil, Argentina y Colombia entre muchos otros, han apoyado la utilización de biocombustibles con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, impulsar la descarbonización de los combustibles del transporte, diversificar las fuentes de su abastecimiento, desarrollar alternativas al petróleo a largo plazo, utilizar tierras ociosas y reforestar la capa vegetal [39].

Se espera también que el incremento de la producción de biocombustibles ofrezca nuevas oportunidades para diversificar la renta y el empleo en las zonas rurales o de bajos recursos, en especial en nuestro país, se busca que las tierras aptas para producir palma africana en especial las del sureste de la republica mexicana, sean fuentes generadoras de empleo y a su vez contribuyan a la producción de biodiesel en México.

a) Ventajas medioambientales

El ciclo biológico en la producción y el uso del Biodiesel reduce aproximadamente en 80% las emisiones de anhídrido carbónico, y casi 100% las de dióxido de azufre. La combustión de Biodiesel disminuye en 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados, y entre 75 y 90% en los hidrocarburos aromáticos. Además, proporciona significativas reducciones en la emanación de partículas y de monóxido de carbono, cuando se le compara con el diesel de petróleo.

Distintos estudios en EE.UU, han demostrado que el uso del biodiesel reduce en 90% los riesgos de contraer cáncer, debido a que no contiene hidrocarburos aromáticos policíclicos.³⁰

³⁰ Landa, M. *Biodiesel, sustituto del diesel convencional*. España. 2004

El biodiesel no incide negativamente en la contaminación de suelos o de aguas debido a su carácter biodegradable. Además, su producción supone una alternativa de uso de aquellas tierras agrícolas que, por razones de mercado, están siendo abandonadas por los agricultores, evitando así los fenómenos de erosión y desertificación.

El hecho de que el biodiesel sea biodegradable hace su manejo y transporte tan seguro. Por ejemplo, su punto de inflamación (flash point) es de aproximadamente 150°C, mientras que el del diesel es de 50°C.³¹

b) Ventajas económicas

El uso de biodiesel puede extender la vida útil de los motores, ya que posee mejores cualidades lubricantes que el combustible de diesel petróleo; mientras que el consumo, encendido, torque y rendimiento del motor se mantienen prácticamente iguales. Además, es el único combustible alternativo que funciona en cualquier motor diesel convencional, sin ser necesaria ninguna modificación.

Este puede usarse puro o mezclarse en cualquier proporción con el combustible diesel de petróleo. La mezcla más común es B20 (20% Biodiesel 80% Diesel). Se ha visto que puede producirse a partir de una gran variedad de cultivos, muchos de los cuales se adaptan a condiciones climáticas diversas y que muchas veces se dan en tierras que no son tan fértiles y que por lo tanto, están prácticamente en el abandono.

Su utilización permitirá sustituir o disminuir la importación de diesel, otorgando una mayor seguridad en cuanto al abastecimiento energético.³² Sin embargo, una sustitución total, en el contexto actual se perfila agrícolamente imposible. Según WRM (Movimiento Mundial por los Bosques) para mover los coches y autobuses europeos con biodiesel se requerirían 25.9 millones de hectáreas. A nivel mundial, una sustitución completa del petróleo por biodiesel, implicaría que la mayor parte de la superficie cultivable del planeta, y enormes consumos de

³¹ Ciria, José Ignacio. *Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel*. España 2004.

³² Facultad de Agronomía. *Biodiesel, una alternativa sustentable a los combustibles fósiles*. Argentina. 2006

agua potable, su dedicación sería a la producción de biocombustibles y no a la producción de alimento humano.

c) Ventajas socioeconómicas

La producción de biodiesel constituye una alternativa para aquellas tierras agrícolas muertas. De esta forma, se fijaría la población en el ámbito rural, manteniendo los niveles de trabajo y renta, y fomentando la creación de diferentes industrias. Igualmente, mejora la relación productos primarios/petróleo, y representa la única respuesta económicamente válida a los subsidios del sector agropecuario en los países industriales.³³

A pesar de sus muchas ventajas, el uso del biodiesel también presenta algunos problemas:

1.8. Limitaciones del Uso del Biodiesel

Los problemas técnicos del biodiesel se relacionan con su alta viscosidad, menor poder calorífico, comportamiento deficiente a bajas temperaturas, ligero aumento en las emisiones de NOx, coquización del inyector, desgaste en el motor y mayor dilución en el lubricante del motor. Además su mayor problema es el alto costo y la disponibilidad de la materia prima. Algunos sectores han hecho cuestionamientos sociales y responsabilizan a este biocombustible del aumento en el precio de los alimentos y la deforestación de zonas selváticas.

No obstante como se menciono anteriormente, estos cuestionamientos sociales solo son ciertos si las tierras destinadas a la siembra de cultivos alimenticios se utilizan para la producción de biocombustibles. Se debe tomar en cuenta que más del 50% de la población pobre de América Latina y el Caribe vive y depende del sector rural, en consecuencia, si aparecen cultivos que generan mayores ingresos a los productores, estos orientarán sus esfuerzos a esos cultivos, es sumamente importante que existan políticas claras al respecto, para evitar la destrucción de reservas naturales y destinar las tierras de estas, a la siembra de cultivos. También se deben

³³ Gonzáles, M. *Usando restos para movernos*. Trabajo Práctico de Introducción de la Informática. Asunción, Paraguay. Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción. 2003

establecer regulaciones dirigidas a mantener un equilibrio entre la cantidad de producto destinada al consumo alimenticio y la orientada a la producción bioenergética, con el fin de evitar poner en riesgo la seguridad alimentaria.

En nuestro país, existe la oportunidad de producir biocombustibles de primera generación aprovechando tierras de baja productividad, sin perjudicar la producción de alimentos.³⁴

Otra limitación en el uso del biodiesel es que debido a su mejor capacidad solvente que el diesel, los residuos existentes son disueltos y enviados por la línea de combustible, pudiendo atascar los filtros.

Su carácter hidrófilo y degradable hace necesario una planificación exacta de su producción y expedición. Aunque hasta el momento todavía no está claro el tiempo de vida útil del biodiesel, algunos dicen que posee un tiempo de vida muy corto y otros que su vida útil llega incluso a 10 años o más. Pero todos concuerdan que depende de su manipulación y almacenamiento.

El rendimiento promedio para oleaginosos es alrededor de 900 litros/ha., de biodiesel por cosecha, lo que puede traer dificultades a países con poca superficie cultivable, como es el caso del Salvador. En algunos casos se ha detectado una pérdida de viscosidad en el aceite de lubricación, pero siempre en valores inferiores al 5%.

Los puntos de enturbiamiento de los ésteres, superiores en algunos casos a los del diesel, pueden provocar problemas de funcionamiento en climas fríos. Éstos empiezan a solidificar y formar cristales, que pueden obstruir los conductos del combustible. Los ésteres son más agresivos que el diesel y pueden atacar al caucho y a los tipos comunes de pinturas. Para evitar el riesgo de estos ataques, es conveniente utilizar pinturas acrílicas y sustituir las conducciones de caucho por teflón.

³⁴ www.bioenergeticos.gob.mx.

Su mayor desventaja actual es que su producción es mucho más cara que la del diesel convencional fósil.

1.9. Análisis de los sectores económicos

Los sectores implicados en el proceso de obtención de biodiesel se detallan a continuación:³⁵

1. Agrícola: siembra y recogida del grano.
2. Industrias aceiteras: producción de aceite.
3. Industria química: transesterificación.
4. Compañías petroleras: mezcla con diesel y distribución del biodiesel. Se utilizan notaciones abreviadas según el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla: B100 en caso de utilizar sólo biodiesel, u otras notaciones como B5, B15, B30 o B50, donde la numeración indica el porcentaje por volumen de biodiesel en la mezcla, por ejemplo B5 (95% diesel y 5 % biodiesel).
5. Cooperativas agrícolas: uso de biodiesel en tractores y maquinaria agrícola.
6. Administraciones locales: flotas de autobuses, taxis, calefacciones etc.
7. Áreas ambientalmente protegidas: utilización de biodiesel en los medios de transporte de parques nacionales, lagos etc.
8. Industrial: sustituye al diesel convencional en motores, quemadores y turbinas. Se puede utilizar en flotas de autobuses, taxis y maquinaria agrícola.

³⁵ Fangrui M., M.A., *Biodiesel production a review*. 1999.

1.10. La Demanda del Biodiesel

Nivel Mundial

En la actualidad, existen muchos artículos e investigaciones sobre la utilización de aceites vegetales como combustibles alrededor del mundo, estos han pasado de ser experimentales a formar parte de los combustibles habituales.

En los últimos 10 años muchos de estos países se han enfocado en acciones y legislaciones que permitan la expansión del biodiesel en todo el mundo. Ejemplo de esto es que a nivel Europeo el biodiesel está experimentando un crecimiento sostenido del 35% anual.³⁶

En Francia, todos los combustibles diesel poseen un mínimo del 1% de biodiesel. En Alemania, el biocombustible se comercializa en un gran número de estaciones de servicio y su empleo es común en los cruceros turísticos que navegan en sus lagos.

Actualmente la Unión Europea ejecuta un proyecto denominado “Local and Innovative Biodiesel”, cuyo objetivo es contribuir al cumplimiento de que la cuota del mercado del biodiesel en la región sea del 5.75% para el 2020. Este porcentaje pretende ser alcanzado a través de la eliminación de barreras por la escasez de materia prima y alto costo de la misma, ampliando el suministro a los aceites vírgenes y usados. Además de demostrar la importancia del uso del biodiesel en los mercados de transporte público y comercial, donde los beneficios medioambientales son más necesarios.³⁷

Nivel latinoamericano

Colombia, Uruguay y Argentina se ubican a la vanguardia en el uso y producción de biodiesel en Latinoamérica. Sin embargo, los países de esta región Argentina principalmente, se han enfrentado a una devaluación sumada a la constante inestabilidad jurídica respecto a las

³⁶ Hilbert, J. A. *Panorama actual del biodiesel Argentina*. Centro de Investigación de Agroindustria e Instituto de Ingeniería Rural INTA. 2006

³⁷ Carlstein, A. *Biodiesel en Europa*. Argentina, Editorial La Opinión. 2006

medidas de fomento que se había dictado para este tipo de combustibles en su expansión inicial en el año 2000.

Hoy en día se vive una nueva etapa de expansión. Se estima que existe en Argentina una capacidad instalada de producción de 50,000 ton/año de biodiesel. Los diferentes gobiernos de este país han tomado iniciativas para el impulso de la actividad relacionada al biodiesel y en los últimos años se ha trabajado sobre un marco regulado por una ley nacional, aprobada en el año 2005. Esta ley establece como meta la inclusión de biodiesel en proporciones del 5% en todo el diesel comercializado en ese territorio para el año 2010.³⁸

Existen entre 30 y 50 plantas de pequeña escala, cuyas capacidades alcanzan los 200,000 gal/año. En Perú la empresa Heaven Petroleum Operators inició su producción en una planta en Lurin, a principios del año 2006 con una capacidad de 20 millones de gal/año. Además, hay planes de construir una refinería de biodiesel cerca del Puerto Callao en Lima, con una capacidad de producción de 16.8 millones de gal/año³⁹.

En México los cultivos más competitivos son la palma, girasol y soya. La jatropha es promisorio pero debe resolver el problema de posibles toxinas en la glicerina y otros subproductos generados en el proceso. Los costos de los insumos agrícolas representan entre el 59% y 91% de los costos de producción del biodiesel. En muchos casos, como la soya, estos costos dependen en gran medida de la posibilidad de vender los subproductos agrícolas.

1.11. Leyes de los Bioenergéticos

El marco jurídico de los Bioenergéticos en México se integra por la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos y su Reglamento publicada el 1° de febrero de 2008 en el Diario Oficial de la Federación, por los acuerdos por los que se emiten los Lineamientos para el otorgamiento de permisos para la producción, el almacenamiento, el transporte y la

³⁸ Hilbert, J. A. *Panorama actual del biodiesel*. Argentina. Centro de Agroindustria e Instituto de Ingeniería Rural INTA 2006.

³⁹ Idem

comercialización de Bioenergéticos del tipo etanol anhidro y biodiesel, publicados estos últimos el 13 de noviembre de 2009 en el Diario Oficial de la Federación.⁴⁰

Dentro de las facultades que la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos le otorga a la Secretaría de Energía (SENER), está la de otorgar permisos para la producción de bioenergéticos.

Actualmente las plantas procesadoras de biodiesel de las cuales se tiene conocimiento son las señaladas a continuación:

1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el Estado de Chiapas para la producción de biodiesel.
2. Biofuels de México, S.A. de C.V. en México, D.F., esta empresa a principios de enero de 2010, en la delegación Miguel Hidalgo inicio pruebas de Biodiesel en camiones y maquinaria, sigue vigente el programa piloto en vehículos de la Dirección de Mejoramiento Urbano. Se utilizan mezclas de 20 a 50% de biodiesel y el resto de petrodiesel.
3. Renovables Maya Verde, S.A. de C.V. en el Estado de Quintana Roo para la producción de biodiesel.
4. Instituto de Reconversión Productiva y bioenergéticos en el Estado de Chiapas para la producción de biodiesel.
5. Preservación Ecológica Biodiesel de México, S.C. de R.L. de C.V. en el estado de Guerrero para la producción de biodiesel.

⁴⁰ <http://www.sener.gob.mx>

CAPÍTULO 2 OLEAGINOSAS COMO MATERIA PRIMA

Los vegetales que contienen grandes cantidades de aceites en sus semillas o frutos se conocen como oleaginosas. Estas plantas provienen de diferentes familias botánicas y se han adaptado a las diferentes regiones climáticas del planeta, aunque las regiones tropicales, son las que albergan la mayor cantidad de variedad de ellas.

Existen diferentes semillas de plantas en México, que presentan grandes beneficios por las propiedades que poseen, en especial por los porcentajes de ácidos grasos que forman su estructura, mismos que se convierten en esteres metílicos durante el proceso de transesterificación en la producción de biodiesel.

Las principales oleaginosas usadas como materias primas para la elaboración de biodiésel son las siguientes:

Aceites vegetales convencionales de: Girasol, Colza, Soya, Carcamo y Palma. A continuación se menciona una breve descripción de esta variedad de especies oleaginosas.

2.1. Descripción de Variedades de Oleaginosas

a) Girasol⁴¹

El girasol es una planta herbácea anual mejor adaptada a climas cálidos o templados. Puede crecer desde el Ecuador hasta los 55° de latitud. En los trópicos, crece mejor en elevaciones medias y altas. Intolerante a la sombra, pero tolerante a la sequedad y la sequía, excepto cuando está floreciendo. Puede crecer en suelos pobres, siempre que sean profundos y bien drenados. No resiste suelos ácidos o inundados. Tolera precipitaciones anuales entre 200 y 4000 mm y temperaturas entre 6 y 28°C. En zonas cálidas, las variedades enanas maduran 2.5-3 meses después de la siembra. El fruto se le denomina “aquenio” (pipa) y es un fruto seco

⁴¹ SENER, Secretaría de Energía. *Balance Nacional de Energía 2007*. México, D.F. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2008

Esta almendra o grano tiene un contenido en aceite del 45 al 55% en peso (de los cuales un 65% es insaturado) y la cáscara que la recubre tiene aproximadamente 26.61% de fibra.

El aceite de girasol es indudablemente reconocido como un valioso aceite para consumo humano y también para producción de biodiesel, este aceite presenta una desventaja para la producción del bioenergético en mención, ya que debido a su alto contenido de ácido linoleico (C18:2) limita su uso en la producción de biodiesel. El aceite de girasol también se utiliza para hacer jabón, velas, barnices o pintura, así como excelente lubricante.



b) Colza ⁴²

En los países desarrollados del hemisferio norte, la mayoría de los habitantes con buen poder adquisitivo, realizan un continuo esfuerzo para balancear una dieta alimenticia sana y de alto nivel nutritivo. Por ello, el aceite de colza es uno de los más apreciados y demandados por su excelente calidad, debido a la baja proporción de ácidos saturados y la alta concentración de ácidos grasos monoinsaturados.

Este aceite, junto con el de oliva, es considerado como uno de los mejores para la alimentación humana, por su contribución a la baja formación de colesterol en la sangre, disminuyendo por consiguiente, los riesgos de enfermedades de origen cardiovascular.

⁴² **SENER, Secretaría de Energía.** *Balance Nacional de Energía 2007.* México, D.F. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2008

A partir de la década de los 70, el cultivo de colza tuvo a nivel mundial un gran auge, convirtiéndose en una de las principales oleaginosas en algunos países como Canadá, Francia, China, Australia, India, entre otros. En la producción mundial de granos, durante el ciclo 98/99, la colza ocupó el segundo lugar en orden de importancia dentro de las diez primeras oleaginosas, luego de la soya que aporta el 54% del volumen total, y seguida por el algodón 11%, el girasol 9% y el maíz 7.5% entre otras.

La semilla tiene un contenido oleaginoso del 40%, su contenido proteico de harina está entre 36-38%. Contiene cantidades apreciables de dos ácidos grasos de cadena larga, ácido eicosenoico y erúxico; el aceite de colza con menos de 5% de ácido erúxico recibe el nombre de Canola.



c) Soya⁴³

Es uno de los productos que predomina dentro del comercio de semillas oleaginosas, aceites vegetales y harinas proteínicas, debido a las características agronómicas favorables, a la rentabilidad razonable obtenida por agricultores y procesadores y la producción de aceites comestibles y harinas proteínicas de gran calidad. La soya es un producto alimenticio antiguo en China, Japón y Corea. El principal país productor de soya es Estados Unidos, seguido por Brasil, China, Argentina, Canadá y la India.

⁴³ **SENER, Secretaría de Energía.** *Balance Nacional de Energía 2007.* México, D.F. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2008

Soya es el nombre común de una leguminosa anual y de las semillas que produce. Se cree que la soya procede del este de China; en la actualidad se cultiva en muchos otros lugares. La planta es erguida, pubescente, de 0,5 a 1,5 m de altura, con grandes hojas trifoliadas (tréboles), flores pequeñas de color blanco o púrpura y vainas cortas que encierran entre una y cuatro semillas.



Cuando la planta alcanza la madurez, entre 100 y 150 días después de la plantación, según la variedad, el lugar y el clima, las hojas viran al amarillo y se caen y las vainas adquieren en poco tiempo color tostado y se secan. Las semillas, casi esféricas, suelen ser de color amarillo claro, y también negro, castaño o verde en ciertas variedades raras. Éstas contienen alrededor de un 20% de aceite

El contenido de aceite del haba de soya es relativamente bajo, variando entre 17% y 19%; más del 80% del haba consiste en harina proteínica y cáscara. Casi todas las demás semillas oleaginosas tienen un contenido de aceite superior al 30%, cifras que en algunas puede llegar a ser hasta del 64%. Los cultivadores de habas de soya obtienen la mayor parte de sus ingresos de la harina.

d) Cártamo⁴⁴

El cártamo tiene varios nombres según del país donde se cultiva, azafrancillo, alazor, azafrán bastardo, azafrán romí, entre otros. Su nombre viene del color rojizo del colorante. De las substancias colorantes del cártamo, la más importante es la cartamina, colorante anaranjado insoluble en el agua y fácilmente soluble en medios alcalinos.



Actualmente el cártamo se utiliza por el aceite que se extrae de la semilla. Esta semilla produce uno de los aceites de mayor calidad dietética para consumo humano y de usos industriales; en la alimentación humana tiene gran demanda por su alto contenido de ácido linoleico poli-insaturado lo que le confiere la propiedad de liberar poco colesterol.

El aceite que se extrae de la semilla y la torta residual son los productos que se aprovechan del cártamo. Además de su uso comestible se emplea para la fabricación de pinturas, jabones, esmaltes, etc.

⁴⁴ **SENER, Secretaría de Energía.** *Balance Nacional de Energía 2007.* México, D.F. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2008

d) Palma Africana⁴⁵

La palma africana (*Elaeis guineensis*) también conocida como palma de aceite, es originaria de Guinea Occidental y pertenece a la familia palmaceae, es una palmera cuyo tronco crece de 15 a 30 m de altura, la palma de aceite empieza a producir frutas a partir del tercer año, La vida productiva de la palma de aceite puede durar más de cincuenta años, no obstante el cultivo comercial tiene un promedio de vida que oscila entre 24 y 28 años, debido a que el tallo alcanza una altura que dificulta las labores de cosecha, lo que marca el comienzo de la renovación en las plantaciones comerciales. Durante todo su período de vida productiva cada árbol puede producir hasta 4,2 toneladas en frutos.

La palma africana, se desarrolla en condiciones de alta temperatura, alta precipitación, buena radiación solar, y alta humedad relativa. El cultivo tiene una alta adaptabilidad, por lo que se cultiva en varios países de cuatro continentes, en más de 6,5 millones de hectáreas, conformando verdaderos paisajes forestales donde cohabitan numerosas especies de flora y fauna.



⁴⁵ **SENER, Secretaría de Energía.** *Balance Nacional de Energía 2007.* México, D.F. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2008

2.2. Historia de la Palma Africana

El aceite de palma se viene consumiendo desde hace más de 5,000 años, originario de Guinea Occidental; a partir del siglo XV y se introdujo en otras partes de África, Sudeste Asiático y Latinoamérica, a lo largo de la zona ecuatorial. Desde los tiempos más antiguos, la palma de aceite constituye una importante fuente de productos de uso cotidiano, principalmente en la alimentación, para las poblaciones de buena parte del África tropical.⁴⁶

Del estado de pre cultivo la palma pasó al cultivo verdadero solamente a comienzos del siglo XX. En 1910 se le empezó a dedicar los primeros cuidados culturales a plantaciones espontáneas. En la misma época se establecieron las primeras plantaciones en la isla de Sumatra, aprovechando la semilla de palmas descendientes de cuatro ejemplares introducidos en el Jardín Botánico de Bogor, Indonesia, en 1848. También esta planta fue introducida en el Jardín Botánico de Singapur por medio de semillas procedentes de Ceilán en el año 1875.⁴⁷

La palma aceitera fue introducida en Malasia en 1870 como planta ornamental y sólo pudo ser cultivada a nivel industrial hasta después de la primera Guerra Mundial, aprovechando las experiencias obtenidas en las plantaciones de Sumatra. El cultivo fue extendiéndose rápidamente, creciendo de 5,000 hectáreas sembradas en 1918 hasta 2.5 millones de hectáreas en 1996. Hoy Malasia, Indonesia y Nigeria son los mayores productores del mundo de aceite de palma con más del 78% de la producción global. En el Continente Americano las primeras plantaciones fueron establecidas en la década de los cuarenta. En Costa Rica fue introducida la palma en 1944 y la primera planta extractora de aceite fue construida en Damas en el año 1950. En Colombia, en 1957 se contaba con 35,000 palmas que poseían entre 4 y 25 años de edad. En 1948 se establecen en México las primeras plantaciones de palma africana o palma aceitera por pequeños productores en la zona Costa de Chiapas. Sin embargo, como una segunda etapa de las plantaciones, es hasta 1982 que se establecen en forma las primeras 287 hectáreas con semilla originarias de Costa Rica, Costa de Marfil e Indonesia.

⁴⁶ Vanichseni, Teering, y otros. *Potential biodiesel production from palm oil for Thailand*. Bangkok, Thailand. Kasetsart University, 2002

⁴⁷ Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria. *Monografía de la palma de aceite*. Veracruz : Gobierno del Estado de Veracruz, 2006

Al iniciar la década de los 90's la superficie alcanzó las 2,800 hectáreas. Una tercera etapa se definió a partir de 1996, fecha en que el gobierno mexicano diseñó el programa de plantaciones para la región Sur y Sureste del país en los estados de Chiapas, Campeche, y luego en Tabasco y Veracruz, logrando plantarse un total de 36,874 hectáreas, de ellas el estado de Chiapas contaba con el 44.2%, seguido de Tabasco con el 20.2%, Veracruz con 19.4% y finalmente el estado de Campeche con el 16.2% de las hectáreas de palma africana.

2.3. El Fruto de la Palma Africana.

Los frutos de la palma africana son de color violeta oscuro, y en la madurez adquieren el color naranja rojizo. De los frutos de la palma de aceite, los cuales se encuentran adheridos al racimo, se extraen dos tipos de aceite:

- El aceite de palma que se obtiene de la pulpa o mesocarpio
- El aceite de palmiste que se extrae de la almendra de la semilla del fruto de la palma.

Los residuos sólidos de la cascarilla de la almendra llamados torta de palma o torta de palmiste son valorados en la alimentación animal. En la figura 10, se observan las partes que conforman el fruto de la palma de aceite.

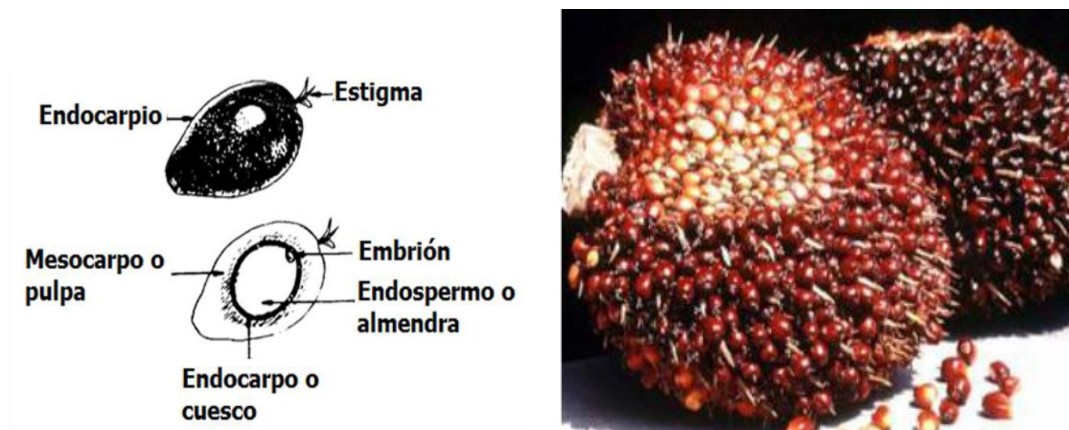


Figura 10. Fruto de la Palma Africana⁴⁸

⁴⁸ Fuente: Fundación Mexicana para la investigación Agropecuaria y Forestal, AC

a) Aceite Crudo de Palma

El aceite crudo de palma es el producto semisólido, de aspecto graso a temperatura ambiente, de color anaranjado rojizo obtenido por el procesamiento de los frutos de la palmera y proveniente de la pulpa o mesocarpio. El aceite crudo de palma es el más adecuado para la producción de biodiesel, porque así se evitan gastos de tratamiento de blanqueo, desodorización y refinación del aceite.

b) Aceite de Palma Refinado

Es el producto semi-sólido de aspecto graso, de color blanco amarillento obtenido a partir del aceite crudo de palma cuando se somete a los procesos de Refinación física y/o química, la cual consiste en:

- Pre-tratamiento ácido
- Blanqueo tradicional
- Desodorización

Normalmente el racimo de fruta fresca de 100 kg tiene la siguiente composición media: racimos vacíos y agua 34 kg, frutos 66 kg. De los 66 kg de frutos, 54 kg forman el mesocarpio, y 12 kg las nueces. El primero rinde cerca de 25 kg de aceite, y el último cerca de 6 kg de almendras que contienen 50 % de aceite. Sumando ambos, el rendimiento de aceite de palma de un racimo de frutos secos es del 20 a 22 %, mientras que de aceite de palmiste es del 4-5 %⁴⁹.

2.4. Especificación del Aceite de Palma

De acuerdo al Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-F-019-SCFI-2011 “Alimentos Aceite de Palma, Especificaciones”, las propiedades del Aceite de Palma Crudo y Refinado debe de cumplir con las siguientes especificaciones:

⁴⁹ José Rodolfo Velázquez Martínez. Palma Africana en Tabasco.

El aceite de palma debe cumplir con las especificaciones de las características sensoriales, físicas y químicas marcadas en las tablas 6, 7 y 8.

Tabla 6. Especificaciones sensoriales del Aceite de Palma⁵⁰

<i>Parámetros</i>	<i>Aceite Crudo de Palma</i>	<i>Aceite de Palma Refinado</i>
Color visual	Anaranjado rojizo en estado líquido	Blanco amarillento en estado sólido
Aspecto	Graso en estado semisólido	Graso en estado semisólido
Textura	Grasosa, característica del producto en estado semisólido	Grasosa característica del producto en estado semisólido.
Apariencia	Semisólido, característico a 293°K (20°C)	Semisólido, característico a 293°K (20°C)
Sabor	Típico, no agradable	Típico, variable de acuerdo al tiempo de almacenamiento

Tabla 7. Especificaciones Físico-químicas del Aceite de Palma⁵¹

<i>Parámetros</i>	<i>Aceite Crudo de Palma</i>		<i>Aceite de Palma Refinado</i>	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Color rojo escala Lovibond	NA	NA	-	3.5
Ácidos Grasos Libres % de Acido Palmítico	NA	5.0	-	0.1
Índice de Yodo cg yodo/g	50	56	50	56
Humedad y Material volátil %	NA	05	-	0.1
Índice de Refracción a 313°K (50°C)	1.4544	1.4550	1.4544	1.4550
Punto de fusión (capilar abierto) °C	33	39	33	39
Índice de Saponificación mg KOH/g	190	209	190	209
Materia Insaponificable %	0	1.2	0	0.5
Índice de Peróxido meq/kg	NA	NA	-	2
Estabilidad OSI a 110°C (horas)	NA	NA	35	NA
Densidad Relativa a 50°C/agua a 20°C	0.891	0.899	0.891	0.899
Aceite Mineral	Negativo			

NA. No Aplica

⁵⁰ Norma Mexicana PROY-NMX-F-019-SCFI-2011 "Alimentos Aceite de Palma, Especificaciones"

⁵¹ Norma Mexicana PROY-NMX-F-019-SCFI-2011 "Alimentos Aceite de Palma, Especificaciones"

Tabla 8. Especificaciones de Ácidos Grasos de Aceite de Palma⁵²

<i>PARAMETROS</i>	<i>MÍNIMO</i>	<i>MÁXIMO</i>
Acido laúrico C12:0	0.1	0.5
Acido mirístico C14:0	1.0	1.4
Acido palmítico C16:0	40.9	47.5
Acido palmitoléico C16:1	0	0.6
Acido esteárico C18:0	3.8	4.8
Acido Oléico C18:1	36.4	41.2
Acido linoléico C18:2	9.2	11.6
Acido linolénico C18:3	0	1.0
Acido araquídico C20:0	0	0.8

2.5. Usos del Aceite de Palma

Usos Comestibles

Actualmente, el aceite de palma es el segundo aceite más consumido en el mundo después del aceite de soya, y se emplea como aceite de cocina y para elaborar productos de panadería, pastelería, confitería, heladería, sopas instantáneas, salsas, diversos platos congelados y deshidratados, cremas no lácteas para mezclar con el café.

Usos No Comestibles

El aceite de palma es una materia prima que se utiliza ampliamente en jabones y detergentes, en la elaboración de grasas lubricantes y secadores metálicos, destinados a la producción de pintura, barnices y tintas. Además, como ya se ha mencionado se usa como materia prima en la producción de Biodiesel.

El Aceite de Palma en la Salud Humana

Es importante mencionar que los ácidos grasos saturados de aceite de palma si se consumen excesivamente aumentan el riesgo de sufrir de enfermedades cardiovasculares. Asimismo el

⁵² Noma Mexicana PROY-NMX-F-019-SCFI-2011 "Alimentos Aceite de Palma, Especificaciones"

aceite de palma es una fuente natural de vitamina E, en forma de tocoferoles y tocotrienoles. Estos últimos actúan como protectores contra el envejecimiento de las células, la arteriosclerosis, el cáncer y algunas enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer. Sin refinar, el aceite de palma es la fuente natural más rica de beta-caroteno (provitamina A).

A continuación se muestran los usos del aceite crudo de palma y del aceite de palmiste. Ver figura 11.

USOS DEL ACEITE DE PALMA

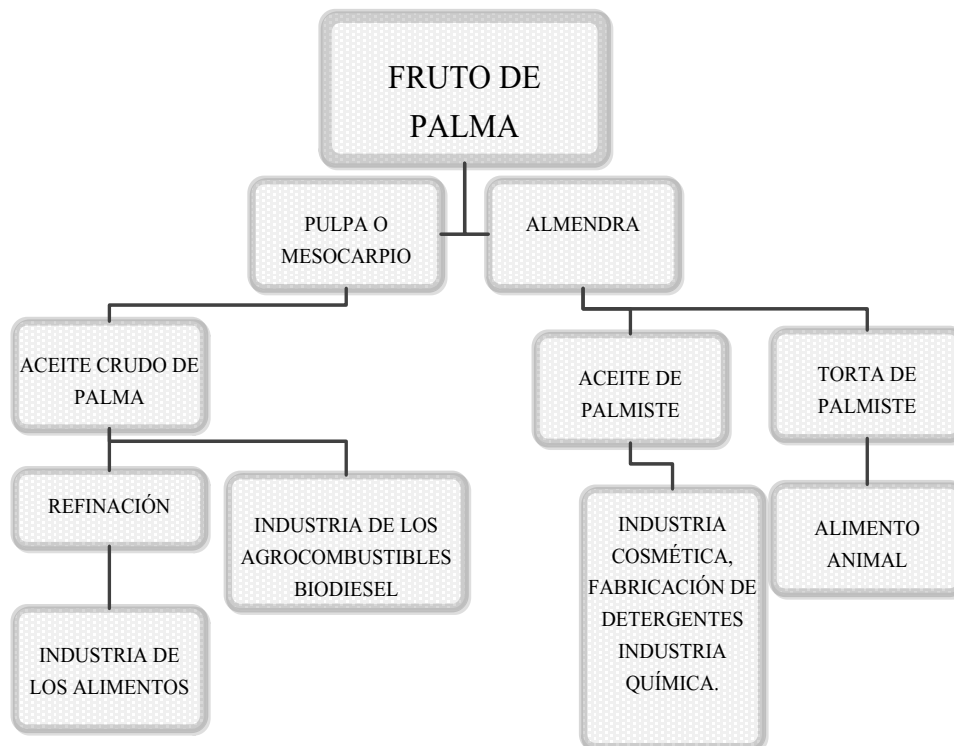


Figura 11. Usos del Aceite de Palma

CAPÍTULO 3. EL SURESTE MEXICANO EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

México tiene una alta dependencia energética del petróleo por lo que la volatilidad de sus precios y el agotamiento de las reservas, lo coloca en una situación vulnerable. Por esta razón es prioritario desarrollar fuentes de energía que garanticen en el largo plazo, sostenibilidad de los sistemas productivos.

Los biocombustibles son una alternativa energética real al petróleo y promueven el desarrollo de un nuevo sector agroindustrial en el país.

El 1° de febrero de 2008, se publica en el Diario Oficial de la Federación la LEY DE PROMOCION Y DESARROLLO DE BIOENERGETICOS, que busca abrir muchas oportunidades para que México se convierta en un productor destacado de biocombustibles, buscando que la producción satisfaga el consumo interno e inclusive se destine a la exportación. Asimismo se busca la promoción y el desarrollo de los bioenergéticos, para contribuir a la diversificación energética y al desarrollo sustentable como condiciones que permitan garantizar la competitividad del campo mexicano.

El sector energético tiene un papel decisivo en el desarrollo de México, ya que en él se sustenta en gran medida su desarrollo económico y social, y abarca desde la generación de electricidad e hidrocarburos como insumos para la economía y la prestación de servicios públicos. Sin embargo, el panorama energético mundial actualmente se encuentra enmarcado en una grave crisis de disponibilidad y abasto de combustibles fósiles a los diferentes sectores productivos.⁵³

3.1. Balance Nacional de Energía ⁵⁴

En México, la Secretaria de Energía pública anualmente un Balance Nacional de Energía, que presenta la información relativa a la oferta y demanda de energía, y se basa en un conjunto de relaciones de equilibrio que contabilizan la energía que se produce, la que se intercambia con

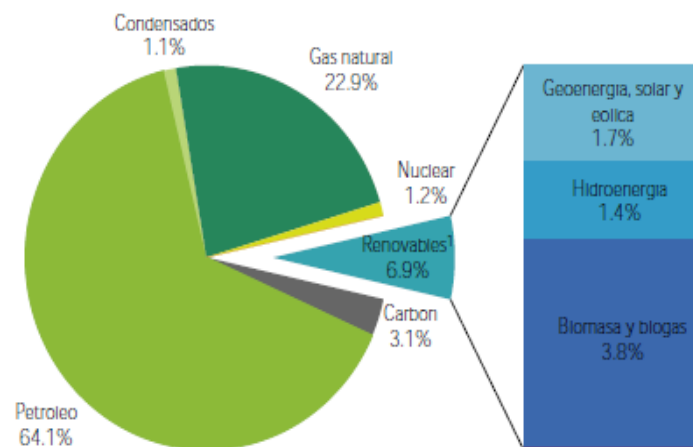
⁵³ Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos.

⁵⁴ Balance Nacional de Energía 2011 SENER.

el exterior, la que se transforma, la de consumo propio. Las fuentes de energía son aquellas que producen energía útil directamente o por medio de una transformación. Éstas se clasifican en dos tipos: primarias y secundarias.

- ✚ Las energías primarias. Son las que se obtienen directamente de la naturaleza: solar, hidráulica, eólica, geotérmica, biomasa, petróleo, gas natural o carbón.
- ✚ Las energías secundarias. Proviene de la transformación de energía primaria con destino al consumo directo o a otros usos: gasolinas, electricidad, gasoil, fuel oil.

En 2011 la producción de energía primaria disminuyó 0.7% respecto a 2010 y totalizó 9,190.76 PJ. Este comportamiento se debió principalmente a la menor producción de crudo, la cual pasó de 6,008.64 PJ en 2010 a 5,933.53 PJ en 2011. No obstante, los hidrocarburos continúan siendo la principal fuente de energía primaria en el país, con una aportación de 88.7%. La exportación total de energía en 2011 fue 2.4% menor que la de 2010, ubicándose en 3,554.88 PJ. Lo anterior fue resultado de la disminución de 1.2% en las exportaciones de petróleo crudo, equivalentes a 88% del total de las exportaciones de energía.



Fuente: Sistema de Información Energética, con cálculos propios.

¹ Incluye grandes hidroeléctricas.

Nota: Todos los porcentajes son respecto al total de la producción de energía primaria

Figura 12. Estructura de Producción de Energía Primaria 2011.
Fuente (Balance Nacional de Energía 2011)

Como se mencionó anteriormente en los últimos años se ha presentado una disminución considerable en la producción de crudo, lo que nos hace voltear hacia energías alternas como lo son las fuentes renovables en la Figura 12, se observa que las energías renovables en México tienen una participación del 6.9 %, en donde la hidroenergía representa el 1.4%, la biomasa (leña y bagazo de caña) alcanza el 3.8%, mientras que la energía eólica y la geotérmica participaron con el 1.7%.

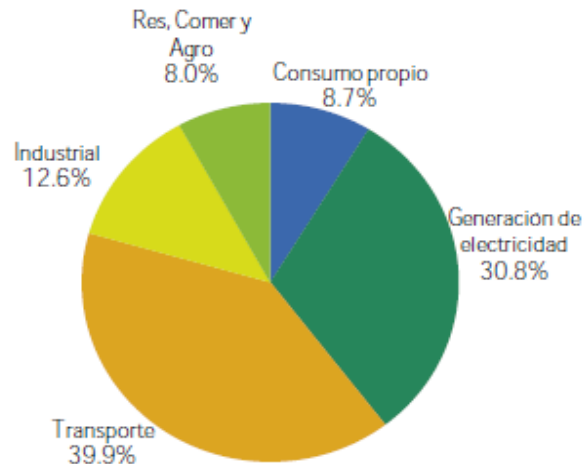
En resumen, la evolución en la producción y en el consumo de energía ha sido muy lenta para generar riqueza y elevar la calidad de vida de los mexicanos. Es por ello que en la actualidad se busca implementar el uso de las energías renovables, en nuestro tema de estudio, estamos abordando el tema de los biocombustibles, los cuales son energía que se produce a partir de la biomasa en este caso los biocombustibles líquidos, obtenidos de semillas oleaginosas (Palma Africana).

3.2. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero asociadas al consumo de combustibles.⁵⁵

Tanto el consumo de energía como las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas al consumo de combustibles en nuestro país han mostrado un comportamiento ascendente en los últimos años. De 2001 a 2011 la tasa de crecimiento promedio anual del consumo de energía fue de 2.5%, mientras que las emisiones por consumo de combustibles crecieron 2.3% promedio anual.

Como se observa en la figura 13, mostrada a continuación, las emisiones asociadas a la generación de electricidad aportaron 30.8% de las emisiones por consumo de combustibles en 2011. El sector transporte contribuyó con 39.9% del total las emisiones de GEI por consumo de combustibles, en cuanto a los gases emitidos en el sector transporte, el principal fue el CO₂, con una participación de 92.4%, el N₂O contribuyó con 7.3% del total y el restante lo aportó el CH₄.

⁵⁵ Federación Nacional de Biocombustibles. Mayo 2011.



Fuente: SENER e INE. Cálculos propios utilizando la metodología del IPCC de 1996.

Figura 13. Estructura de las Emisiones de GEI asociadas al consumo de combustible por sector, 2011.

Fuente (Balance Nacional de Energía 2011)

Los biocombustibles son un arma importante en la lucha contra el cambio climático. La utilización de mayores cantidades de biocombustibles es parte de la solución para controlar el incremento perjudicial de las emisiones de CO₂ de los medios de transporte. De acuerdo al estudio “Ciclo de vida de la producción de biocombustibles en Colombia”, el biodiesel de palma reduce en más del 83% las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), en comparación con el diésel fósil⁵⁶.

En el punto 1.8 denominado “Limitaciones del uso del Biodiesel”, se indicó que una de las limitaciones del biodiesel es el ligero aumento en las emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NOx), un estudio elaborado para autobuses urbanos en Estados Unidos, cifra que este incremento puede citarse en torno al 8 % comparado con el diesel convencional. No obstante la Unión Europea esta poniendo en marcha diversos programas de mejoras tecnológicas de los motores que permitirán que el balance global sea positivo hacia una menor generación de NOx.⁵⁷

⁵⁶ Federación Nacional de Biocombustibles. Mayo 2011.

⁵⁷ Lopez J.M. Evaluación de Impacto Ambiental de plantas de Producción de biodiesel.

3.3. Producción de Palma Africana en México

En México se cuenta con diversidad genética, climática y edáfica para la producción sostenible y competitiva de especies bioenergéticas. Se dispone de especies que no compiten directamente con la producción de alimentos considerados en la canasta básica de México. De acuerdo con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFIAP), existen zonas agrícolas para cultivar oleaginosas. Alrededor de 2,5 millones de hectáreas, con potencial para el cultivo de palma aceitera en Chiapas, Oaxaca, Campeche, Guerrero, Michoacán, Quintana Roo, Tabasco y Veracruz.

Actualmente en nuestro país en el año 2012, se cultivaron de palma africana 499,550.54 has, en Chiapas, Tabasco, Veracruz y Campeche, de los cuales destacan los rendimientos de Chiapas con una producción de 392,715.25 toneladas de palma africana o aceite de palma.⁵⁸



Figura 14. Estados productores de Palma Africana en México.⁵⁹

⁵⁸ Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel.

⁵⁹ Secretaría de Desarrollo Social. Gobierno del Estado de Chiapas

3.4. Condiciones Ambientales⁶⁰

La palma de aceite es una planta de origen tropical, por lo que las mejores condiciones para su desarrollo se encuentran en regiones con clima tropical húmedo, también tiene buena adaptación en regiones del trópico subhúmedo con el auxilio de riego.

Para el cultivo de Palma África se requiere de las siguientes condiciones ambientales:

Suelo: Este cultivo requiere que existan suelos profundos y bien drenados, con pH de 4 a 6 como son los cambisoles, vertisoles y acrisoles. En cuanto a los suelos, estos también presentan una variación muy fuerte, así se tiene que en el estado de Campeche, se puede encontrar desde rendzinas de texturas arcillosas con topografía plana y escarpada en la zona Sabancuy-Escárcega hasta suelos planos y profundos de textura arcillosa y franca como son los luvisoles y gleysoles de la región Aguacatal y Palizada. En cuanto al estado de Chiapas, se encuentran suelos de las series luvisoles y regosoles con texturas francas y franca arenosa, de Topografía plana y ligeramente inclinada; finalmente en los estados de Tabasco y Veracruz, los suelos son tanto luvisoles como acrisoles de texturas francas y topografía plana.

Clima: Debido a la temperatura y humedad que requiere este cultivo, el clima propicio para su desarrollo es el Cálido – Húmedo y Cálido – Subhúmedo.

Precipitación: Este es un cultivo que requiere de grandes cantidades de agua por lo que la precipitación pluvial idónea es de 1800 mm bien distribuidos durante todo el año, el cultivo de palma de aceite se encuentra establecido en la región climática del trópico húmedo, en donde los volúmenes de precipitación son muy importantes y varían ampliamente de una zona a otra, así se tiene que en el estado de Campeche, que va desde los 1200 mm en la parte centro-sur, mientras que en el sur-sureste es de 1800 mm anuales, por otro lado en el estado de Chiapas, varía de 2000 mm en la parte del Soconusco en la zona costera hasta más de 2400 en la zona Selva en la región de Palenque. Una de las regiones de mayor precipitación, es la zona del

⁶⁰ "Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México", SENER.

golfo, que comprende a los estados de Tabasco y Veracruz, en donde pueden llegar a ser mayores a los 2400 mm anuales.

Temperatura: Lo ideal para este cultivo es una temperatura media de 22° C a 28° C. En la zona del sureste de la república mexicana integrada por los estados de Oaxaca, Veracruz, Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, presenta temperaturas anuales entre los 22.4°C y los 30.2°C.

En la tabla 9, que se muestra a continuación, se resumen las condiciones Edafoclimatológicas de la palma de aceite.

Tabla 9. Condiciones Edafoclimatológicas de la Palma de Aceite.⁶¹

Concepto	Bueno	Mediano	Marginal
1. Agua*			
Precipitación anual, mm	media >1800	1500-1800	<1500
Número de meses secos <60 mm de lluvia al mes.	<1	2-3	4
2. Temperatura °C			
Media Anual Promedio	22-28	18-22, 28-32	<18, >32
Máxima anual promedio	27-33	22-27, 33-37	<22, >37
Mínima anual promedio	18-27	14-18, 27-33	<14
Media mensual	>18	<18	
3. Suelo			
Profundidad, cm	>75	75-50	<50
Drenaje	Moderado a imperfecto	Pobre, fácil de drenar	Pobre, difícil de drenar
Pendiente, %	<12	12-23	>23
Inundación	Ninguna	Menor, máx. dos días	severa
4. Fertilidad			
pH	4.0- 6.0	3.5-4.0	<3.5
5. Varios			
Húmedad relativa, %			
Media anual	>80%		
Altitud, msnm	<300	300-400	>400

*cuando existe riego no aplica

⁶¹ Programa Estratégico para el Desarrollo Rural Sostenible de la Región Sur- Sureste de México. Alfredo Sandoval Esquivés.

3.5. El Sureste Mexicano y la Producción de Palma Africana.

La agricultura ha sido la actividad de sustento en los estados del sureste de la república mexicana; en el país se pueden identificar cuatro regiones productoras de palma africana en el periodo 2011, estos son los estados de Chiapas, Campeche, Tabasco y Veracruz, como se muestra en la figura 15, Chiapas es el estado con mayor producción de palma africana seguido de tabasco, Veracruz y finalmente Campeche.

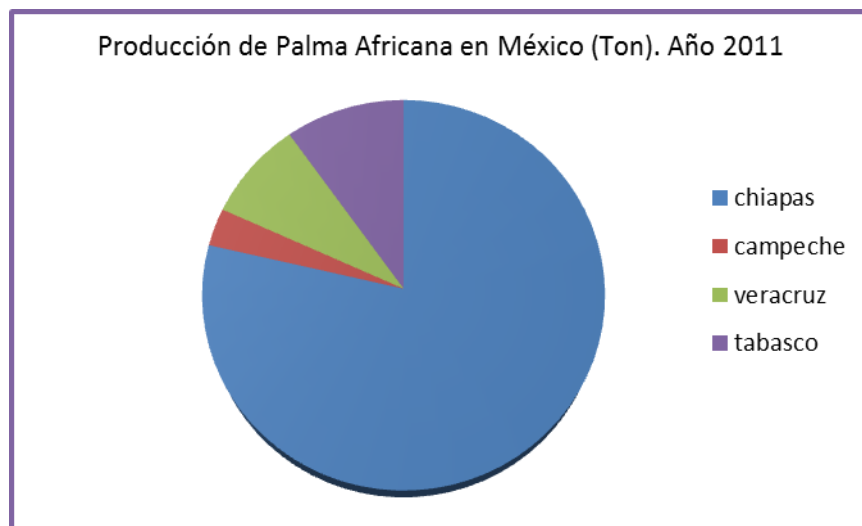


Figura 15. Estados Productores de Palma Africana en México (Fuente: SIAP).

Chiapas

El cultivo de Palma de Aceite en el estado de Chiapas está considerado como detonador del desarrollo en las regiones donde actualmente se encuentra ubicado, en la región Selva y Soconusco de esta entidad. Los primeros cultivos en esta entidad fueron realizadas hace más de 50 años (1948) por la familia Berntoff, quienes también instalaron una pequeña extractora para el proceso de su propia Fruta Fresca (Aceitera la Lima 1970) con una capacidad para procesar 2 toneladas por hora. Es hasta 1990 y 1991 cuando inicia el Programa de Palma de Aceite, en 4 municipios de la región Soconusco, beneficiando a 26 localidades y a 425 productores beneficiados, sembrando un total de más de 2,500 hectáreas.

Durante 6 años, el programa estuvo inactivo por la falta de planeación y demanda del cultivo por parte de los productores, esto debido al desconocimiento de esta actividad, la cultura arraigada que existe en Chiapas al sembrar cultivos tradicionales como lo es el maíz. Es hasta el año de 1997 cuando se retoma en Chiapas y otros estados como Veracruz y Tabasco la promoción de este cultivo como una estrategia nacional para detonar la economía de regiones con alto potencial para desarrollar esta actividad en el Sur- Sureste de México.

El estado de Chiapas cuenta con un potencial bioenergético de seis cultivos como son, el piñón, higuierilla, soya, girasol, caña de azúcar, y palma de aceite. En el estado se cuentan actualmente con 38,152 ha que generan un volumen de producción de 392,715.25 toneladas, los únicos municipios que cultivan la palma africana son los que se muestran en la figura 16 y la tabla 10.



Figura 16. Municipios del Estado de Chiapas
Gobierno del Estado de Chiapas Secretaria de Desarrollo Social.

Tabla 10. Producción de Palma Africana en Chiapas 2011.

ESTADO DE CHIAPAS							
Modalidad: Riego + Temporal							
AÑO 2011							
Municipio	Cultivo	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	Precio Medio Rural (\$/Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
VILLA COMALTITLAN	PALMA AFRICANA	2,839.00	2,839.00	56,780.00	20	1,595.87	90,613.50
TUZANTAN	PALMA AFRICANA	32.5	32.5	650	20	1,630.68	1,059.94
SUCHIATE	PALMA AFRICANA	114	114	2300	20.18	1315.69	3026.09
TAPACHULA	PALMA AFRICANA	395	294	5,761.60	19.6	1,439.51	8,293.88
SALTO DE AGUA	PALMA AFRICANA	1,454.50	940.5	5,718.25	6.08	1,371.30	7,841.44
PIJIJAPAN	PALMA AFRICANA	1,478.00	678	8,136.00	12	1,788.00	14,547.17
PALENQUE	PALMA AFRICANA	5,424.22	3,208.17	20,148.35	6.28	1,479.46	29,808.68
MAZATAN	PALMA AFRICANA	200.5	181	3,360.00	18.56	1,427.91	4,797.78
MARQUES DE COMILLAS	PALMA AFRICANA	1,384.00	90	382	4.24	1,660.00	634.12
MAPASTEPEC	PALMA AFRICANA	7,947.93	2,941.50	85,815.32	29.17	1,714.92	147,166.41
LA LIBERTAD	PALMA AFRICANA	273	162.5	1,015.25	6.25	942.17	956.54
HUEHUTAN	PALMA AFRICANA	376	376	7,520.00	20	1,607.49	12,088.32
BENEMERITO DE LAS AMERICAS FRONTERA HIDALGO	PALMA AFRICANA	5505	0	0	0	0	0
ESCUINTLA	PALMA AFRICANA	10	10	109	10.9	1,209.45	131.83
CHILON	PALMA AFRICANA	458.5	154.5	4,673.47	30.25	1,713.40	8,007.52
CATAZAJA	PALMA AFRICANA	255.25	240.25	1,453.51	6.05	998.35	1,451.11
ACAPETAHUA	PALMA AFRICANA	728.7	537.5	3,362.50	6.26	2,050.00	6,893.12
ACACOYAGUA	PALMA AFRICANA	9,004.40	7,516.49	180,100.00	23.96	1,704.27	306,939.03
TOTAL ESTADO DE CHIAPAS		271.5	198	5,430.00	27.42	1,703.08	9,247.72
		38,152.00	20,513.91	392,715.25	19.14	1,664.07	653,504.20

FUENTE: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP <http://www.siap.gob.mx>

En la Tabla mostrada anteriormente se observan los principales municipios del Estado de Chiapas que producen Aceite de Palma, y los rendimientos que estos presentan.

Tabla 11. Producción de Palma Africana en Veracruz Año 2011.

ESTADO DE VERACRUZ							
Modalidad: Riego + Temporal (AÑO 2011).							
Municipio	Cultivo	Sup. Sembrada	Sup. Cosechada	Producción	Rendimiento	Precio Medio Rural	Valor Producción
		(Ha)	(Ha)	(Ton)	(Ton/Ha)	(\$/Ton)	(Miles de Pesos)
ACAYUCAN	PALMA AFRICANA	1,218.50	1,218.50	8,529.50	7	1,854.46	15,817.62
CHINAMECA	PALMA AFRICANA	380	380	1,330.00	3.5	1,897.14	2,523.20
COSOLEACAQUE	PALMA AFRICANA	101	89	409.4	4.6	1,807.99	740.19
HIDALGOTITLAN	PALMA AFRICANA	88	82	377.2	4.6	2,200.00	829.84
JALTIPAN DE MORELOS	PALMA AFRICANA	295.5	295.5	1,477.50	5	1,866.00	2,757.02
MECAYAPAN	PALMA AFRICANA	1,361.00	1,361.00	10,751.90	7.9	1,838.11	19,763.17
MINATITLAN	PALMA AFRICANA	100	85	382.5	4.5	1,803.33	689.77
PAJAPAN	PALMA AFRICANA	233	233	1,747.50	7.5	1,846.67	3,227.06
SAN JUAN EVANGELISTA	PALMA AFRICANA	348.5	348.5	2,091.00	6	1,835.00	3,836.98
SOCONUSCO	PALMA AFRICANA	546.5	500	2,500.00	5	1,877.50	4,693.75
SOTEAPAN	PALMA AFRICANA	716	716	5,370.00	7.5	1,842.00	9,891.54
TEXISTEPEC	PALMA AFRICANA	409.5	409.5	2,252.25	5.5	1,845.46	4,156.44
ZARAGOZA	PALMA AFRICANA	19	19	87.4	4.6	1,802.17	157.51
TATAHUICAPAN DE JUAREZ	PALMA AFRICANA	74	74	518	7	1,828.57	947.2
SAYULA DE ALEMAN	PALMA AFRICANA	86.5	86.5	674.7	7.8	1,850.64	1,248.63
JESUS CARRANZA	PALMA AFRICANA	43	43	301	7	1,852.86	557.71
HUEYAPAN DE OCAMPO	PALMA AFRICANA	416	416	2,912.00	7	1,854.28	5,399.66
TOTAL ESTADO DE VERACRUZ		6,436.00	6,356.50	41,711.85	6.56	1,851.69	77,237.29

FUENTE: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP <http://www.siap.gob.mx>

Tabasco

El estado de Tabasco tiene potencial en material bioenergético de cuatro cultivos que son: sorgo, caña de azúcar, coco y palma de aceite. En el estado se cuentan actualmente con 5,925.33 ha, que generan un volumen de producción de 49,488.84 toneladas, los únicos municipios que cultivan la palma africana son los que se muestran en la Figura 18 y la Tabla 12.

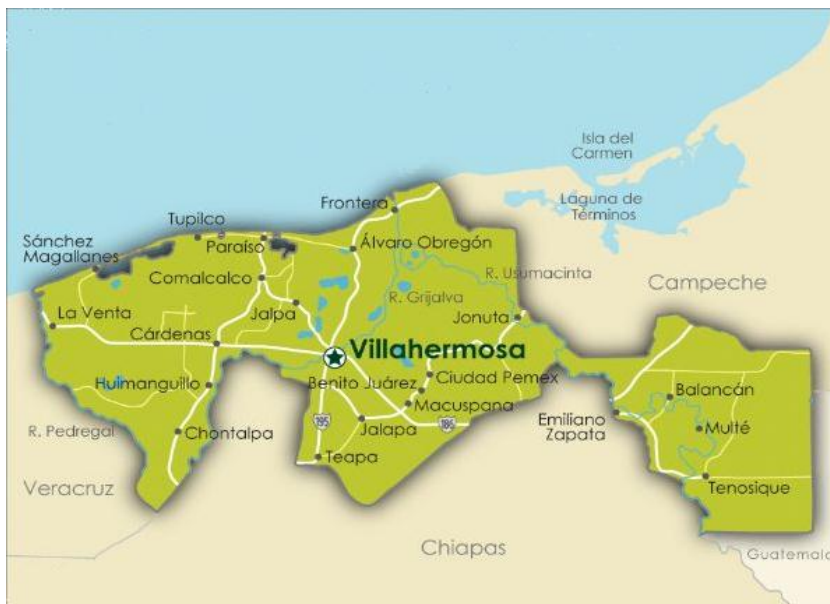


Figura 18. Municipios del Estado de Tabasco.

En la Tabla 12, que se muestra a continuación, se observan los principales municipios del estado de Tabasco que producen Aceite de Palma.

Tabla 12. Producción de Palma Africana en Tabasco. Gobierno del Estado de Tabasco 2011.

ESTADO DE TABASCO							
Modalidad: Riego + Temporal AÑO 2011							
Municipio	Cultivo	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	Precio Medio Rural (\$/Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
BALANCAN	PALMA AFRICANA	1,600.00	1,600.00	11,200.00	7	1,700.00	19,040.00
CENTRO	PALMA AFRICANA	24	24	624	26	1,753.94	1,094.46
EMILIANO ZAPATA	PALMA AFRICANA	536	150	1,200.00	8	1,900.00	2,280.00
TACOTALPA	PALMA AFRICANA	307.58	307.58	6,430.00	20.9	1,887.14	12,134.31
TENOSIQUE	PALMA AFRICANA	2,586.00	1,315.00	9,260.00	7.04	1,686.15	15,613.74
TEAPA	PALMA AFRICANA	170.36	38.36	1,304.24	34	1,868.52	2,437.00
JALAPA	PALMA AFRICANA	560	560	16,083.20	28.72	1,744.27	28,053.44
MACUSPANA	PALMA AFRICANA	141.39	141.39	3,387.40	23.96	1,615.32	5,471.73
TOTAL ESTADO DE TABASCO		5,925.33	4,136.33	49,488.84	11.96	1,740.28	86,124.68

FUENTE: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP <http://www.siap.gob.mx>

Campeche

El estado Campeche su potencial en material bioenergético son cinco cultivos que son: sorgo, caña de azúcar, soya, girasol y palma de aceite. En el estado se cuentan actualmente con 3,543 ha, que generan un volumen de producción de 15,634.60 toneladas, los únicos municipios que cultivan la palma africana son los que se muestran en la Figura 19 y la Tabla 13.



Figura 19. Municipios del Estado de Campeche

En la Tabla 13, que se muestra a continuación, se observan los principales municipios del estado de Campeche que producen Aceite de Palma.

Tabla 13 Producción de Palma Africana en Campeche. Gobierno del Estado de Campeche 2011.

ESTADO DE CAMPECHE							
Modalidad: Riego + Temporal (AÑO 2011)							
Municipio	Cultivo	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	Precio Medio Rural (\$/Ton)	Valor Producción (Miles de Pesos)
CANDELARIA	PALMA AFRICANA	486	175	1,765.00	10.09	1,524.00	2,689.86
CARMEN	PALMA AFRICANA	2,448.00	946	12,145.00	12.84	1,351.94	16,419.28
CHAMPOTON	PALMA AFRICANA	242	0	0	0	0	0
ESCARCEGA	PALMA AFRICANA	207	40	395	9.88	1,196.05	472.44
PALIZADA	PALMA AFRICANA	160	160	1,329.60	8.31	0	2,026.31
TOTAL ESTADO DE CAMPECHE		3,543.00	1,321.00	15,634.60	11.84	1,382.06	21,607.89

FUENTE: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP <http://www.siap.gob.mx>

De acuerdo a los datos obtenidos de la SAGARPA, y mostrados en las tablas anteriores, se observa, que de los estados del sureste de la república mexicana productores de aceite de palma, el que presenta mayor producción es el estado de Chiapas con 392,715.25 Toneladas y el de menor producción es Campeche con 15,634.60 Toneladas y con solo 5 municipios dedicados a la producción de la Palma Africana, en el presente trabajo se propone la instalación de una planta de biodiesel en el estado de Campeche con la finalidad de que la producción de aceite de palma aumente y por la importancia social que tiene al ser una fuente potencial para generar un significativo número de empleos y por su potencial de crecimiento, aunado a la capacidad para disminuir la importación de aceite y la consecuente salida de divisas, así como por la alternativa económica que representa para los productores de la región.

Plantas Extractoras de Aceite de Palma.

La palma africana o aceite de palma, después de su producción es transportada a las plantas extractoras de aceite para su posterior transformación. La industria aceitera de palma está compuesta tanto por extractoras como refinadoras. En el caso de las plantas extractoras de aceite crudo de palma, estas se localizan en los cuatro estados productores, debido a que por sus características físico-químicas debe procesarse en un lapso de tiempo muy corto.

La capacidad instalada conjunta de las plantas extractoras, alcanza 68 toneladas de racimos de fruta fresca por hora, encontrándose estas instalaciones industriales principalmente en el estado de Chiapas, pero se cuenta con ellas en Veracruz, Campeche y Tabasco. Solo una de estas agroindustrias pertenece al sector social y también es oportuno destacar que siete de las nueve instalaciones iniciaron actividades en los años 2001 al 2004, como se muestra en la tabla 14. Actualmente existen de diez plantas extractoras de aceite crudo de palma en el sureste, que todavía cuentan con una enorme capacidad de producción porque están operando al 40% de su capacidad, pero se espera un aumento en la producción de palma⁶².

⁶² Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México (SENER-BID-GTZ) Task B
Agricultural aspects and sources for biodiesel production

Tabla 14. Plantas Extractoras de Aceite de Palma en México ANIAME 2003.

Plantas Extractoras de Aceite de Palma en México Fuente ANIAME 2003					
Extractoras	Municipio	Estado	Capacidad (TRFF/h)	Inicio de Actividades	Sector
LA LIMA	Villa Comaltitlán	Chiapas	2	1970	Privado
EL DESENGAÑO	Villa Comaltitlán	Chiapas	6	1994	Privado
BEPASA	Acapetahua	Chiapas	6	1995	Social
AGROIMSA	Mapastepec	Chiapas	10	2001	Privado
PROPALMA COMPAÑÍA	Acapetahua	Chiapas	10	2001	Privado
ACEITERA CAMPECHANA	Escárcega	Campeche	6	2003	Privado/Social
ACEITES DE PALMA	Acahucan	Veracruz	10	2003	Privado
SOCIEDAD DE PRODUCTORES DE PALMA	Jalapa	Tabasco	6	2003	Privado
AGROIPSA	Palenque	Chiapas	8	2004	Privado
PALMATICA	Palenque	Chiapas	10	2004	Privado

TRFF/h: Toneladas de Racimos de Fruta Fresca por hora

CAPITULO 4. PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Después de haber conocido la importancia del aceite de palma, su historia, así como un poco de las estadísticas de su producción en el sureste mexicano, a continuación conoceremos las etapas de producción del Aceite de Palma y su posterior transformación en biodiesel.

4.1. Etapas de Extracción del Aceite de Palma

Para la extracción de aceite de palma son necesarios varios pasos, los cuales se describen a continuación:⁶³

a) *Recepción del Fruto*

La recepción del fruto es un paso no considerado dentro de la extracción, pero es primordial para la calidad final del aceite crudo resultante y que consiste en recibir el fruto cosechado y transportado de la plantación a la planta extractora. El racimo debe tener fruto fresco; del total, solamente se permite hasta un 5% de fruto pasado de grado de madurez, 3% de fruto verde y un 5% de fruto golpeado en cada entrega, manual o mecánica.⁶⁴

b) *Pesado de la Fruta*

Los racimos al llegar a la extractora se pesan para posteriormente descargarlos en la rampa donde se alimentan los carros para introducirlos a la cámara de esterilización.

⁶³ Surre; Ziller, 1969; citado por Amatller, 2000.

⁶⁴ Palma Africana en Tabasco (Gobierno del Estado de Tabasco, 1998).



Figura 20. Tolva de recibo de racimos de fruto fresco, Góndolas

c) Esterilización

La esterilización de los racimos de fruta fresca consiste en someterlos a tratamiento térmico, por medio de vapor de agua a una presión de 2.5 a 3.0 Kg/cm² de presión, usando una temperatura de 130 °C por un periodo de 60 minutos. La esterilización es la primera etapa y posiblemente la más importante del proceso de extracción del aceite de palma. Los objetivos primordiales son:

- 1- Inactivar las enzimas que causan el desdoblamiento del aceite y en consecuencia el incremento del porcentaje de ácidos grasos libres.
- 2- Acelerar el proceso de ablandamiento de la unión de los frutos con su soporte natural (raquiz o tuza).
- 3- Disminuir la resistencia de los tejidos de la pulpa para lograr el fácil rompimiento de las celdas de aceite durante los procesos de digestión y prensado.
- 4- Deshidratar parcialmente las almendras contenidas en la nuez, para facilitar su recuperación posterior.



Figura 21. Esterilizador

d) *Separación o Desfrutado:*

El objetivo fundamental en esta operación es remover todas las frutas del raquis. La velocidad del tambor del desfrutador debe mantenerse baja para lograr una mayor energía de choque por caída libre de los racimos haciendo que se desprendan las frutas. En esta operación puede evaluarse la eficiencia de la esterilización por la cantidad de fruto que quede en el raquis.



Figura 22. Tambor Desfrutador

e) Digestión

El fruto es depositado en un cilindro llamado digestor, en el cual se desprende la pulpa de las nueces y se rompen las celdas para liberar el aceite que ellas contienen, dicho proceso consiste en recalentar las frutas esterilizadas para poder retirar la pulpa y poder romper la nueces más fácilmente antes de entrar a la etapa de extracción del aceite. Las mejores condiciones para esta etapa son entre 95 y 100 °C y un tiempo de 20 minutos. El calentamiento se puede hacer a través de una chaqueta o por inyección directa de vapor.

f) Extracción de Aceite

El fruto ya digestado se procede a prensarlo, en esta etapa se le aplica agua a la salida del digestor y en la parte inferior de la prensa con el fin de lavar la fibra y lograr que la extracción del aceite sea lo más eficientemente posible y mantener las pérdidas de aceite dentro de los estándares, además de dar la dilución adecuada para realizar la separación en la sección de clarificación. La eficiencia del prensado depende de dos factores; la presión adecuada aplicada a los conos de los tornillos y el estado (por desgaste) de canastas tornillos y conos, además de la buena digestión que se hizo, del prensado se producen dos efluentes uno sólido y otro líquido, el sólido está compuesto por la semilla del fruto y las fibras producidas en el proceso de prensado, el líquido va a ser una mezcla aceite, agua y lodos.

g) Clarificación

El aceite extraído por las prensas contiene impurezas (agua, arena, pedazos de nuez, fibra, etc.) que deben retirarse. Esta purificación se lleva a cabo mediante la aplicación del principio físico de decantación estática en tanques metálicos, en la sección denominada clarificación. Finalmente, con el uso de máquinas centrífugas y equipos de secamiento al vacío, el aceite de palma queda listo para pasar a los tanques de almacenamiento de la planta, de ahí se despacha a las refinerías, donde lo hacen apto para el consumo humano.

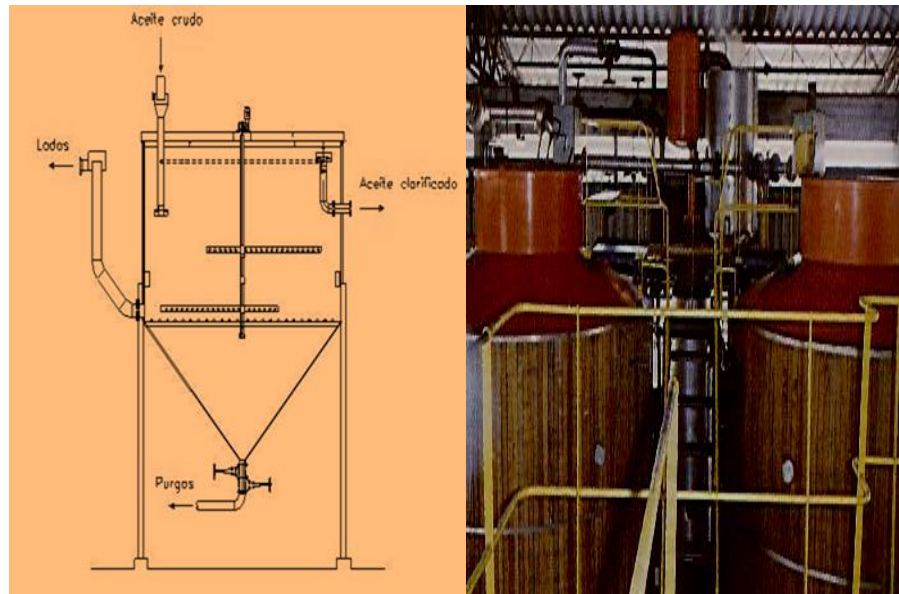


Figura 23. Tanques Clarificadores

Almacenamiento: Los tanques de almacenamiento deben de tener un recubrimiento interno con materiales epóxicos para evitar la corrosión. En el almacenamiento y el transporte debe de mantenerse la temperatura entre 32 y 40 °C.



Figura 24. Tanques de Almacenamiento

h) *Desfibración y Palmistería.*

Al terminar la etapa del prensado se obtiene una mezcla de nueces y fibras húmedas; esta última recibe el nombre de torta. Posteriormente con las nueces se inicia el proceso de palmistería.



Figura 25. Desfibrador

i) *Palmistería*

Este proceso de recuperación de las almendras de palmiste y la torta; se puede dividir de la siguiente manera:

Preparación de las nueces, en esta etapa las nueces pasan por sitios calentadores, en los cuales se secan para aflojar las almendras dentro de las nueces con el objetivo de lograr un perfecto descascarillado de las semillas.

Clasificación y trituración de las nueces, una vez secas las nueces, se clasifican por tamaños y pasan a los molinos trituradores, en los cuales se logra la rotura de la cáscara. Las nueces rotas pasan nuevamente por tambores de clasificación, con el fin de quitar el polvo y las partículas pequeñas y dejar las nueces que no se rompieron, para su reproceso.

Separación de las almendras, la mezcla triturada se hace pasar a través de una columna neumática, en donde el aire en contracorriente separa la cáscara de la almendra, el proceso se complementa con una separación, por fuerza centrífuga en un medio húmedo, de las almendras que van a estar entre las cascarillas.

Secado y empaque, finalmente la almendra es mandada a un secador donde se le elimina la humedad para luego ser almacenada con una humedad no mayor del 5% y la cáscara es enviada por medio de un transportador sinfín a la caldera para ser utilizada como combustible.

La almendra producida se prensa y se extrae 40% de aceite sobre almendra y 50% de harina sobre almendra y un 10% humedad sobre almendra.



Figura 26. Extracción Industrial de Aceite Crudo de Palma Africana⁶⁵

⁶⁵ Hartley, 1983; Basiron, 1996; Bockish, 1998.

Los modelos de producción de biodiesel se definen dependiendo del nivel de ácidos grasos libres (o FFA, por sus siglas en inglés Free Fatty Acids) que posea la materia prima a procesar. Si éstos son inferiores al 5% se les aplica el proceso llamado transesterificación, el cual fue mencionado en el Capítulo 1, que integra esta tesis, si son mayores al 5% además del proceso de transesterificación, requieren de un proceso previo que se llama esterificación para bajar los ácidos grasos libres a menos de 5%, como se observa en la figura 27, que se muestra a continuación.

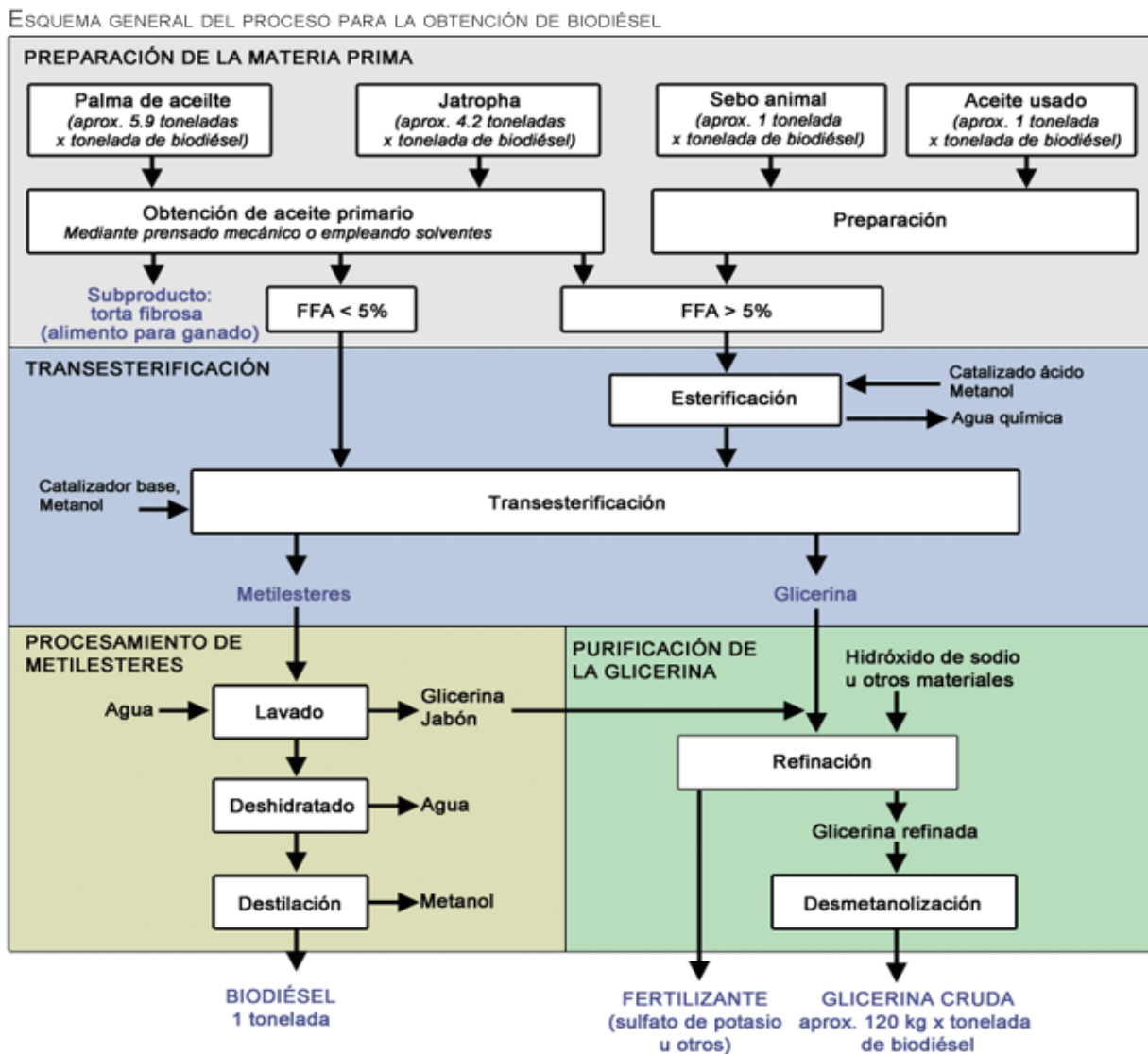


Figura 27. Esquema General del Proceso para la Obtención de Biodiesel⁶⁶.

⁶⁶ Bioenergeticos.com.mx

El Aceite de Palma Crudo presenta un máximo de 5% Ácidos Grasos Libres (AGL), estos ácidos son solubles en las grasas y si no son previamente eliminados, se combinan con el catalizador y disminuyen la eficiencia de la reacción de transesterificación. Además los compuestos que se producen son jabones que posteriormente complicarán la fase de purificación del biodiesel y de la glicerina, aumentando con ello el costo de producción.

En el caso de los aceites de palma usados en la industria alimenticia estos deben someterse a un proceso de refinado el cual consiste en suprimir ácidos grasos, fosfátidos, pigmentos, componentes volátiles y otros materiales. Por lo tanto el refinado dependerá entonces de las aplicaciones futuras del aceite: deberá eliminar los constituyentes menores no deseados (ácidos grasos libres, metales, fosfátidos, gomas, mucílagos e impurezas) con el mínimo deterioro de los acilglicéridos y minimizar las pérdidas de los constituyentes deseados (vitaminas, antioxidantes y triglicéridos).⁶⁷.

4.2. Procesos Industriales para la Producción de Biodiesel⁶⁸.

Ya se mencionó que el proceso de transesterificación es el más utilizado para la producción de biodiesel, todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen las reacciones y posteriores fases de separación, purificación y estabilización. Asimismo existen múltiples opciones de operación viables para su fabricación, muchas de estas tecnologías 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.⁶⁹.

En general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación suelen utilizar procesos "batch" o discontinuos. Los procesos continuos, sin embargo, son más idóneos para

⁶⁷ Castro, P., Coello, J., Castillo, L. (2007) *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Perú: Soluciones Prácticas -ITDG. p. 173.

⁶⁸ http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_1-01-2013

⁶⁹ García, Juan Manuel y García José Ángel. *Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol* Madrid España, Universidad de Alcalá, 2006 vol. 1.

plantas de mayor capacidad que justifique el mayor número de personal y requieren una alimentación más uniforme.⁷⁰

▪ **Proceso Discontinuo**⁷¹

Este proceso es el más simple de los métodos en la producción de biodiesel, consiste en reactores del tipo tanque agitado CSTR (por sus siglas en inglés Continuous Stirred Tank Reactor), donde el reactor puede estar sellado o equipado con un condensador de reflujo. Por lo general, se trabaja a temperaturas de 65°C, aunque también se han reportado temperaturas desde 25°C hasta 85°C. El catalizador más común es el hidróxido de sodio, aunque también se utiliza el hidróxido de potasio, en un rango de 0.3 a 1.5%. En el reactor es indispensable una agitación rápida para obtener una correcta mezcla del aceite, catalizador y el alcohol, sin embargo ésta se reduce hacia el final de la reacción para permitir al glicerol separarse de la fase éster. El tiempo de reacción suele ser entre 20 minutos y una hora, reportando eficiencias entre el 85 y el 94%. Algunas plantas utilizan reacciones en dos etapas, con eliminación del glicerol entre ellas, esto aumenta el rendimiento final hasta porcentajes superiores al 95%.

El proceso discontinuo presenta una serie de ventajas:

- ❖ Tiene gran flexibilidad para la realización de ajustes, cuando se presentan variaciones de materia prima o de condiciones de proceso.
- ❖ La tecnología requerida para este tipo de procesamiento es de fácil adquisición operación y mantenimiento.
- ❖ Permite el manejo de producciones de biodiesel en cantidades pequeñas.

Sin embargo, también plantea ciertos inconvenientes:

- ❖ Los tiempos de producción son grandes.
- ❖ Hay dificultades para garantizar uniformidad de la calidad del combustible entre diferentes lotes.

⁷⁰ Ma, F.R., Hanna, M.A. (1999) Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 70 (1): p. 1-15.

⁷¹ http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_1-01-2013

- ❖ Hay una gran dificultad para evitar la presencia de contaminantes y productos intermedios en el producto final.
- ❖ Elevados requerimientos de espacio.
- ❖ No es viable técnica ni económicamente para producciones a gran escala.

En la figura 28, se muestra un diagrama de un proceso de transesterificación en discontinuo o batch, en el cual primero, se carga el aceite en el sistema, y después el catalizador y el metanol. El sistema está agitado durante el tiempo de reacción y al final se corta la agitación. En algunos procesos, se deja la mezcla que reaccionó reposar para iniciar una separación entre glicerol y ésteres. En otros procesos, la mezcla se bombea hacia un estanque de decantación o se separa en una centrifuga. El alcohol se remueve de ambos glicerol y éster utilizando un evaporador o una unidad "flash" (alta temperatura, baja presión). Los ésteres son neutralizados, lavados suavemente utilizando agua caliente levemente ácida para remover las sales y el metanol residual, antes de secarlo. El biodiesel final se manda a almacenamiento. Por otra parte, el flujo de glicerol se neutraliza y lava con agua suave, antes de entrar a una etapa de refinación.⁷²

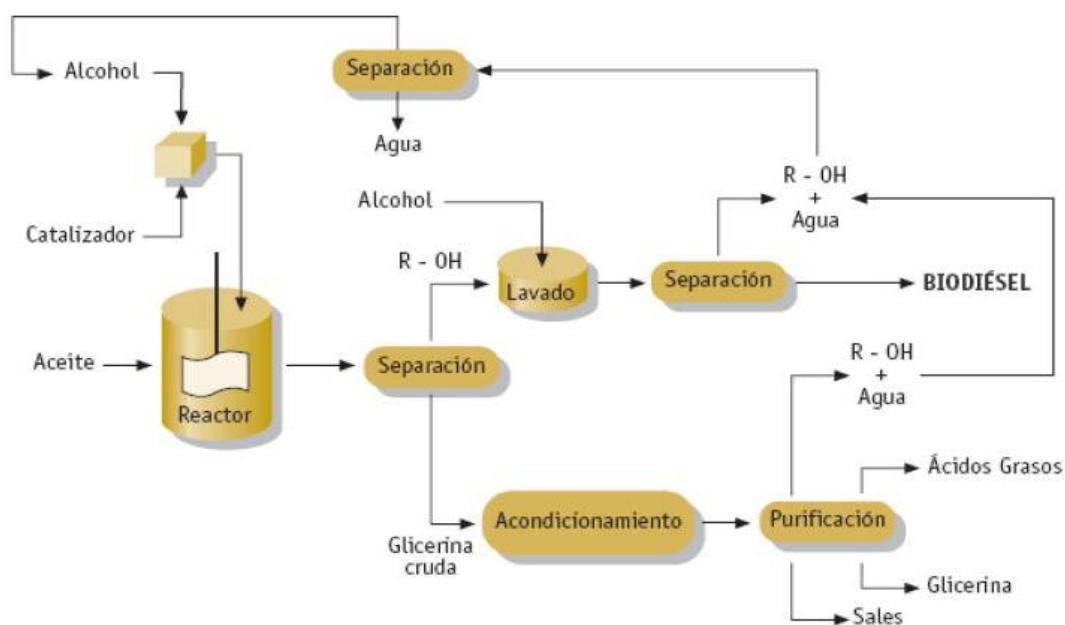


Figura 28. Proceso Batch o Discontinuo.

⁷² Miliarium. (2009). *Biodiesel*. <http://www.miliarium.com/Monografias/Biocombustibles/Biodiesel/Biodiesel.asp>.

- **Proceso Continuo**⁷³

Este proceso consta de una serie de reactores continuos del tipo tanque agitado, llamados CSTR y mencionados anteriormente. En este tipo de reactores se puede variar el volumen para permitir mayores tiempos de residencia y lograr aumentar los rendimientos de la reacción. Así, tras la decantación de glicerol primario, 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, lo que hace que el tiempo requerido para la separación de fases se incremente.

Existen diversos procesos que utilizan la mezcla intensa para iniciar la reacción de esterificación que se puede hacer por bombas o mezcladores fijos. Un ejemplo de alternativa a los reactores CSTR es el reactor de flujo pistón, del inglés Plug Flow Reactor (PFR). En vez de tener la reacción en un estanque con agitación, el reactor es de tipo tubular y la mezcla de reacción se mueve longitudinalmente por este tipo de reactores, con poca mezcla en la dirección axial. En este caso, la reacción 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). Debido a eso, se reducen considerablemente los costos. Además, este tipo de reactores puede operar a elevada temperatura y presión para aumentar el porcentaje de conversión.

En la figura 29, 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.

⁷³ http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_1-01-2013

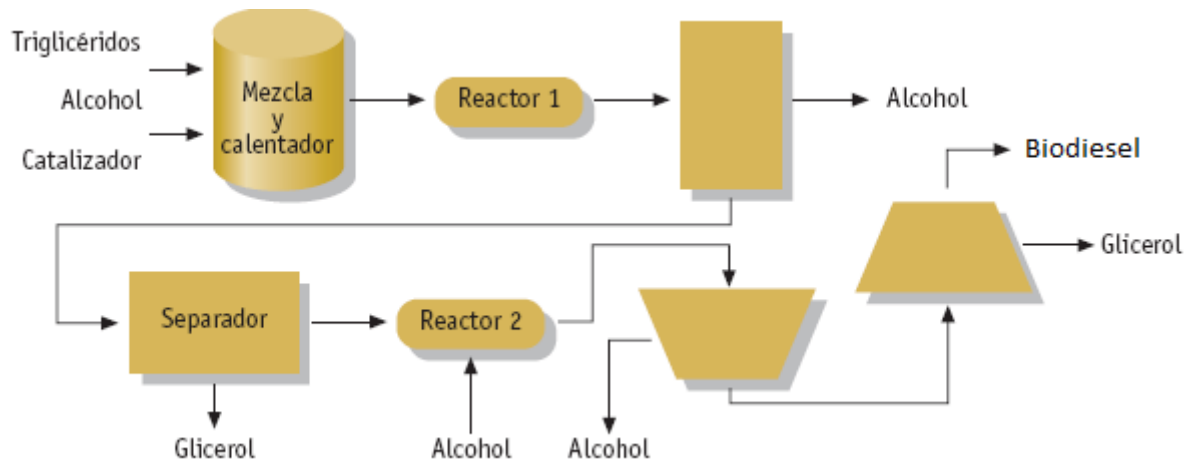


Figura 29. Proceso de Producción de Biodiesel mediante Reactores de Flujo Pistón.

Algunas de las ventajas del proceso de transesterificación continuo son:

- ❖ Flujo permanente de materia prima, lo que evita pérdidas de tiempo o calor.
- ❖ Menor costo de mano de obra.
- ❖ Disponibilidad de espacios limitado
- ❖ Mayor capacidad de producción.
- ❖ Mayor control de calidad del producto final.

Por otra parte, este proceso presenta algunos inconvenientes:

- ❖ Mayor costo de inversión inicial.
- ❖ No permite ajustes al variar las condiciones de materia prima.

- **Proceso de Esterificación⁷⁴**

Recordemos que este proceso se utiliza para refinar materia base con alto grado de AGL, con el fin de evitar la formación de jabones. Una esterificación acida de una aceite con AGL necesita una remoción continua por agua durante el proceso, o la reacción se detendrá

⁷⁴ http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_1-01-2013

prematuramente. Además, la relación molar entre el alcohol y el AGL es muy alta generalmente entre 20:1 y 40:1, y los requerimientos en ácido pueden ser más importantes también.

La esterificación consiste en el calentamiento de una mezcla del alcohol y del ácido correspondiente, en los procesos de esterificación se suelen utilizar catalizadores ácidos como ácido sulfúrico, utilizando el reactivo más económico en exceso para aumentar el rendimiento y desplazar el equilibrio hacia la derecha (esterificación de Fischer). El ácido sulfúrico sirve en este caso tanto de catalizador como de sustancia higroscópica que absorbe el agua formada en la reacción.

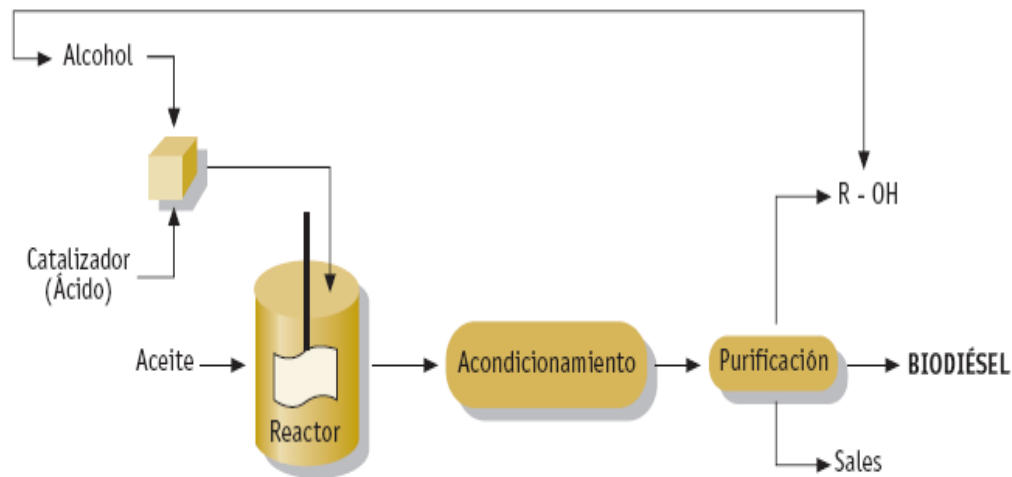


Figura 30. Proceso de Esterificación para la Producción de Biodiesel

- **Proceso Combinado Esterificación-Transesterificación.**⁷⁵

La esterificación se aplica combinada con la transesterificación con el objetivo de aprovechar el subproducto de ácidos grasos y producir biodiésel. Este tipo de procesos refina los ácidos grasos aparte del sistema de alimentación o mediante un tratamiento diferenciado en la unidad de esterificación. Se añaden los catalizadores cáusticos y el producto de reacción se separa mediante centrifugación (proceso llamado Caustic Stripping). Los aceites refinados son

⁷⁵ http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_1-01-2013

secados y enviados a la unidad de transesterificación para un proceso posterior. De esta manera, los ácidos grasos pueden ser transformados en ésteres metílicos mediante un proceso ácido de esterificación. Los procesos de catálisis ácida pueden ser usados para la esterificación directa de los ácidos libres (AGL). Una alternativa a esto sería utilizar un catalizador básico para formar deliberadamente jabón en el AGL. El jabón es recuperado, el aceite secado y posteriormente utilizado en un sistema convencional mediante catalizadores básicos.

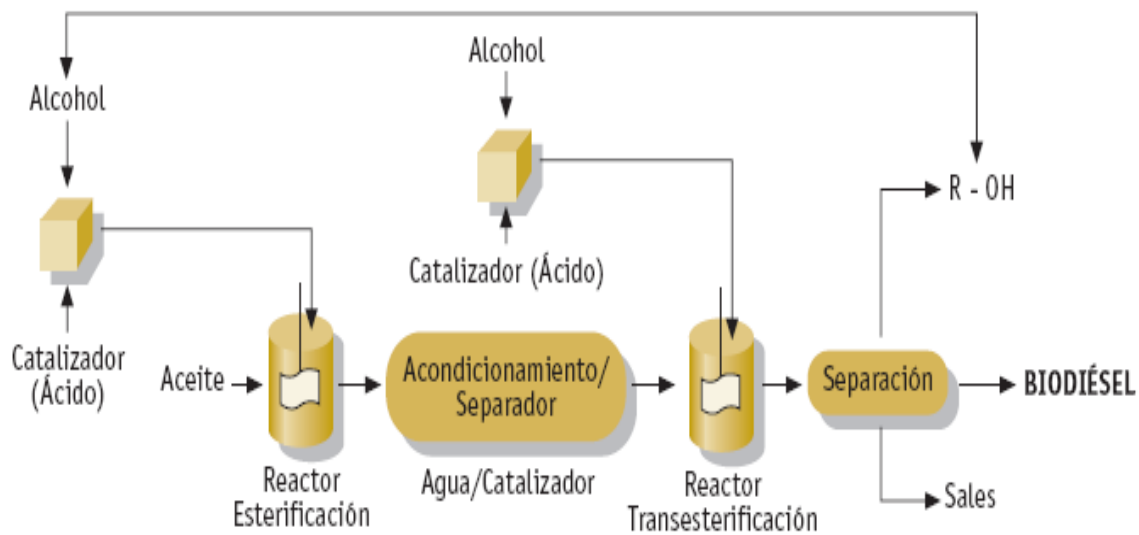


Figura 31. Proceso combinado Esterificación-Transesterificación para la Producción de Biodiesel

En el caso de la esterificación, al contrario que en la reacción de transesterificación, al utilizar catalizadores ácidos no es necesario recurrir a trabajar con temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos.

- **Proceso en Condiciones Supercríticas**⁷⁶

Como hemos visto anteriormente, la presencia de agua y ácidos grasos libres afecta la eficiencia de la transesterificación alcalina. Asimismo, el uso de catalizadores dificulta la purificación del biodiesel y el glicerol. Una de las propuestas para superar estas dificultades en

⁷⁶ http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_1-01-2013

la transesterificación es el uso de metanol en condiciones supercríticas. Las principales ventajas de este método son, no requerir del catalizador, la no sensibilidad ante la presencia de agua o ácidos grasos libres, los ácidos grasos libres son esterificados al mismo tiempo que el resto del aceite. Todo esto convierte a este método en una alternativa interesante para la transesterificación de aceites usados que usualmente contienen AGL y agua.

El proceso supercrítico implica el uso de determinadas condiciones de temperatura y presión que afectan las condiciones termo físicas del metanol, tales como su constante dieléctrica, viscosidad, peso específico y polaridad, todo lo cual facilita la reacción de transesterificación. De esta manera, bajo condiciones de alta temperatura y presión se logra una conversión casi completa del aceite en biodiesel en muy poco tiempo (5-10 minutos), sin necesidad de catalizador. A pesar de que algunos autores critican los altos costos operativos de este proceso, debido a los altos requerimientos de temperatura y presión (mayor consumo energético) y también altos costos de inversión para contar con equipamiento que resista estas condiciones de operación, se ha propuesto que este proceso sería competitivo, ya que: permite aprovechar aceites comestibles usados (de bajo costo), sin necesidad de pre tratamiento ácido (que también aumentaría los costos de operación e inversión), a pesar de los altos consumos energéticos, el tiempo de reacción es menor, lo cual compensa en cierta manera este aspecto, el glicerol, subproducto de la transesterificación, resulta casi puro (96,4%), lo cual le da un mayor valor de mercado que en el proceso de transesterificación alcalina (pureza de sólo un 85%), el biodiesel obtenido de la transesterificación solo requiere la destilación del metanol para tener una alta pureza (99,8%).

Esto también reduce los costos de inversión y operación necesarios para purificar el biodiesel en la transesterificación alcalina.

Cuando un fluido o gas es sometido a temperaturas y presiones que exceden su punto crítico, aparecen una serie de propiedades inusuales. Desaparece la diferencia entre la fase líquida y vapor, existiendo sólo una fase de fluido presente. Además, los disolventes que contienen grupos OH, como el agua o alcoholes primarios, toman las propiedades de supe ácidos. Un

ejemplo de sistema sin catalizadores es el que utiliza un elevada relación de alcohol:aceite (42:1).

Bajo condiciones supercríticas (350 a 400°C y $P > 80$ atm) la reacción se completa en 4 minutos. Los costos de instalación y los costos de operación son más altos y la energía consumida mayor, por lo que aunque los resultados mediante este proceso son muy interesantes, el escalado de estas instalaciones a nivel industrial puede ser difícil.

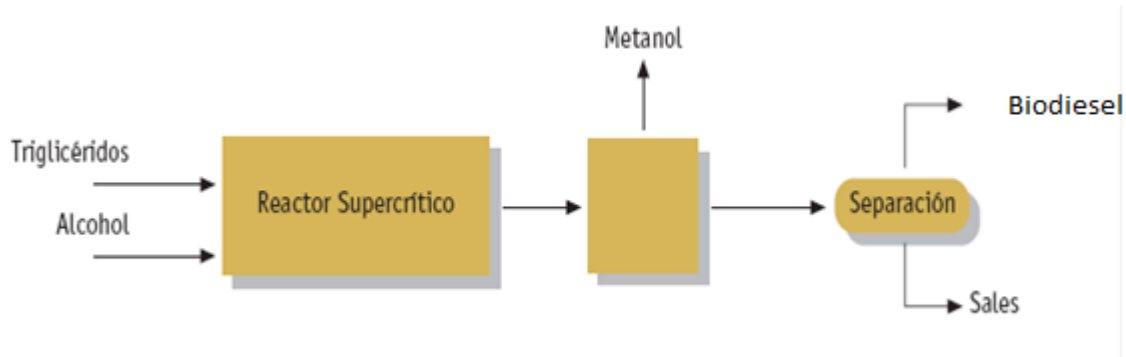


Figura 32. Proceso en condiciones supercríticas para la producción de Biodiesel

▪ Otros procesos

Los siguientes procesos para la producción de biodiesel actualmente se encuentran en fase experimental o bien algunos no se han adaptado todavía, esto debido a que no son fácilmente costeables.

- Craqueamiento Térmico o Pirolisis de las Grasas.⁷⁷

El Craqueamiento térmico o pirolisis, es la conversión de una sustancia en otra por medio de su calentamiento a altas temperaturas (superiores a 450°C) en ausencia de oxígeno. En algunas situaciones se utilizan además, catalizadores que ayudan a romper los enlaces químicos de las moléculas, de manera que se forman moléculas de menor tamaño. La pirolisis de las grasas,

⁷⁷ http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_01.htm

con ayuda de óxido de silicio o de aluminio como catalizador, es una manera de obtener combustibles químicamente similares al diesel de petróleo. Sin embargo, es un proceso caro. Además, al remover el oxígeno del proceso se pierden los beneficios ambientales de ser un combustible oxigenado. Este combustible obtenido del craqueamiento térmico de las grasas no es biodiesel (no está compuesto por ésteres de ácidos grasos), pero es también un combustible renovable semejante al diesel de petróleo.

La transesterificación alcalina, a pesar de sus limitaciones, es la única utilizada comercialmente hasta el momento. Un mayor desarrollo de las otras tecnologías es necesario para confirmar su viabilidad técnica y económica a gran escala, pero su potencial es interesante.

4.3. Tecnologías usadas a nivel mundial para la producción de biodiesel

Actualmente existen diversas tecnologías desarrolladas principalmente para la transesterificación de aceites vegetales limpios en medio básico. 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 su producción se destacan instituciones como: BDP (Bioenergy Development Program of Canadá), PORIM (Palm Oil Research Institute of Malasia), COOPERATIVE ASPERHOFEN - Austria y CENPES/DIPROD del Brasil.

Existen otros proveedores de tecnología tales como Axens, Ballestra, Biodiesel Industries, Cimbria-Sket/Bratney, EKOIL, Energea, etc.

A continuación se describen algunas de las tecnologías existentes para la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales.

4.3.1. Procesos continuos:

❖ *Tecnología Henkel para transesterificación*⁷⁸

El nivel de la tecnología y la estandarización del proceso permiten trabajarlo en forma continua. Este proceso fue diseñado para propósitos generales, para diferentes cantidades de aceite y emplea un paso de destilación. El proceso descrito en la figura 34, contiene dos reactores tubulares seguidos de tanques de sedimentación, la presión de operación se encuentra entre 400,000 – 500,000 Pa y la temperatura 343-353 °K.

La glicerina se retiene en los separadores y el éster se purifica por destilación. La calidad del éster resultante es buena, buen color, alta pureza, bajo porcentaje de glicéridos, así como la calidad de la glicerina cerca del 92%. Actualmente están operando dos plantas de 170 mil toneladas por año en Europa. El contenido de glicerina libre en el biodiesel es muy alto (>0.02%) para su uso como combustible, por tal razón, se pierde un residuo entre el 4% y 5% del biodiesel obtenido.

⁷⁸ Estado del Arte de las Tecnologías de Producción de Biodiesel CORPODIB.

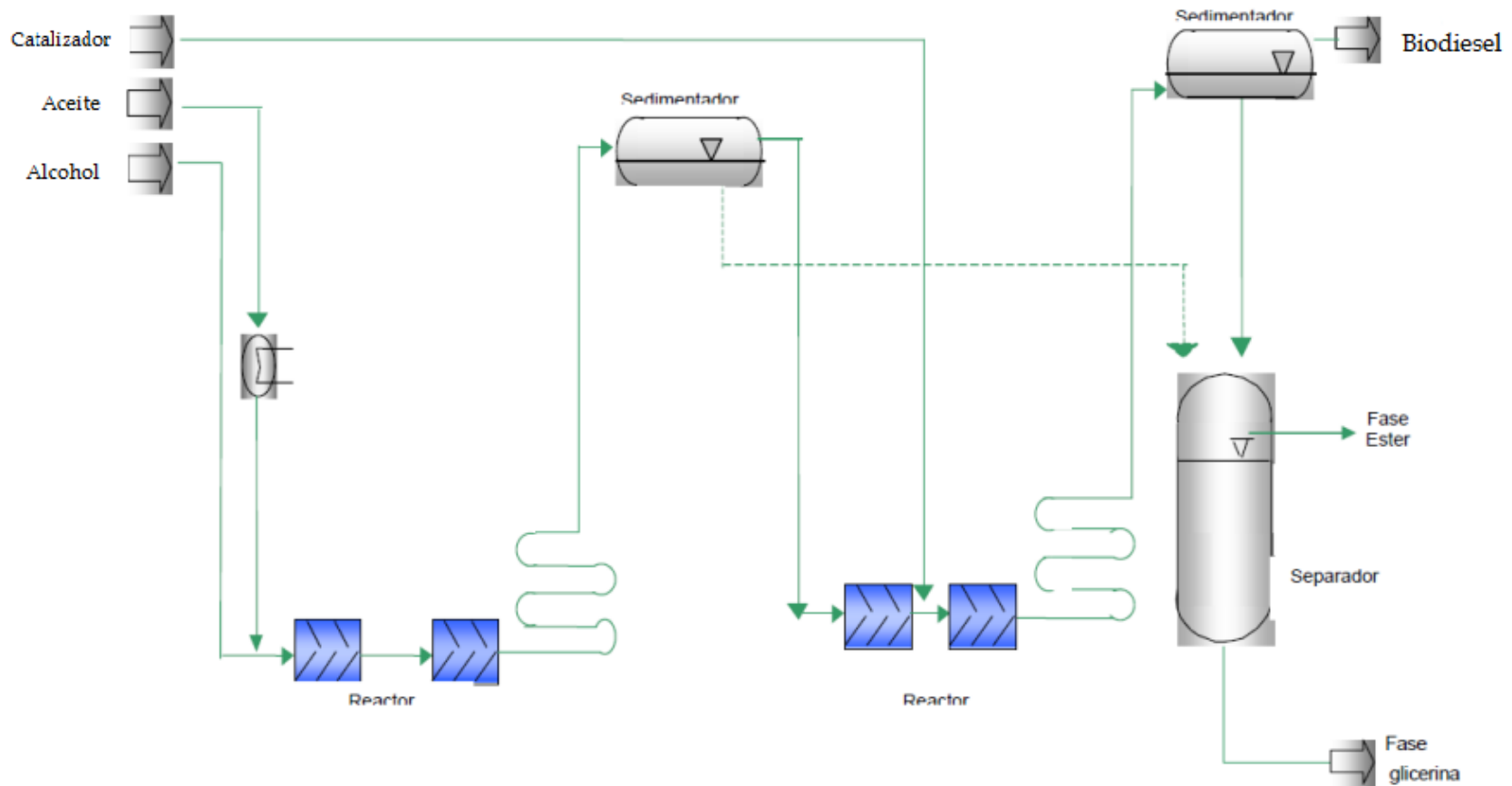


Figura 33. Proceso Henkel.⁷⁹

⁷⁹ Estado del Arte de las Tecnologías de Producción de Biodiesel CORPODIB.

❖ Proceso de deglicerolización continua (CD) para transesterificación⁸⁰

En 1991 se presentó el proceso de transesterificación continua a baja presión, que utiliza columnas de reacción y separadores centrífugos. Consta de un ciclo cerrado para la reacción con el alcohol, y un segundo ciclo de agua para la extracción de glicerina y lavado del éster. La primera planta producía 1 tonelada /día, luego se construyó una planta piloto para 20 toneladas /día produciendo 8 mil toneladas / año, con la cual se lograron los últimos detalles para la construcción de una planta grande en Europa.

a) Planta industrial para producción de biodiesel

Esta planta para la producción de 80 mil toneladas por año trabaja a máxima capacidad. Lo nuevo en este proceso es el manejo eficiente del flujo a contracorriente en los reactores de transesterificación, que normalmente se lleva a condiciones anhidras. En la figura 35, se muestra el proceso. El biodiesel procedente de la reacción de transesterificación entre el metanol, la oleaginosa (aceite vegetal) y el catalizador (KOH), se lleva a una etapa de separación y lavado en la cual se retiran las trazas de catalizador que no alcanzan a reaccionar, así como el metanol que tampoco reacciona. En la fase siguiente se continúa separando el biodiesel que se lleva a almacenamiento y la glicerina se lleva a un proceso de purificación. El biodiesel así obtenido es sometido a pruebas de control de calidad. Este proceso alcanzó un mayor grado de transesterificación. Actualmente con esta tecnología está operando una planta de 100 mil toneladas/día en Hamburgo. Las ventajas de esta tecnología son:

- Planta compacta
- Menor inversión
- Opera a presión ambiente y temperatura entre 338 K y 343 K
- Alta consistencia y estándares de calidad.
- Capacidades de 8,000 a 150,000 Ton/año
- Bajo consumo de energía
- Excelente calidad del producto
- No conveniente para materias primas ácidas (> 2 % ácidos grasos).

⁸⁰ Estado del Arte de las Tecnologías de Producción de Biodiesel CORPODIB.

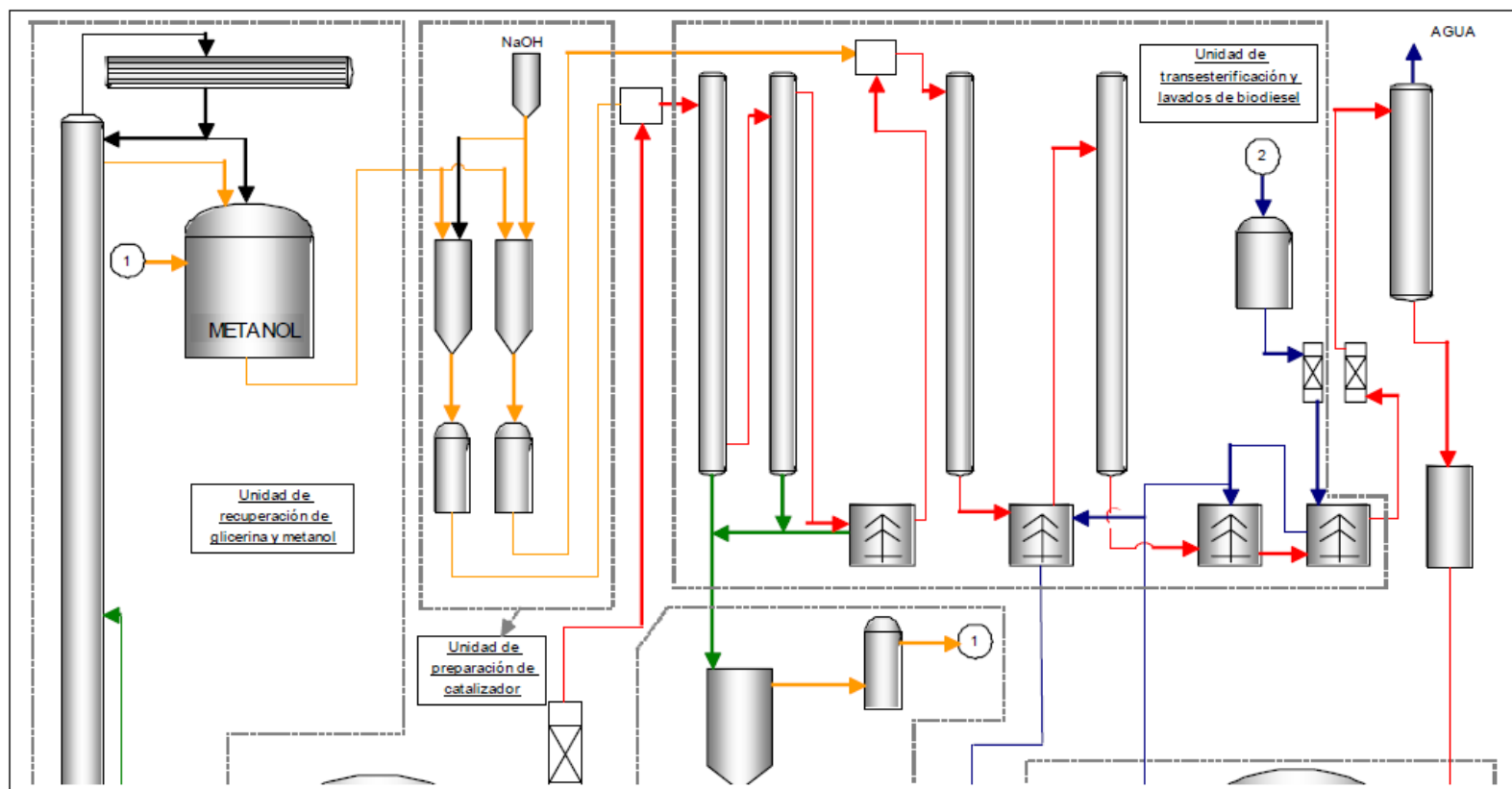


Figura 34. Proceso de Deglicerolización Continua (CD) para Transesterificación⁸¹

⁸¹ Estado del Arte de las Tecnologías de Producción de Biodiesel CORPODIB.

❖ *Proceso continuo para la producción de metil éster – Estereco*⁸²

Estereco es una compañía italiana dedicada a la investigación de combustibles biológicos o renovables. La compañía ha sido productora y comercializadora del biodiesel desde 1992. Ver figura 35. El aceite vegetal obtenido de las oleaginosas se somete a una esterificación multifase junto con el catalizador y alcohol metílico o etílico. De este primer reactor se producen dos fases: un biodiesel sin refinar y la glicerina. El primero se lleva a un proceso de refinación del metil éster o etil éster, del cual se obtiene el combustible listo para su consumo.

En esta misma etapa se separa el alcohol que no reaccionó y se lleva a un sistema de recuperación para recircularlo al proceso. Por otra parte la glicerina se lleva a un proceso de purificación para obtener un producto de grado industrial o pasa a una destilación junto con parte del alcohol recuperado para obtener una glicerina de grado farmacéutico.

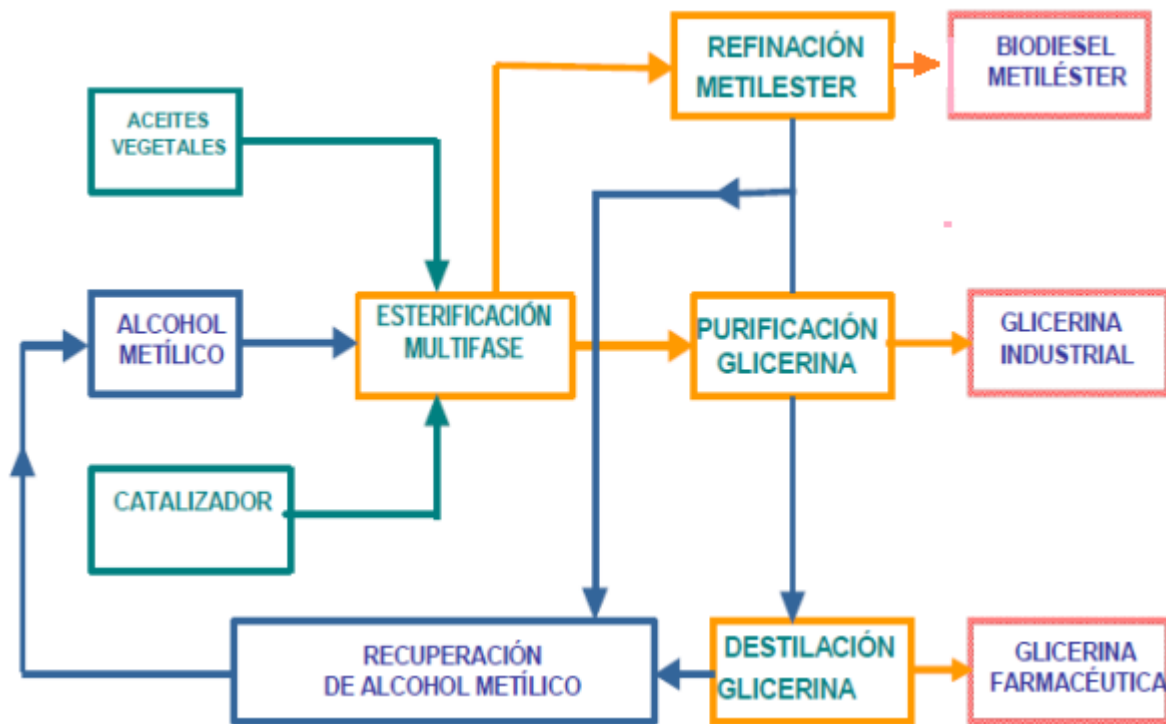


Figura 35. Tecnología y Transesterificación Estereco.

⁸² Estado del Arte de las Tecnologías de Producción de Biodiesel CORPODIB.

Esta tecnología se lleva a cabo en un:

- Proceso continuo.
- Velocidad de reacción alta.
- Optimización en los costos de operación.
- Moderación en la temperatura y presión.
- Bajo consumo de insumos químicos.
- Proceso automatizado.

❖ *Proceso continuo para la producción de biodiesel – Ballestra*

Ballestra S.P.A. es una empresa italiana fundada en el año de 1960, Ballestra produce plantas y maquinaria en el sector de la industria química para el proceso de aceites y grasas, sistemas de integración y control para plantas industriales, producción y comercialización de biodiesel. Ha desarrollado un proceso continuo de transesterificación de aceites vegetales (colza, girasol, palma, etc.). La reacción de transesterificación comprende 3 fases con un exceso de metanol con respecto a la cantidad estequiométrica, se emplea un álcali metilado en una solución anhidra de metanol como catalizador. El metanol y el catalizador se dosifican y se recirculan en los tres pasos de la reacción dentro de las condiciones establecidas.

La temperatura de la reacción es menor a 50°C y la presión es de máximo 0.5 bar. El tiempo de residencia es inferior a 2 horas. En el final del proceso de transesterificación se separan las dos fases. La fase liviana contiene principalmente metil éster, su proceso de separación consiste en lavar el metanol sin reaccionar con soluciones acuosas. La fase pesada contiene principalmente glicerina; su proceso de purificación comprende neutralización, separación del metanol que no ha reaccionado, dilución con las aguas del lavado del proceso de purificación del metil éster, separación de jabones formados en el proceso de neutralización y concentración final por encima del 80%. La glicerina parcialmente refinada se puede entregar como tal a los destiladores especializados. En forma opcional, la planta puede incluir pre-tratamiento de la materia prima y el procesamiento de la glicerina al grado farmacéutico (> 99.7%), Ver Figura 36.

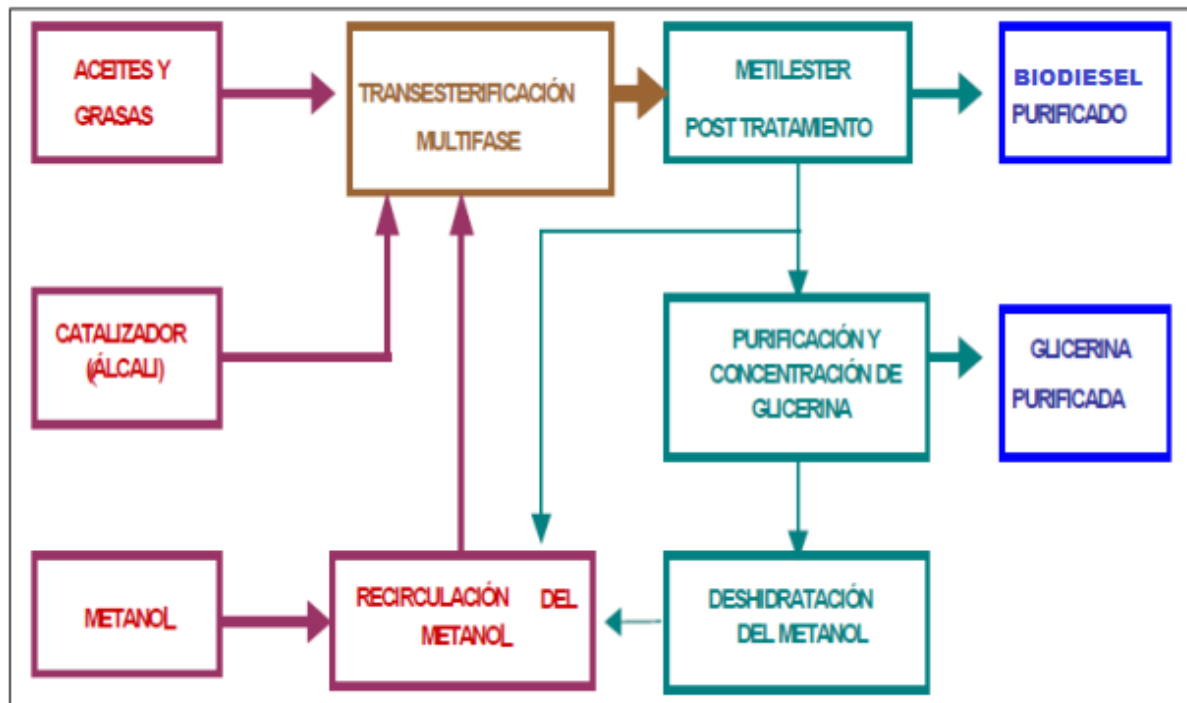


Figura 36. Tecnología y Transesterificación Ballestra.

❖ *Tecnología de OceanAir Environmental*

OceanAir Environmental comenzó a operar previamente bajo el nombre de NOPEC Corporation en 1998 en Lakeland, Florida – Estados Unidos; NOPEC fue adquirida por OceanAir en septiembre del 2000. Proporciona los servicios de construcción y la tecnología para la producción del biodiesel. La empresa tiene un área de aproximadamente una hectárea con dos refinerías químicas como sigue:

Refinería de biodiesel. La capacidad de producción de la planta es de 10 millones de galones por año de biodiesel. La planta ha procesado aceites de la soya, maíz, canola y aceites usados. La planta también puede manejar grasa animal.

Refinería de glicerina. La capacidad de producción de la planta es de 12 millones de libras de glicerina/año. Este subproducto de la planta del biodiesel (glicerina cruda) se refina con calidad comercial. La planta también puede producir glicerina cruda para ser procesada por otras plantas especializadas.

❖ *Tecnología del Pacific Biodiesel Inc.*

Empresa pionera en la producción comercial de biodiesel en los Estados Unidos creada en 1996. Construyó su primera planta en Nagano–Japón. La materia prima utilizada para la producción del biodiesel es obtenida de aceites vegetales, aceites usados y grasas animales. Pacific Biodiesel Inc, trabaja con el proceso desarrollado por la Universidad de Idaho, que adiciona metanol y un catalizador a los aceites vegetales y grasas animales produciendo biodiesel y glicerina. La empresa procesa más de 40 toneladas de aceites usados al mes Comercializa el biodiesel en varias de las islas de Hawai.

Las plantas construidas e instaladas por Pacific Biodiesel Inc, tiene dos configuraciones: 200 mil galones/año (750 mil litros /año), expandibles a máximo 800 mil galones/año; 400 mil galones/año (1,500 mil litros / año) expandibles a 1,660 mil galones / año.

4.3.2. Procesos batch

Muchas plantas en el mundo con capacidades de 500–10 mil toneladas/año son diseñadas empleando procesos por tandas (batch) de dos etapas. Cada etapa consta de un tanque reactor y un tanque sedimentador, llamado sistema mezclador/sedimentador. Este procedimiento no resulta costoso y alcanza buenas calidades en los productos. Asistido por control de procesos, es versátil en cuanto al cambio de materias primas en pequeñas cantidades.

❖ *Proceso ESTERFIP*

El Instituto Francés del Petróleo desarrolló el proceso ESTERFIP basado en la transesterificación catalítica de aceites vegetales (aceites de palma, colza, semillas de algodón, etc.).

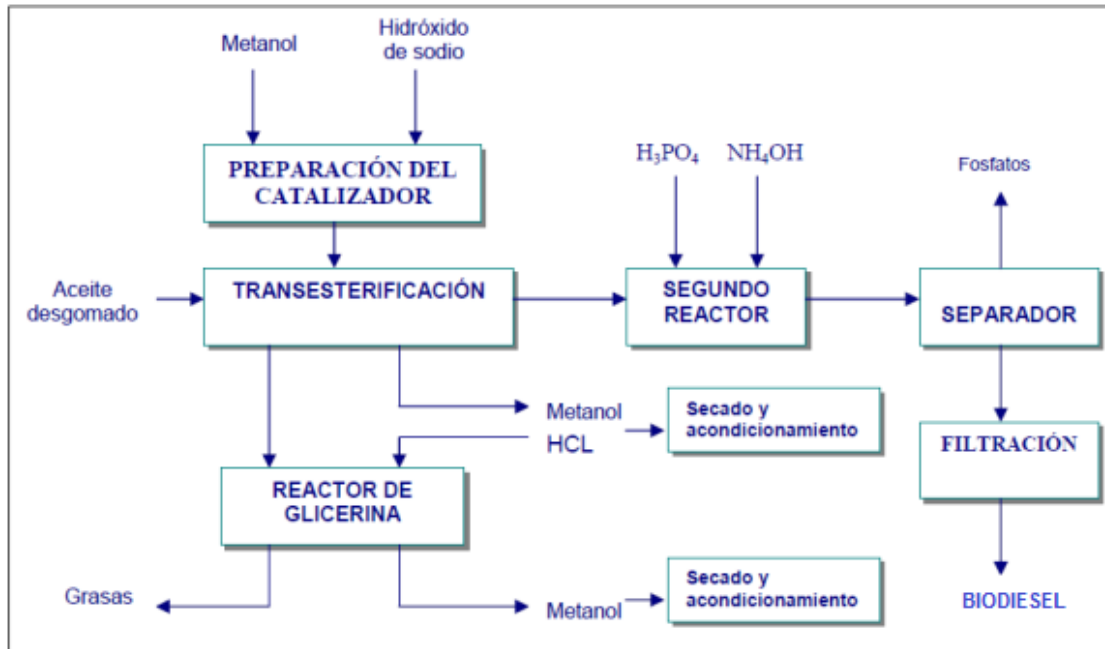


Figura 37. Flujo del Proceso BATCH.

4.4. Campeche y la Producción de Biodiesel.

La palma de aceite en el estado de Campeche se encuentra en los municipios de Escárcega, Palizada, Candelaria y el Carmen. Las tres regiones productoras más importantes son Sabancuy-Escárcega, Aguacatal y Palizada. Se han beneficiado entre 850 y 900 productores del sector social en 47 comunidades de los municipios de Escárcega, Candelaria y Carmen, y 8 productores del sector privado de los Municipios de Palizada y Carmen.



Figura 38. Regiones Productoras de Palma de Aceite en Campeche⁸³.

Como se menciona en el capítulo 3 “El Sureste mexicano y la producción de biodiesel en México”, el estado de Campeche en la actualidad cuenta con 15,634.60 toneladas de producción de aceite de palma y una planta extractora de aceite crudo de palma en el municipio de escarcega, cabe mencionar que solo 5 municipios del estado, se dedican a la producción de este cultivo.

México depende de las importaciones de aceite de palma para abastecer las demandas internas, cuyo origen es de varios países, destacando algunos como Costa Rica, Indonesia, Colombia y Ecuador, los cuales también se convierten en competidores, incorporándose algunos otros países que están en pleno desarrollo como son Guatemala, Panamá y Honduras.

Si bien es cierto que México es altamente deficitario en general de aceites y grasas y por consiguiente igualmente deficitario en la producción de aceite de palma, lo que ha originado importar grandes volúmenes de este producto en los últimos años, también es cierto que la superficie establecida para la producción de este aceite sigue una tendencia también a la alza. Lo que nos beneficia ya que al producir más aceite de palma en nuestro país, evitaríamos la dependencia a las importaciones, mencionado anteriormente. Asimismo es importante considerar otra ventaja, con las que cuenta México, como es la cercanía con el mayor mercado

⁸³ Plan Reactor de Palma de Aceite. Gobierno del Estado de Campeche.

del mundo que son los Estados Unidos de Norte América, mismos que tienen uno de los mayores consumos per cápita a nivel mundial y que no producen este tipo de aceite por lo que a mediano plazo podría convertirse en nuestro mejor cliente.

En nuestro tema de estudio, se propone la instalación de una planta productora de biodiesel a partir de palma africana en el estado de Campeche, el cultivo de la Palma de Aceite o palma africana, es una actividad que pretende reactivar la economía del Estado de Campeche en el medio rural ya que permite romper con la estacionalidad del ingreso de los productores del sector agrícola que la explota y contribuye así, a la reducción de las migraciones de zonas rurales a las zonas urbanas, debido a que el cultivo, así como su industrialización es generador de empleos en promedio 99 jornales/Ha., por ciclo anual.⁸⁴ Asimismo no hay que dejar de lado que los agrocombustibles no son una solución mágica a la adicción que la sociedad actual mantiene con respecto a los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). Por lo tanto, es necesario que mantengamos ó recuperemos el respeto a la Madre Tierra, evitando la deforestación y la erosión y envenenamiento de los suelos, la sobre explotación del agua y el saqueo de nuestros recursos naturales.

Como se ha mencionado anteriormente, en nuestro país contamos con plantas extractoras de aceite de palma crudo, el cual es posteriormente refinado dependiendo de los usos al que este sea destinado, las plantas refinadoras se encuentran en los 8 estados de la república que se mencionan en la tabla 15.

Tabla 15. Plantas Refinadoras en la República Mexicana.

Estructura de la Industria Aceitera en México	
Chiapas	1
D.F.	3
Hidalgo	1
Jalisco	2
Michoacán	1
Nuevo león	1
San Luis Potosí	1
Sonora	3

Fuente. ANIAME

⁸⁴ Plan Reactor del Sistema Producto Palma de Aceite.

4.5. Proceso de Producción de Biodiesel a Partir de Aceite de Palma en Campeche.

La SENER en colaboración con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), realizó un estudio para analizar el potencial de producción y uso de biodiesel como combustible para el sector transporte en nuestro país, en el estudio se plantearon los siguientes escenarios:⁸⁵

- 1) Mezcla del 5% de biodiesel en volumen en el diesel convencional.
- 2) Mezcla del 10% de biodiesel en volumen en el diesel convencional.

De acuerdo al estudio concluyeron, que para llegar a sustituir un 5% del diesel de petróleo en el país será necesario instalar 10 plantas industriales con capacidad de 100,000 t/año cada una o más de 140 plantas pequeñas con capacidad de 5,000 t/año cada una. Para optimizar el suministro de los cultivos agrícolas, y reducir el costo de distribución de biodiesel y sus subproductos, las plantas de producción deben instalarse en las cercanías de las refinerías o de las plantas productoras de aceites vegetales. Desde el punto de vista logístico, la mejor opción son plantas integradas de producción de aceites vegetales y biodiesel.

En este punto, que integra el grueso de esta tesis, se propone un proceso continuo para la producción de 100,000 Ton/año de biodiesel a partir de aceite de palma y metanol, vía catálisis alcalina, el metanol es la tecnología más utilizada actualmente, especialmente en Europa; como se mencionó en las tecnologías descritas en el punto 4.3 “Tecnologías usadas a nivel mundial para la producción de biodiesel”. Asimismo es importante mencionar que el metanol es la materia prima para transesterificación más simple y ligera. Por su pequeño volumen molecular reduce ampliamente los impedimentos estéricos en la reacción con el aceite de palma, lo cual se ve reflejado en una velocidad de reacción más alta en comparación con otros alcoholes. Además de esto, posee una ventaja relevante frente al etanol, que es el segundo alcohol más utilizado para producir biodiesel, ya que el precio del metanol anhidro es 1.9 veces menor al del etanol. Cabe mencionar que el proceso continuo es el más eficiente y a diferencia de otros procesos existentes en el mercado se caracteriza por que el equipo de planta es de fácil obtención, construcción y los materiales son de bajo costo.

⁸⁵ “Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México”, SENER.

Estudios recientes para la producción de biodiesel, muestra que este proceso cuenta con experiencia desarrollada, y es posible técnica y económicamente a escala industrial. Por lo anterior, el diseño de la planta para producción de biodiesel a partir de aceite de palma utiliza este método, con las recomendaciones y condiciones sugeridas por el Palm Oil Research Institute of Malaysia PORIM, que ha trabajado los últimos quince años en el desarrollo de mecanismos de producción de biodiesel a partir de aceite de palma crudo. Esta tecnología es utilizada ampliamente en Europa y los Estados Unidos para la obtención a escala industrial de biodiesel a partir de aceite de colza y girasol, entre otros.⁸⁶

➤ ***Descripción del Proceso de Producción de Biodiesel.***⁸⁷

Para la producción de biodiesel, se requiere del procesamiento del fruto de la Palma Africana en plantas extractoras, como se mencionó en el punto 4.1 “Etapas de Extracción del Aceite de Palma”, por lo tanto una vez que se obtiene el aceite de palma, este se transporta a las plantas de producción de biodiesel.

Las etapas básicas del proceso productivo son:

- a) Recepción, almacenamiento y acondicionamiento del aceite crudo.
- b) Esterificación de ácidos grasos libres.
- c) Transesterificación del aceite crudo.
- d) Purificación y almacenamiento de biodiesel.
- e) Purificación y almacenamiento de glicerol.
- f) Destilación y reciclaje de metanol

No obstante que en el proceso se requiere de una sección previa de extracción de aceite, se considera en principio que la planta se abastecerá directamente del aceite crudo y que el procesamiento del fruto se realizará en otras instalaciones. Lo anterior obedece, entre otras, a las siguientes razones: 1) Las plantas de extracción de aceite de palma deberán ubicarse de manera estratégica cerca de las plantaciones, con el fin de no comprometer la calidad de la

⁸⁶ <http://www.mpob.gov.my> (02-02-13)

⁸⁷ Centro Nacional de Producción más Limpia Honduras, 2004).

materia prima. El número de ácidos grasos libres presentes en el aceite, cuyo efecto en la producción de biodiesel ya se ha descrito, se incrementa en función del tiempo en el cual los frutos tardan en ser procesados luego de ser cosechados. 2) Por otro lado, la logística para el transporte de los racimos es más complicada que la requerida para el transporte del aceite crudo, lo cual se refleja directamente en los costos. 3) Además, la logística de distribución de los residuos del proceso de extracción, utilizados actualmente para la obtención de abonos agrícolas, se facilita si el proceso se encuentra más cerca de las plantaciones. 4) Por último, el procesamiento del fruto genera otros productos que pueden ser comercializados o reprocesados para la generación de productos de mayor valor agregado que involucra una actividad comercial en otros mercados.

Como ya se indicó, el primer paso de las etapas básicas del proceso productivo es el inciso **a) Recepción, almacenamiento y acondicionamiento del aceite crudo**, por lo tanto las materias primas a utilizar son:

- **Aceite Crudo de Palma**, el cual será proporcionado por la extractora “COMPAÑÍA ACEITERA CAMPECHANA” localizada en el Municipio de Escárcega, en el Estado de Campeche.
- **Metanol**

Como se mencionó anteriormente, el alcohol metílico es la materia prima para transesterificación más simple y ligera. Por su pequeño volumen molecular reduce ampliamente los impedimentos estéricos en la reacción con el aceite de palma, lo cual se ve reflejado en una velocidad de reacción más alta en comparación con otros alcoholes. Además de esto, posee una ventaja relevante frente al etanol, que es el segundo alcohol más utilizado para producir biodiesel, ya que el precio del metanol anhidro es 1.9 veces menor al del etanol

- **Catalizador (Hidróxido de Sodio).**

El catalizador seleccionado para la reacción de transesterificación es el hidróxido de sodio sus ventajas sobre otras sustancias catalíticas se basan en que las velocidades de reacción son más altas, es fácil de conseguir en el mercado, y las sustancias generadas en las etapas de

purificación, debido a la presencia del hidróxido, son fáciles de retirar o no presentan inconvenientes como impurezas incluidas en los productos. Sin embargo, se deberán considerar dos aspectos en la manipulación de esta sustancia: el primero, que antes de realizarse la solución, la sosa en estado sólido debe mantenerse en condiciones anhidras, pues la hidratación y solubilización genera altas cantidades de calor, lo cual puede causar daños en los recipientes contenedores. El segundo aspecto a considerar es que las soluciones de hidróxido de sodio tienen un pH entre 10 y 13, que son bastante corrosivas, por lo cual las tuberías de conducción de metanol-hidróxido deberán ser construidas con materiales resistentes a valores altos de pH.

Productos.

- **Biodiesel.**
- **Glicerina.**

La glicerina o glicerol es un coproducto del proceso de transesterificación, que debido a su amplio uso en la industria en general, se presenta como una oportunidad adicional de ganancia realizando una serie de operaciones de purificación a bajo costo.

a) Recepción, almacenamiento y acondicionamiento del aceite crudo.

El aceite de palma crudo llega a las instalaciones de la planta de elaboración de biodiesel en camiones de carga, el producto es descargado en tanques de almacenamiento que deben tener la capacidad volumétrica para almacenar un stock mínimo de tres días. Debido a que este aceite presenta un punto de ignición relativamente alto, se deben dotar a los tanques con sistema de calentamiento de vapor para mantener las unidades entre 35 y 40 °C, temperatura necesaria para que el aceite permanezca en estado líquido, con una viscosidad adecuada para reducir los costos de bombeo hacia la siguiente etapa. El metanol anhidro también llegará a la planta en carros tanque, y se almacenará en tanques que deberán tener un volumen suficiente para un stock de diez días.

b) Esterificación de ácidos grasos libres.

Todos los aceites vegetales poseen un porcentaje de ácidos grasos libres, puesto que los triglicéridos pueden descomponerse de acuerdo a las condiciones de almacenamiento. En el caso del aceite de palma, este índice alcanza el 5%, esto representa una desventaja en el proceso de transesterificación, puesto que los ácidos forman jabones con el hidróxido de sodio, generándose una pérdida de biodiesel debido a la formación de emulsiones en la fase de lavado, lo cual hace necesario, además, un gasto mayor de catalizador. Para evitar estos inconvenientes se realiza un pre tratamiento con el objetivo de eliminar dichos ácidos. Esta etapa no se lleva a cabo en las plantas de producción de biodiesel en general, pues los aceites utilizados convencionalmente tienen un nivel muy bajo de ácidos grasos. Sin embargo, como se menciono anteriormente, el aceite de palma alcanza concentraciones de ácidos grasos libres de hasta el 5%, por lo que se hace necesario este pre tratamiento. La ruta convencional es realizar una esterificación del ácido utilizando el mismo alcohol que se empleará luego para producir biodiesel, empleando un catalizador ácido, dicho catalizador es por lo general ácido sulfúrico; pero en este proceso, se debe deshidratar el aceite, llevar a cabo la reacción en un medio homogéneo y luego realizar una evaporación instantánea; todo esto implica un costo de operación elevado y una disminución en la calidad del aceite. El PORIM y el Institut Français du Pétrole (IFP)⁸⁸ han trabajado en el desarrollo de una metodología de catálisis heterogénea alimentada continuamente. Dicho método ya ha sido implementado en plantas piloto con éxito. La esterificación vía catálisis heterogénea es la tecnología que se ha seleccionado para el pre tratamiento del aceite crudo. Asimismo en el artículo denominado “Producción de biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea”⁸⁹ se indica que los procesos de catálisis heterogénea en la pre-esterificación del Aceite Crudo de Palma, muestran ser técnicamente viables pues logran disminuir el índice de acidez a valores menores a 1; estos valores fueron comparados con resultados obtenidos con catalizadores homogéneos. Los procesos con catalizadores heterogéneos mejoran el proceso debido a que en la transesterificación, las etapas de lavado del biodiesel obtenido se reducen, el proceso se hace

⁸⁸ <http://www.exed.hec.edu/campus/institut-francais-du-petrole>.

⁸⁹ “Producción de biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea”. *Fernando Cardeño**, *Luis Ríos*, *Alexander Franco*. Aceptado el 31 de agosto de 2009).

ambientalmente amigable y se obtienen rendimientos más altos de metilésteres, comparados con los rendimientos obtenidos cuando se parte del aceite sin pre esterificar.

La metodología se describe a continuación:

El aceite crudo será llevado a un calentador (E-101) por la acción de una bomba centrífuga (P-101); el intercambiador que utiliza vapor elevará la temperatura del aceite hasta 363K (90°C), punto ligeramente superior al necesario para la etapa de esterificación. El metanol también será bombeado (P-102) para dividirse en dos corrientes, una hacia la etapa de esterificación y otra para la preparación del catalizador necesario en la fase de transesterificación. La primera corriente de metanol, se mezclará con el aceite crudo en un mezclador estático (M-201), la mezcla resultante ingresa a un reactor empacado con catalizador de zinc soportado en alúmina u óxido de hierro (R-201), allí se lleva a cabo una esterificación de los ácidos grasos libres, con un tiempo de residencia de una hora. La reacción genera agua y metil-ésteres de características similares al biodiesel que se producirá más adelante. Esta reacción se realiza a cabo a una presión de 304 kPa (3 atm) y una temperatura de 361 K (88°C). Se dispondrá de dos reactores de condiciones similares, debido a que el catalizador deberá renovarse dos veces al año.

Es importante realizar la mezcla de metanol y aceite crudo antes del reactor, pues la vida útil del catalizador disminuye al contacto del aceite sin la presencia del alcohol. El efluente del reactor pasa por una válvula de expansión (V-201) para alcanzar la presión atmosférica y luego ingresar en un tanque separador de fases (S-201) donde se retira el agua formada junto con una fracción de metanol en la fase pesada para ser purificada (corriente 204); la fase liviana, que se compone de aceite, metil-éster, metanol y ácidos grasos que no reaccionaron, se lleva a la siguiente sección de la planta. Esta etapa será necesaria cuando los aceites que se utilicen como materia prima no sean refinados o tengan un origen distinto a la palma africana, por ejemplo aceites de higuera, jatropha o aceites usados.

c) Transesterificación del aceite crudo.

El aceite se transforma en metil-éster (biodiesel) por medio de un proceso catalítico homogéneo utilizando metanol en exceso como agente reaccionante e hidróxido de sodio como catalizador; estos dos últimos se mezclan en un tanque (K-301) fabricado en acero inoxidable para resistir la corrosión generada por el hidróxido de sodio. La mezcla obtenida se bombea (P-301) hacia los reactores de transesterificación. La experiencia del PORIM ha demostrado que la reacción de transesterificación del aceite de palma debe llevarse a cabo en dos etapas, y la purificación de los productos, biodiesel y glicerol, se debe realizar en presencia del metanol, de lo contrario la reacción se invertiría generándose de nuevo triglicéridos.

Por lo tanto, la fase liviana (S-201), que se compone de aceite, metil-éster, metanol y ácidos grasos que no reaccionaron en la etapa de esterificación y la corriente de metanol con NaOH corriente (304) son mezclados vigorosamente hasta obtener una suspensión homogénea. Esta operación se realiza en un reactor de tanque agitado (R-301) donde se mantendrá una temperatura de 345 K (72°C). Entonces, el efluente del reactor pasa a un separador donde se forman dos fases líquidas (S-301). La fase pesada (corriente 308), que se lleva a purificación, contiene glicerina y metanol como principales componentes; y la liviana se conforma de biodiesel metanol, glicerina y aceite que no reaccionó (corriente 307), esta última corriente se lleva a un segundo reactor de tanque agitado (R-302), que tiene las mismas características del anterior, pero con una mayor capacidad. Allí se agrega una fracción de metanol y catalizador fresco. Puesto que el efluente de este equipo es similar al del primer reactor de transesterificación, también se realiza una separación de fases tanque (S-302), de donde la fase pesada se une con la del anterior separador en un mezclador (M-601) y se lleva a purificación; la fase liviana, que contiene el biodiesel, pasa a la sección de purificación.

d) Purificación y almacenamiento de biodiesel.

La corriente retirada del tercer separador de fases, se bombea (P-302) y se calienta en un intercambiador hasta 442 °K (169°C) (E-401) para realizar una evaporación instantánea al

vacío (D-401), aprovechando que la temperatura de ebullición del metanol es cuatro o cinco veces menor que la del glicerol y la del metil-éster. De esta manera, el metanol se retira en fase vapor a 432 °K (159°C) y 50kPa (0.5 atm) para luego ser purificado. En esta operación se pierde el 0.46% de biodiesel en la fase vapor y la corriente líquida efluente (404) posee 0.3% de metanol. Después de enfriarse hasta 355 °K (82°C) (E-402), la mezcla de biodiesel que contiene de 0.45 a 0.5% en peso de glicerina, y de 0.4 a 0.45% de otras materias contaminantes, se lava con agua en una proporción 1 a 3, en un sistema de tres sedimentadores a contracorriente (S-401, 402, 403) que operan a 351, 340 y 324 °K (78.5, 67.9 y 51.4 °C). El agua utilizada en este proceso se bombea de dos tanques de almacenamiento (K-401). En los lavados, el agua arrastra las impurezas solubles y se separa del biodiesel por diferencia de densidad, para reciclarla a la planta de tratamiento. El biodiesel que se retira de la capa superior en estas etapas arrastra de 1,500 a 2,000 ppm de agua, contenido que debe reducirse a menos de 1,000 ppm, valor que es el máximo reportado para el buen funcionamiento del combustible. Para realizar la deshidratación, el éster es bombeado (P-404) a un calentador (E-403) que eleva la temperatura a 523 K (250°C), para expandirse en un evaporador instantáneo (D-402) que funciona a 30 kPa de presión (0.3 atm) y 504K (231°C) donde el biocombustible alcanza un valor de 750 ppm de agua. Allí, se retira la fracción de agua, en la que se pierde el 0.65% del biodiesel. Esta última corriente se condensa (E-405) y se lleva a tratamiento finalmente el biodiesel se enfría hasta 313K (40°C) y se bombea a la sección de almacenamiento (P-405 y K-402), que, se compone de tres tanques para un (stock de diez días) con serpentines que mantienen el contenido sobre los 398 K. Con este procedimiento el biodiesel alcanza una pureza entre el 98 y el 99%.

e) Purificación y almacenamiento de glicerol.

Las fracciones pesadas que se retiran en los separadores posteriores a la transesterificación, se mezclan, y la corriente resultante se calienta (E-601) hasta los 515K (243°C), y se llevan a un vaporizador instantáneo (D-601) que funciona a 50kPa (0.5 atm) donde se retira el metanol. La corriente en fase vapor arrastra el 6.1% del glicerol, mientras que la corriente líquida mantiene un contenido de 3.3% de metanol. A la glicerina, que contiene agua, metanol, jabones y catalizador, se le agrega agua en una proporción 1 a 5 en un tanque agitado (R-601), para

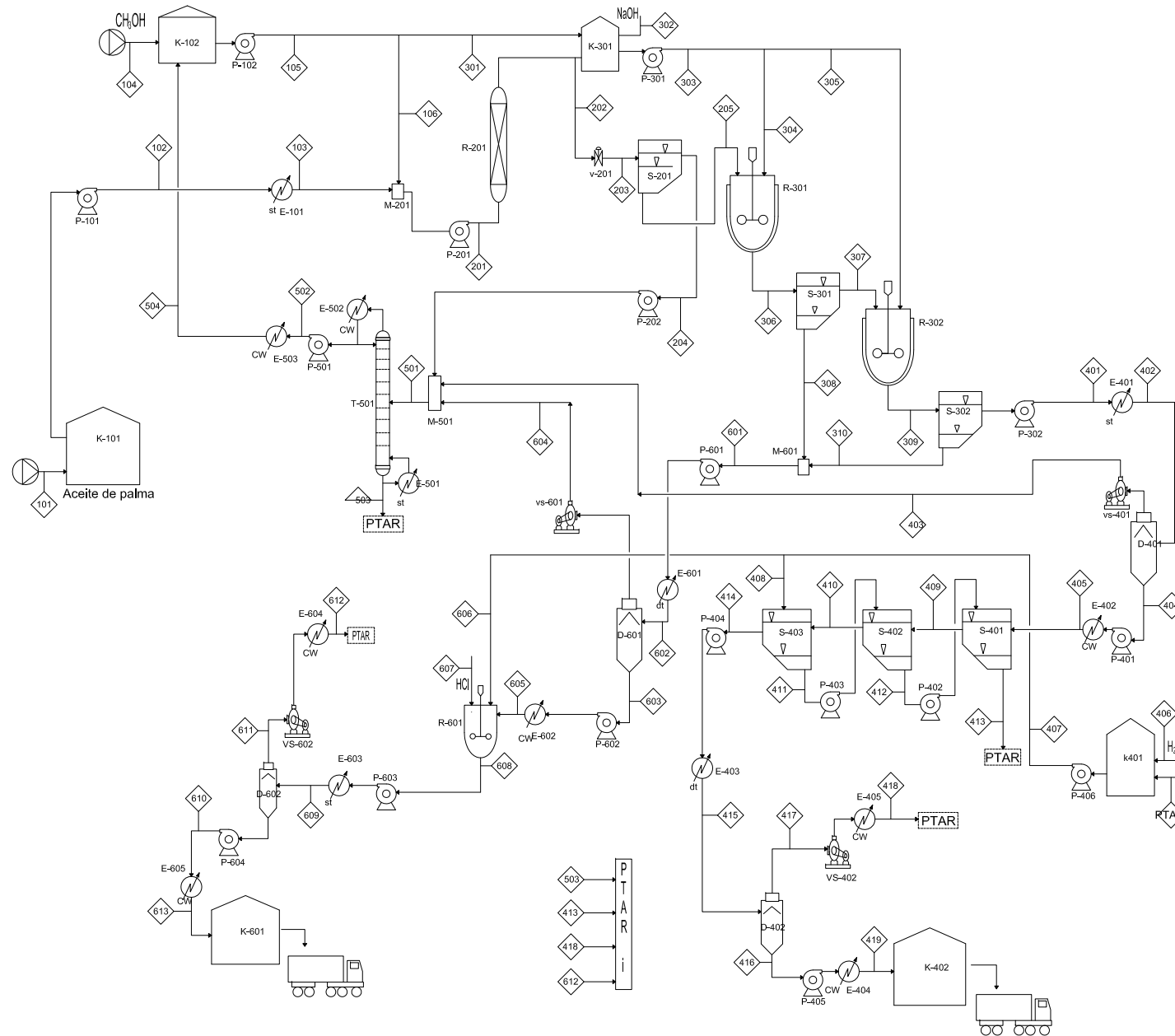
facilitar la dilución del ácido (corriente 607) que neutralizara los restos de catalizador. Dicha agua proviene de los tanques de almacenamiento mencionados anteriormente. En el mismo reactor, se agrega ácido clorhídrico al 37% peso a peso, para neutralizar la sosa. Esta operación tiene un tiempo de residencia de una hora. La mezcla resultante es bombeada (P-603) a un calentador (E-603) donde alcanza una temperatura de 454K (181°C), para ser sometida a una evaporación instantánea (D-602) a 378K (105°C), donde se retira parte del agua junto con una pérdida del 0.03% del glicerol en la fase vapor, que se condensa y se lleva a tratamiento (E-604). Finalmente, la glicerina es bombeada (P-604) y enfriada (E-605) hasta 313K (40°C) para ser almacenada en un tanque (K-601) (stock de diez días). De esta manera, se obtiene un producto de 83.5% de glicerina, con impurezas de metanol (1.6 %), jabón (0.2%) y NaCl (2.9%).

f) Destilación y reciclaje de metanol

La corriente retirada como fase pesada después del reactor de esterificación, junto con la corriente de vapor de metanol que se le despoja al biodiesel y la que se le excluye a la glicerina, se mezclan (M-501) generando una corriente que contiene 87.6% de metanol, 6.1% de agua, 2.8% de biodiesel y 3.5% de Glicerol. Dicha corriente se lleva a una torre de destilación (T-501) donde el agua junto con el glicerol y el éster se retiran por la parte inferior para ser llevados a tratamiento. El metanol se lleva a una pureza del 99.4%, se enfría hasta 313 K (E-503) y se recircula a los tanques de almacenamiento (K-102).

El proceso que se ha mencionado se puede visualizar en el Diagrama de Proceso de la Figura 40, mostrada a continuación.

Proceso de Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Palma



D-401	D-402	D-601	D-602	E-101	E-401	E-402	E-403	E-404	E-405	E-501	E-502	E-503	E-601	E-602	E-603	E-604	E-605	K-101	K-102	K-301	K-401	K-402	K-601	M-201	M-501	M-601	P-101	P-102	P-201	P-202
Evaporador flash de metanol - acetate	Evaporador flash de agua - ester	Evaporador flash de metanol - glicerina	Evaporador flash de agua - glicerina	Calentador de aceite	Calentador ester - metanol	Enfriador de ester	Calentador ester - agua	Enfriador de biodiesel	Condensador de agua	Rehendedor torre de destilación	Condensador de destilación	Enfriador de metanol	Calentador metanol - metanol	Enfriador glicerina	Calentador glicerina - agua	Condensador de vapor de agua	Enfriador de glicerina	K-101 Tanque de aceite crudo	K-102 Tanque de metanol	K-301 Tanque de catalizador	K-401 Tanque de agua de proceso	K-402 Tanque de biodiesel	K-601 Tanque glicerina	M-201 Mezclador metanol y aceite crudo	M-501 Mezclador condensador metanol - agua	M-601 Mezclador fases pesadas de reacción	P-101 Bomba de aceite crudo	P-102 Bomba metanol	P-201 Bomba para esterificación	P-202 Bomba metanol - agua
P-301 Bomba de metanol - catalizador	P-302 Bomba de suministro a separación	P-401 Purificación de biodiesel	P-402 Bomba de lavado 2	P-403 Bomba de lavado 1	P-404 Bomba para secado de biodiesel	P-405 Bomba para almácigo de biodiesel	P-406 Bomba para agua de proceso	P-501 Bomba reciclo de metanol	P-601 Bomba para evaporación de glicerina	P-602 Bomba para purificación de glicerina	P-603 Bomba para concentración de glicerina	P-604 Bomba para enfriamiento de glicerina	PTAR Planta de tratamiento de aguas	R-201 Reactor de esterificación	R-301 Reactor de transesterificación	R-302 Reactor de transesterificación	R-601 Reactor de neutralización	S-201 Separador de fases primer reactor	S-301 Separador de fases segundo reactor	S-302 Separador de fases segundo reactor	S-401 Separador de lavados 1	S-402 Separador de lavados 2	S-403 Separador de lavados 3	T-601 Torre de destilación de metanol	V-201 Válvula de expansión	VS-401 Sistema de vacío Evaporador 401	VS-402 Sistema de vacío Evaporador 402	VS-601 Sistema de vacío Evaporador 601	VS-602 Sistema de vacío Evaporador 602	

4.6. Plantas de Biodiesel en México⁹⁰.

La primera planta de biodiesel en nuestro país, fue inaugurada en octubre de 2007 en el puerto de Lázaro Cárdenas Michoacán, a fin de abastecer al autotransporte y sectores industriales de la región, Veracruz también fue pionero en este sentido, ya que en agosto de 2008 anunció la construcción de una planta en Chinameca para la producción de biodiesel a partir de palma de aceite, y la producción de etanol a base de caña en el ingenio San Nicolás, en Córdoba. Por su parte, el estado de Chiapas tiene un proyecto de introducción de biodiesel que inició con la instalación de dos reactores FuelPod 3 (que utilizan aceite de palma, metanol e hidróxido de potasio como materia prima).

Chiapas Bioenergéticos tiene dos plantas de biodiesel a partir de aceite de palma africana y de aceites vegetales usados (Tuxtla Gutiérrez con 2,000 L/d y Puerto Chiapas con 28,000 L/d). Ese biodiesel se utiliza en mezclas B5 y B20 en 40 vehículos de transporte público de Tuxtla Gutiérrez y Tapachula.

El gobierno estatal de Chiapas también impulsó la creación del Centro de Investigación y Tecnología en Producción de Biodiesel, ligado a la Red Mesoamericana de Biocombustibles.

Por su parte, la compañía mexicana Soluciones en Bioenergía (Solben) desarrolló una tecnología propia para producir biodiesel con *Jatropha curcas*, mediante la instalación de dos plantas en el sureste, una en Cárdenas Tabasco para producir 3,000 litros por día, y otra en Tapachula, Chiapas, con capacidad de 8,000 litros diarios. Asimismo, Solben tiene proyectos piloto de cosechas en los estados de Sinaloa, Colima, Nuevo León, Puebla y Yucatán, además de negociaciones con centros de investigación en Colima, Sonora, Quintana Roo, Morelos y el Estado de México.

En 2011, la empresa Agroindustria Alternativa del Sureste plantó 1,500 hectáreas de *Jatropha*, con el plan de crecer a 10,000 hectáreas, en complemento con la instalación de una extractora y una refinadora.

⁹⁰ Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México (SENER-BID-GTZ)

Con el apoyo de Financiera Rural y el Programa Trópico Húmedo (PTH) y la incursión del sector privado, Quintana Roo impulsará seis proyectos verdes, uno de los cuales tendrá como resultado la plantación de 1,200 hectáreas de jatropha genéticamente mejorada resistente a zonas áridas.

De acuerdo a lo mencionado en el presente trabajo, se espera que próximamente Campeche sea uno de los estados que se financiado por algún organismo que le brinde el apoyo, para la instalación de plantas productoras de biodiesel a partir de aceite de palma.

4.7. Costos del Biodiesel

En este apartado se presentan los precios del biodiesel a nivel internacional tomados como referencia del portal de la Secretaria de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural Pesca y Alimentación SAGARPA, y en donde se observa que el biodiesel a nivel internacional en enero de 2012, presentó un costo de \$16.35 pesos/L, el cual comparado el precio actual del diesel que es de 11.28 pesos, se encuentra elevado.

Precios Internacionales del Biodiesel⁹¹.

Mes/año	USD/L	Pesos mexicanos/L
Enero 2012	1.28	\$16.35

⁹¹ Bioenergeticos.com.mx
Referencia precio de dólar \$12.77

CONCLUSIONES

De acuerdo a lo mencionado en el presente trabajo, y derivado a la elevada dependencia que tenemos de los combustibles fósiles, a la actual contaminación que se presenta a nivel mundial, se han buscado alternativas que nos ayuden a mitigar dichos problemas, el biodiesel es una, en los capítulos que integran el grueso de esta tesis, se presentó una propuesta para la producción de biodiesel a partir de palma africana en el estado de Campeche, se propuso como materia prima el aceite de palma crudo, que es obtenido de la extracción de la palma africana, la cual presenta unos rendimientos elevados en comparación con otras materias primas, Asimismo en el proceso se obtiene glicerina lo cual derivado a su comercialización contribuye a mejora la rentabilidad del biodiesel.

Cabe mencionar que en la actualidad su producción se centra en los estados del sureste de la República Mexicana como son: Chiapas, Veracruz, Tabasco y Campeche, los cuales presentan las condiciones ambientales propicias para el desarrollo de la planta en mención.

De esta manera se analizaron los diferentes procesos de obtención del biodiesel, concluyendo que el más adecuado, para la producción de biodiesel a partir de aceite de palma crudo es el que trabaja en base a las recomendaciones del PORIM (Palm Oil Research Institute of Malasia) el cual es un proceso de transesterificación alcalina, este proceso es el más preferido por las industrias productoras de biodiesel, generalmente es más rápido y menos costoso, comparado con la transesterificación ácida u otros tipos de catalizador, en este caso se uso una esterificación como pre tratamiento del aceite crudo con el objeto de disminuir los niveles de Ácidos Grasos Libres AGL menores a 1, usando un catalizador heterogéneo, tomando como referencia el artículo “Producción de biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea”⁹².

Después de conocer qué proceso se usaría, se propuso la instalación de una planta de biodiesel en el estado de Campeche, esto en base a los datos estadísticos que nos indican que Campeche

⁹² “Producción de biodiesel de aceite crudo de palma mediante catálisis heterogénea”. *Fernando Cardeño**, *Luis Ríos*, *Alexander Franco*. Aceptado el 31 de agosto de 2009).

es un actual productor del cultivo de palma y cuenta con una planta de extracción del aceite de palma del cultivo en mención, y principalmente con el objeto de que esta actividad reactive la economía del Estado de Campeche en el medio rural, ya que permite romper con la estacionalidad del ingreso de los productores del sector agrícola que la explota y contribuye así, a la reducción de las migraciones de zonas rurales, debido a que el cultivo, así como su industrialización es generador de empleos en promedio 99 jornales /Ha por ciclo anual.

En cuanto a los elevados precios del biodiesel en comparación con el diesel, se espera que poco a poco sectores como PEMEX, implementen el uso de estos bioenergéticos en nuestro país con la finalidad de que se apoye en este sentido al sector ambiental, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero, así como se incremente la demanda de estos para que sucesivamente sean incluidos dentro el mercado nacional e internacional.

Se espera que el presente trabajo sirva como guía para analizar en el futuro la instalación de plantas productoras de biodiesel usando aceite de palma africana en diversas zonas de nuestro país, y con ello se contribuya a la generación de empleos en el sector industrial y se disminuyan las emisiones de gases de efector invernadero.

BIBLIOGRAFÍA

- 📖 Meher L.C, Naik S.N., Technical Aspects of biodiesel production by transesterification. A review. Centre for Rural Development and Technology, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, India. Año 2006.
- 📖 Bruno O. Dalla Costa, María L. Pisarello, Carlos A. Querini. Procesos de Producción de Biodiesel, Uso de Materias Primas Alternativas y de Alta Acidez. Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (INCAPE). Argentina, 2003.
- 📖 R. J. Larosa, Artículo “Proceso para la Producción de Biodiesel,” (Mayo, 2006).
- 📖 FRAMES. *Biodiesel, una alternativa viable*. Informes especiales Argentina, Oro Verde, Ciudad Universitaria 2007.
- 📖 <http://www.biodisol.com/biodiesel> 10-05-2012
- 📖 LAWSON H. *Aceites y grasas alimentarios - Tecnología, utilización y nutrición* Zaragoza: Editorial Acribia. (1994).
- 📖 <http://industrialactea2010.wikispaces.com/caracteristicas> 13-05-2012
- 📖 Zhang Y., Dubee M.A., Mclean D.D., Kates M. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. Department of Chemical Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Ont., Canada. 2003.
- 📖 Perspectivas para el Biodiesel en Centroamérica. Convenio CEPAL. República Federal Alemana 2007.
- 📖 Shine T.K. Biodiesel Handling And Use Guidelines. 3° Edición. Septiembre 2006.
- 📖 Sener/ BID/ GTZ (Edit.): Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México, D.F., Noviembre 2006.
- 📖 Singh S.P. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel, A review. School of Energy and Environmental Studies, Takshila Campus, Indore, Madhya Pradesh, India. 2009.
- 📖 García, J., García J. A. Biocarburantes Líquidos, biodiesel y bioetanol Madrid España, Universidad de Alcalá, 2006 vol. 1.

- Haas, M.J. Improving the economics of biodiesel production through the use of low value lipids as feedstocks: vegetable oil soapstock. U.S. Department of Agriculture, United States. 2005.
- Darnoko, D., Cheryan, M. (2000) Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists Society* 77. Año 2000.
- Predojevic, Z.J. (2008) *The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps*. *Fuel* 87 (17-18): p. 3522-3528.
- Landa, M. *Biodiesel, sustituto del diesel convencional*. España. 2004
- Ciria, J.I. *Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel*. España 2004.
- Facultad de Agronomía. *Biodiesel, una alternativa sustentable a los combustibles fósiles*. Argentina. 2006.
- González, M. Usando restos para movernos. Trabajo Práctico de Introducción de la Informática. Asunción, Paraguay. Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción. 2003.
- Hilbert, J. A. Panorama actual del biodiesel Argentina. Centro de Investigación de Agroindustria e Instituto de Ingeniería Rural INTA. 2006
- Carlstein, A. *Biodiesel en Europa*. Argentina, Editorial La Opinión. 2006.
- <http://www.sener.gob.mx> 13-01-13.
- SENER, Secretaría de Energía. *Balance Nacional de Energía 2007*. México, D.F. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, 2008.
- Vanichseni, Teering, y otros. *Potential biodiesel production from palm oil for Thailand*. Bangkok, Thailand. Kasetsart University, 2002.
- Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria. *Monografía de la palma de aceite*. Veracruz. Gobierno del Estado de Veracruz, 2006.
- Ekboir J., Espinoza G. Análisis del sistema mexicano de investigación agropecuaria. México, D.F.: CIMMYT. 2003.
- Estudio Manifestación de Impacto Ambiental “Extracción de Aceite de Palma Africana Agroindustrias de Palenque S.A. de C.V. CACER Consultores Ingeniería Integral y Proyectos Febrero 2008.

- 📖 Noma Mexicana PROY-NMX-F-019-SCFI-2011 “Alimentos Aceite de Palma, Especificaciones”
- 📖 Balance Nacional de Energía 2011 SENER. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico México, 2012.
- 📖 Atlas de la Agroenergía y los Biocombustibles en las Américas II Biodiesel. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura San José, Costa Rica 2010.
- 📖 Omar M.C. SENER/ BID/ GTZ (Edit.): Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México, México, D.F., Noviembre 2006.
- 📖 Guía de Producción más Limpia para la Elaboración de Biodiesel a Partir de Aceite de Palma Africana. Centro Nacional de Producción Más Limpia de Honduras República de Honduras, 2009.
- 📖 Eugenio E. S. Políticas Gubernamentales y Reconversión Productiva: El Caso de la Palma de Aceite en México SAGARPA. 2008.
- 📖 Castro, P., Coello, J., Castillo, L. *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú*. Perú: Soluciones Prácticas -ITDG. p. 173. (2007).
- 📖 http://www.hielscher.com/es/biodiesel_transesterification_1-01-2013
- 📖 *Fernando C., Luis Ríos, Artículo*. “Producción de Biodiesel de Aceite Crudo de Palma mediante Catálisis Heterogénea” 31 de agosto de 2009.
- 📖 OTTO R., HAZEL V. Análisis del Estado Actual de las Tecnologías de Producción de Biodiesel. Universidad Centroamericana, El Salvador. 2007.