

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL

SANDRA LÓPEZ RAPOSO

SANTIAGO-CHILE

2011

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL

TECHNOLOGIES TO OBTAIN BIODIESEL

SANDRA LÓPEZ RAPOSO

SANTIAGO-CHILE

2011

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniera Agrónoma
Mención: Manejo de Suelos y Aguas

SANDRA LÓPEZ RAPOSO

Profesor Guía	Calificaciones
Sr. Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo, Dr	6,9
Profesores Evaluadores	
Sra. María Teresa Varnero M. Químico Farmacéutico.	6,0
Sr. Manuel Casanova P. Ingeniero Agrónomo, M. Sc	6,2
Colaborador	
Sr. René Carmona C. Ingeniero Forestal, M. Sc	

SANTIAGO-CHILE

2011

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCION	iii
MATERIALES Y MÉTODOS	v
TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL	1
INTRODUCCIÓN	2
I. BIOCOMBUSTIBLES	3
RAZONES PARA IMPULSAR O NO LOS BIOCOMBUSTIBLES	4
BIOCOMBUSTIBLES	5
Tipos de biocombustibles	7
Materias primas	8
Tipo de generación de los biocombustibles	9
Biocombustibles de primera generación	9
Biocombustibles de segunda generación	9
Biocombustibles de tercera generación	10
Situación internacional de los biocombustibles	11
Situación de biocombustibles en Chile	12
Matriz energética	12
II. MATERIAS PRIMAS	16
ACEITES Y GRASAS	17
Composición y propiedades	18
Principales fuentes de aceite en Chile	23
<i>Helyantus annus</i> (Maravilla)	23
<i>Brassica napus</i> (Colza o Raps)	23
Principales fuentes de aceite en el mundo	25
<i>Glycine max</i> (Soya)	25
<i>Brassica napus</i> (Colza o Raps)	27
<i>Jatropha curcas</i> (Jatrofa)	29
<i>Helyantus annus</i> (Girasol)	30

<i>Elaeis guineensis</i> (Palma aceitera o palma africana).....	30
OTRAS FUENTES DE MATERIAS PRIMAS.....	31
Aceites usados.....	31
Grasas animales.....	32
Algas Marinas.....	32
Material Lignocelulósico.....	35
III. BIODIESEL.....	39
BIODIESEL.....	40
Materias primas.....	41
Biodiesel y su forma de obtención.....	42
Ventajas y desventajas del biodiesel.....	43
DIESEL VS BIODIESEL.....	45
Situación mundial de biodiesel.....	49
IV. FORMAS DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	56
FORMAS DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	57
MICROEMULSIÓN.....	57
TRASFORMACIÓN TERMOQUÍMICA.....	58
Pirólisis.....	59
Mecanismos de pirólisis de biomasa.....	61
TRASFORMACIÓN BIOQUÍMICA.....	61
Resumen.....	61
Saponificación y esterificación.....	62
Transesterificación.....	62
Clasificación.....	63
TRANSESTERIFICACIÓN.....	65
Lavado.....	67
Proceso de producción de biodiesel.....	69
Proceso discontinuo.....	70
Proceso continuo.....	71
Proceso de Esterificación.....	72

Proceso en condiciones Supercríticas	73
V. UTILIZACIÓN DE ACEITES EN MOTORES Y CALDERAS	77
MOTORES	78
BIOCOMBUSTIBLES	80
Utilización directa de aceites vegetales.....	80
Dilución del aceite.....	81
Metiléster o biodiesel	82
ADAPTACIONES DEL MOTOR PARA ACEITES Y/O BIODIESEL.....	83
PROBLEMAS EN EL MOTOR POR EL USO DE BIODIESEL.....	84
CONSIDERACIONES FINALES	88
VI. ANEXOS	90
ANEXO I: NORMAS Y REGLAMENTOS DE BIOCOMBUSTIBLES	91
ANEXO II: <i>BOLETÍN N° 4.873-08</i>	92
ANEXO III: PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN BIOCOMBUSTIBLES.....	94
ANEXO IV: CONSORCIOS DE BIOCOMBUSTIBLES.....	95
VII. APÉNDICES	96
APÉNDICE I: DAÑO EN MOTORES POR USO DE BIOCOMBUSTIBLE.....	97
APÉNDICE II :GLOSARIO	99
APÉNDICE III :PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A NIVEL DOMÉSTICO.....	104

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Principales procesos de conversión de la biomasa.	5
Figura 2: Proceso de obtención de los biocombustibles.....	6
Figura 3: Tipo de biocombustible según materia prima.	8
Figura 4: Consumo Bruto Energía Primaria (Tetra calorías).	13
Figura 5 : Proceso de producción de aceite refinado.....	17
Figura 6: Ecuación que representa la síntesis de los triglicéridos.	18
Figura 7: Composición de ácidos grasos en diferentes aceites.	20
Figura 8: Ecuación de la transesterificación.	21
Figura 9: Soya, participación en la producción por países de Sudamérica.	25
Figura 10: Soya, participación por país en la producción mundial.	25
Figura 11: Aceite de soya, participación por países de Sudamérica.	26
Figura 12: Aceite de soya, participación por país a nivel mundial.	26
Figura 13: Raps, participación en la producción por países en Sudamérica.	28
Figura 14: Aceite de Raps, participación en la producción por países en Sudamérica.	28
Figura 15: Producción de biodiesel a partir de microalgas.	35
Figura 16: Balance de la producción de biodiesel.....	41
Figura 17: Aumento de la producción mundial de biodiesel entre 2002 y 2008.....	50
Figura 18: Participación producción de biodiesel en UE.	51
Figura 19: Evolución de la producción de biodiesel en periodo 1999-2007.....	52
Figura 20: Vía indirecta de obtención de biodiesel.	62
Figura 21: Transesterificación.	62
Figura 22: Proceso químico de la transesterificación.....	66
Figura 23: Lavado de biodiesel: bien y mal realizados.	67
Figura 24: Tipos de lavados de biodiesel.	69
Figura 25: Proceso general de transesterificación.	70
Figura 26: Proceso de transesterificación discontinua.	71
Figura 27: Proceso de transesterificación continua.	72
Figura 28: Proceso de Esterificación.	73
Figura 29: Proceso Supercritico.	74
Figura 30: Esquema de encendido por compresión y por chispa.	78
Figura 31: Esquema de inyección directa y de pre cámara.	79
Figura 32: Uso de los aceites vegetales como combustibles.....	81

ÍNDICE CUADROS

Cuadro 1: Fórmulas químicas semidesarrolladas de los principales ácidos grasos que forman los aceites vegetales.	19
Cuadro 2: Pronóstico de aceites para producción de biodiesel.	22
Cuadro 3 : Superficie de siembra y rendimientos de maravilla y raps.	24
Cuadro 4: Estimación de aceites usados en restaurantes de comida rápida.	31
Cuadro 5: Grasas animales disponibles para biodiesel 2010 y proyección a septiembre 2011.	32
Cuadro 6: Producción de aceite de algunos cultivos.	34
Cuadro 7: Comparación de Biodiesel desde aceite microalgas y combustible Diesel.	34
Cuadro 8: Características aceites vegetales y diesel convencional.	42
Cuadro 9: Ventajas y desventajas del uso de biodiesel.	44
Cuadro 10: Propiedades en común de biodiesel y diesel según legislación chilena.	45
Cuadro 11: Propiedades que no son compartidas entre el diesel y el biodiesel, según las normas chilenas.	46
Cuadro 12: Propiedades que no son compartidas entre el diesel y el biodiesel, según las normas chilenas, Biodiesel.	47
Cuadro 13: Inconvenientes del uso de biodiesel.	48
Cuadro 14: Productos de envejecimiento.	49
Cuadro 15: Exportaciones de Argentina de biodiesel en 2007.	52
Cuadro 16: Producción de biodiesel en Brasil.	53
Cuadro 17: Rendimientos de Diesel sintético.	59
Cuadro 18: Ventajas y desventajas de las vías de transesterificación.	64
Cuadro 19: Diferencias entre inyección directa y de pre cámara.	80
Cuadro 20: Comparación de las viscosidades obtenidas en un aceite nuevo versus el diesel (100%).	82
Cuadro 21 Porcentaje de conversión de triglicéridos a monoglicéridos.	86

Dedicada a mis padres,
que me apoyaron en todo momento,
y a mi tata, que me cuida desde el cielo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, a quienes les debo la vida y a quienes amo con todo mi corazón.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi profesor guía, Ian Homer, por todo lo que me ha enseñado y todo el apoyo que me ha dado en el desarrollo de esta memoria.

A mi hermano Claudio y a mi cuñada Paula, por alegrarse con los logros obtenidos a lo largo de la preparación de la memoria.

A mi abuelita Silvia, por ser uno de los pilares más importantes en mi vida.

A mi primo Lester, por su ayuda incondicional.

A mis amigas incondicionales, con quienes compartimos penas y alegrías durante nuestros años de estudio, y que siempre me dieron su apoyo para terminar este proceso, Laura, Caro, Lina, Helen, Cata y Caty.

A mis amigas de la vida, a quienes quiero mucho y parte de lo que hoy soy como persona, se los debo a ellas, Valeria, Paola, Pashy, Daniela y Karina.

A mis sobrinos Pía y Nicolás, por alegrarme la vida.

A mi familia en general, primos y tíos, por darme su amor incondicional.

A mi primo Lester, por ayudarme en el último tramo de este largo camino.

Y finalmente, quiero dar gracias a Dios, por haber puesto en mi camino a toda esta gente maravillosa.

RESUMEN

Actualmente, Chile importa la gran mayoría de su energía, en momentos donde la demanda mundial por petróleo ha aumentado significativamente, al igual que su valor, lo cual hace imprescindible la necesidad de buscar alternativas de energía renovable no convencional, que le permita ser menos dependiente de los países que lo abastecen y poder generar su propia energía.

Una de estas alternativas son los biocombustibles, los cuales tienen como fuente de materia prima la biomasa. Dentro de este tipo de combustibles, el biodiesel es uno de los que presenta mayor potencial.

Buscar información sobre biodiesel resulta un poco complejo, ya que la mayoría de la información disponible está enfocada a biocombustibles en general, donde el tópico biodiesel está incluido dentro del tema principal. Además, la documentación no está dirigida a un lector medio, ya que se encuentra literatura muy técnica. No es fácil encontrar documentación que trate los temas para un nivel, donde por un lado, una persona pueda interiorizarse en el tema, pero también incluya suficiente información para ejecutar algún proyecto.

Por dicha razón, la presente memoria consiste en una recopilación bibliográfica sobre biodiesel, con el objetivo de que sirva de manual práctico para quienes deseen investigar y/o conocer más acerca de este tema.

Para realizar esta memoria, se realizó una recopilación de información a través de comunicación personal con algunas personas relacionadas con el ámbito de los biocombustibles; memorias o tesis chilenas y de otros países que hayan investigado sobre biodiesel; libros y documentos que hablen del tema; manuales internacionales; entre otros.

La presentación de esta memoria se estableció en capítulos, donde el primero describe los biocombustibles en general, luego, sobre las materias primas y en los siguientes capítulos, se abarca el tema del biodiesel, su transformación y utilización.

Es posible darse cuenta a través de la memoria y del desarrollo de ésta, que la Transesterificación es el método más usado a nivel mundial, ya que es el más eficiente en la obtención de biodiesel y el más fácil de hacer de los biocombustibles, puesto que a nivel doméstico es posible hacer biodiesel.

Palabras Clave: Biocombustibles, Biodiesel, Transesterificación

ABSTRACT

Currently, available information focuses to biofuels in general, where the topic of biodiesel is included in the main theme. In addition, documentation is not aimed at an average reader, because it is very technical literature. It is not easy to find documentation covering the topics to a level, where one hand, a person can internalize the subject, but also include enough information to perform a project.

The objective of this work consists in a bibliographic compilation about Bio-diesel.

It was separated in chapters. The first one talk about bio-oils in general. The second chapter, talks about raw material. Next chapters, talk about bio-diesel and its ways of preparation. There is a little chapter about its use in engines and boiler.

The main theme of this monography, are the technologies to obtain Biodiesel. It is possible to see through the development of this work that the transesterification is the most used method worldwide, because is the most efficient to obtain biodiesel and the easiest to make within the bio-oils.

Key words: Bio-oil, bio-diesel, transesterification.

INTRODUCCION

En la actualidad, el tema estratégico crítico, es la seguridad energética, cuyo gran desafío pasa por diversificar las fuentes de energía existentes de la mejor manera posible, ya que la era del petróleo barato se ha acabado y la crisis energética a la cual el mundo se enfrenta es seria (Passero, 2008).

La mayoría de los combustibles que se utilizan en el mundo (gas natural, gas natural comprimido (GNC), gas natural del petróleo (GLP), nafta, gasoil, kerosene), son combustibles fósiles y provienen del petróleo, que es una fuente de energía no renovable, debido a que la velocidad de formación del mismo es muchísimo más lenta que la velocidad a la que se lo utiliza (Romano, 2005).

La sustitución de los combustibles tradicionales, derivados del petróleo, por otros de origen vegetal, cobra importancia en la actualidad por diversas razones fundamentales: provenir de una fuente renovable, ser un instrumento de lucha contra el deterioro ambiental y constituir un factor adicional de desarrollo para la agricultura e industrias derivadas (Campos *et al.*, 2008).

Los motores de combustión interna utilizados en las actividades silvoagropecuarias usan combustibles fósiles; sin embargo, existe un alto potencial para usar otras fuentes de energía, como son los biocombustibles (Homer, 2006).

Las tres fuentes de biocombustibles que presentan mayores perspectivas desde el punto de vista de la facilidad de su obtención corresponden a: bioetanol, biogás y biodiesel (Campos *et al.*, 2008).

El biodiesel es un combustible líquido producido a partir de los aceites vegetales, grasas animales y desechos, siendo el girasol, el raps y la soja las materias primas más utilizadas. Si bien la idea de usar aceites vegetales no es nueva, ya que fue Rudolf Diesel quien usó aceite de maní por el año de 1939 (en el desarrollo del motor que lleva su nombre), es sólo en las últimas décadas en las que se le está dando importancia al uso de este tipo de combustibles (Pedreros, 2008).

Este tipo de biocombustible presenta ventajas y desventajas. Como ventajas se podría decir, entre otras, que es biodegradable, reduce la dependencia por el combustible fósil y reduce emisiones de gases de efecto invernadero. Entre las desventajas, se puede mencionar que tiene menos energía que el diesel convencional, sus propiedades son menos favorables para el flujo frío e incompatibilidad con materiales, entre otras (Acevedo y Rojo, 2006).

Por dichas razones, en los últimos años en Chile, este tipo de biocombustibles ha tenido cada vez mayor relevancia, existiendo múltiples proyectos de investigación, consorcios universidad-empresas e iniciativas comerciales, que requieren mayor y mejor información.

Esta memoria es una revisión bibliográfica, con el fin de confeccionar un manual sobre biodiesel, con fines prácticos y también docentes.

Objetivo General.

Realizar una monografía de biodiesel que sirva de manual práctico para estudio del tema y como guía de soporte para quienes trabajen en este tipo de biocombustible.

Objetivos Específicos

- Describir los biocombustibles según su generación.
- Analizar los aspectos técnicos de la producción de biodiesel.
- Determinar el estado del desarrollo de biodiesel en Chile desde el punto de vista comercial y científico.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente memoria es una monografía con un aspecto práctico, con el fin de que sirva de material de apoyo y estudio tanto para estudiantes como para aquellas personas que trabajan en el rubro y que necesiten una guía práctica y sencilla de leer para resolver dudas.

La monografía está presentada en cinco capítulos. Éstos se indican a continuación, con una pequeña explicación de qué tratan estos capítulos.

El **primer capítulo**, está enfocado en los biocombustibles en general, haciéndose referencia a los tipos, su importancia y situación mundial, entre otros.

El **segundo capítulo**, se enfocó a las materias primas y aspectos prácticos de su preparación, como la composición de ácidos grasos, cultivos a utilizar, etc.

El **tercer capítulo**, abarca el tema del biodiesel como tal, con los aspectos generales y motivaciones que llevan a tener que realizar transformaciones de las materias primas, cuándo sea el caso. También se habla acerca de las ventajas y desventajas del uso de biodiesel.

El **cuarto capítulo**, que es la base de esta monografía, corresponde a una revisión de las diferentes formas de obtención, siendo la principal la “transesterificación”.

El **quinto capítulo**, incluye información sobre la utilización de aceites en motores y calderas.

Por último, se adjuntaron los anexos y apéndices, con información relativa a la situación en Chile relacionada con la legislación actual, como además de un glosario con la terminología usada durante la redacción de la monografía.

La recopilación bibliográfica se realizó a través de las siguientes fuentes:

- Tesis y memorias realizadas sobre biodiesel.
- Investigaciones realizadas en biocombustibles.
- Proyectos comerciales en ejecución en biocombustibles.
- Comunicación personal con agentes que trabajen en el rubro.
- Bibliografía disponible sobre el tema en estudio.
- Manuales disponibles.
- Páginas web institucionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E. y Rojo, F. 2006. Biodiesel. pp 83-98. *In*: Acevedo, E. (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Campos, A.; Muñoz, C. y Rojas, I. 2008. Bioenergía y producción de semillas: prospección técnica de mercado y económica. Boletín INIA n° 180. 124 p.
- Homer, I. 2006. Motores y Biocombustible. pp 149-163. *In*: Acevedo, E. (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Passero, R. 2008. Cereales y Oleoginosas: energía renovable o alimentos para una demanda en aumento. *El Campesino (En-Mar)*. 30-33.
- Pedreros, S. 2008. Viabilidad Técnica y económica de la implementación de una planta de producción de Biodiesel. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 77p.
- Romano, D. 2005. Biodiesel. pp 11-88. *In*: Laborde, M., Romano, S. y Suárez, E. Combustibles alternativos. Ediciones corporativas, Buenos Aires, Argentina. 189 p.

TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL

INTRODUCCIÓN

La biomasa vegetal puede considerarse como una fuente de recursos energéticos renovables y, por tanto, como una alternativa a la producción agroalimentaria tradicional, desde el momento en que la población recibe alimentos suficientes y se realiza con técnicas de cultivo compatibles con el agrosistema considerado (Márquez, 1995).

Para que esta alternativa sea aplicable se necesita, además, que las técnicas utilizadas en el conjunto del proceso, proporcionen balances energéticos con saldo positivo y que los productos derivados sean “equivalentes” a los de procedencia fósil, tanto desde el punto de vista de las características como de los precios del mercado (Márquez, 1995).

La agricultura y la energía han estado siempre estrechamente vinculadas, si bien el carácter y la intensidad de esos vínculos han ido cambiando con el tiempo. La agricultura ha sido siempre una fuente de energía, y la energía es un insumo importante de la producción agrícola moderna. La reciente aparición de los biocombustibles líquidos para el transporte derivados de cultivos agrícolas ha reafirmado los vínculos entre los mercados de productos agrícolas y los de productos energéticos (FAO, 2008).

Se denominan Biocombustibles a los productos generalmente líquidos que se obtienen a partir de la transformación de la biomasa, mediante diferentes procesos y que serían capaces de sustituir a los combustibles tradicionales, la mayoría de ellos derivados del petróleo. Esta “biomasa” es lo que llamamos a la materia derivada de organismos vivos, en especial, aquella obtenida de vegetales tanto terrestres como acuáticos (Pinto, 2006).

Esta memoria es un manual sobre las técnicas de obtención de biodiesel, donde se describe qué son los biocombustibles a nivel general, las materias primas que se necesitan para obtenerlos y sobre biodiesel propiamente tal.

I. BIOCOMBUSTIBLES

RAZONES PARA IMPULSAR O NO LOS BIOCOMBUSTIBLES

Chile es un país que depende fuertemente de la importación de petróleo, el cual actualmente es un recurso más bien escaso y muy costoso, lo que provoca incertidumbre energética. Además, este combustible fósil ha generado, con el paso de los años y su uso indiscriminado, un aumento significativo de gases en la atmósfera lo que ha provocado el llamado “Efecto Invernadero”.

Todo lo anterior, ha provocado que a nivel mundial, y sobre todo en Chile, se genere una preocupación por el medio ambiente y la necesidad de impulsar el desarrollo de fuentes de energías renovables alternativas al petróleo. Estos recursos energéticos renovables, presentan diversas ventajas, pues permiten diversificar la matriz energética nacional, reducen la dependencia del petróleo importado y generan menores emisiones de gases con efecto invernadero (Morales, 2007).

Hoy más que nunca, la crisis energética es un tema de preocupación mundial y la solución no es fácil de obtenerla, muy por el contrario, será una búsqueda que demandará esfuerzo, buena voluntad y acostumbramiento.

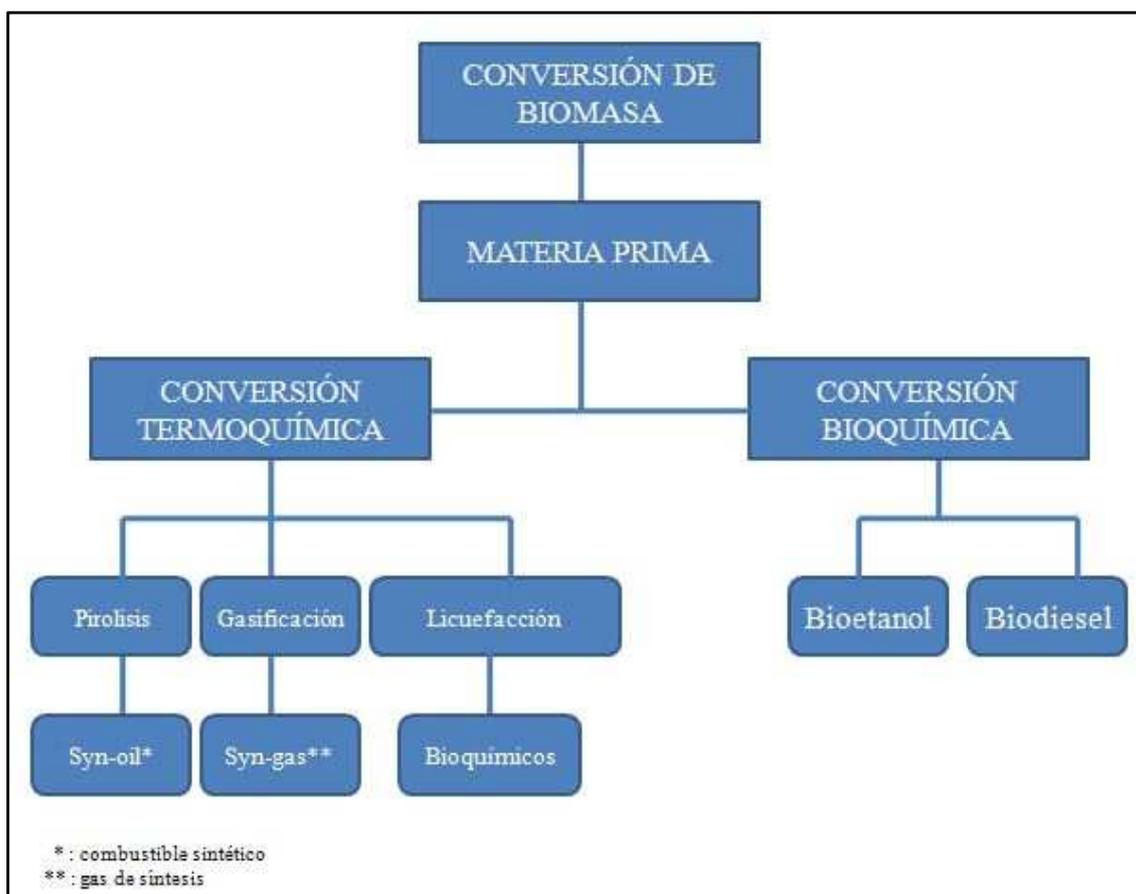
La dependencia energética de Chile, ha provocado una necesidad estratégica, ya que obtenerla a través de métodos no tradicionales podría incidir en un menor gasto de divisas, menos contaminación y creación de nuevas fuentes de trabajo, además de dar independencia al país para continuar su desarrollo (Anónimo, 2006).

El alto costo del petróleo, la tendencia a que siga aumentando o manteniéndose en niveles elevados y la disminución de las reservas ha afectado la seguridad energética mundial. Los países no productores de petróleo se han visto forzados a gastar una parte significativa de sus presupuestos en la importación de combustibles origen fósil. Ésto, sumado a la creciente preocupación por el calentamiento global, causado en gran medida por la liberación de gases provenientes de la quema de combustibles fósiles, ha despertado un gran interés en la utilización de fuentes de energías renovables. Una de estas fuentes la constituyen los “biocombustibles”, producidos a partir de biomasa (IICA, 2010).

En Chile, la oportunidad de producir biocombustible de primera generación se hace muy difícil, ya que no posee superficie agrícola disponible para satisfacer demanda alimentaria y demanda para insumos de biocombustible líquidos. Es por eso que los estudios actuales están apuntando a los biocombustibles de segunda generación, que son aquellos que no provienen de fuentes de alimentación humana, como por ejemplo, las algas marinas. Sin embargo, aún se está en la etapa de investigación y no se tienen resultados que indiquen la potencialidad económica que podría implicar producir este tipo de biocombustibles.

BIOCOMBUSTIBLES

Existen diversas tecnologías para aumentar la eficiencia de conversión de materia orgánica, en este caso biomasa, a combustibles de alto valor comercial. Se han implementado varios métodos para convertir la biomasa mediante procesos termoquímicos para obtener energía calórica, carbón y gas, ó mediante procesos bioquímicos para la obtención de compuestos de bajo peso molecular tales como metanol y etanol, tal como lo muestra la Figura 1(Gallardo, 1998).



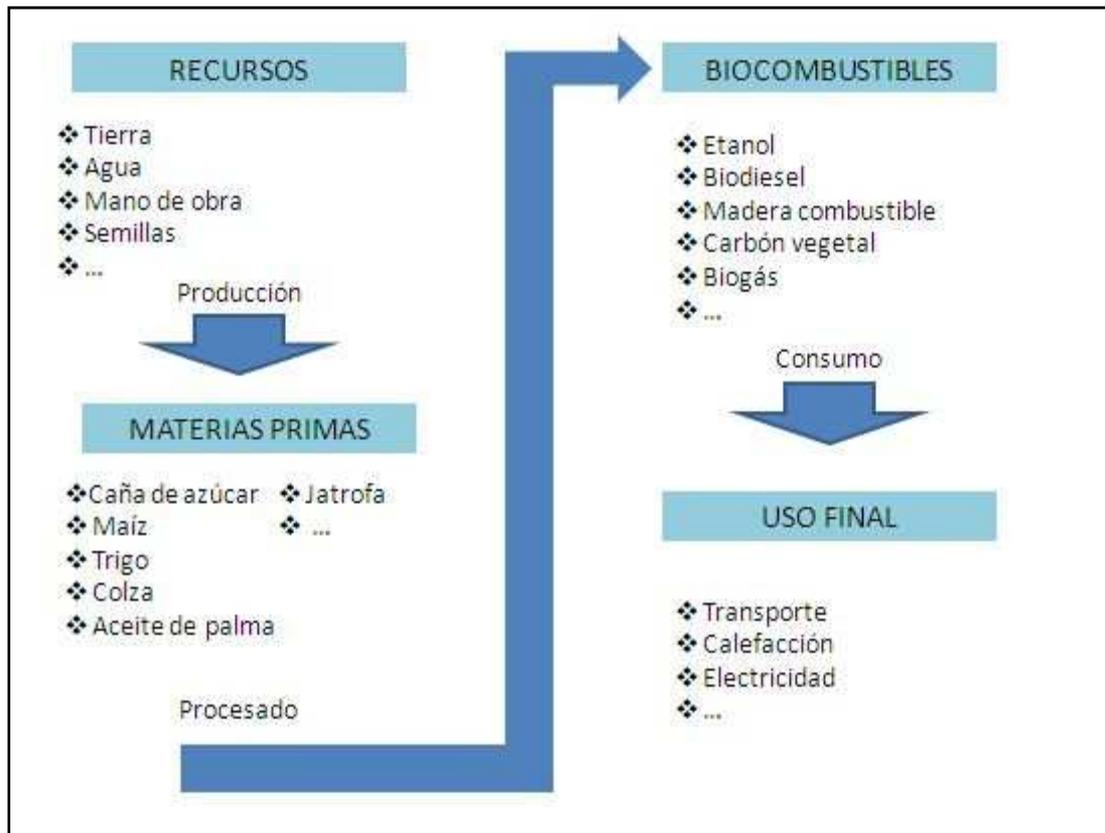
Fuente: Adaptación Demirbas, 2009.

Figura 1: Principales procesos de conversión de la biomasa.

El etanol puede ser producido desde diferentes tipos de recursos renovables: materiales que contienen azúcares (azúcar de remolacha, caña de azúcar, almidón, papas, maíz, etc.), materiales lignocelulósicos como madera, papel de desecho y cultivos energéticos de rápido crecimiento, etc. (Gallardo, 1998). Los biocombustibles son una fuente de energía renovable que pueden obtenerse a partir de cultivos como el maíz y el trigo, entre otros. Su uso en Chile permitiría sustituir los combustibles fósiles, cada día más escasos y de mayor costo y contribuir a disminuir la creciente emisión de gases (Campos *et al*, 2008).

Los biocombustibles son portadores de energía que almacenan la energía derivada de la biomasa y se pueden clasificar según la fuente y el tipo. Se derivan de productos forestales, agrícolas y pesqueros o desechos municipales, así como de subproductos y desechos de la agroindustria alimentaria y los servicios alimentarios. Pueden ser *sólidos*, como la leña, el carbón vegetal y los gránulos de madera; *líquidos*, como el etanol, biodiesel o el aceite de pirolisis, o *gaseosos*, como el biogás (FAO, 2008).

Una manera de entender cómo se obtienen los biocombustibles, se puede ver en la siguiente figura:



Fuente: FAO, 2008

Figura 2: Proceso de obtención de los biocombustibles.

En términos de energía, la combustión ofrece como productos finales CO_2 y H_2O para obtener energía a partir de productos orgánicos. Cuando la fuente orgánica es fósil, como el carbón y el petróleo, a través de la combustión están liberando a la atmósfera carbono (C) adicional al ciclo del Carbono. La utilización permanente de este tipo de energía en los últimos años tuvo como consecuencia el aumento de Carbono en la biósfera y el resultado fue sobrepasar su capacidad tampón (fundamentalmente otorgada por los océanos) por lo que la concentración de CO_2 en la atmosfera aumentó. Hay gases como el CO_2 , vapor de agua y otros, que son permeables a la radiación solar (onda corta), pero no son permeables a la radiación de onda larga que emite la tierra, por lo que hacen que la radiación neta del planeta suba y, siendo la emisión de radiación el único mecanismo de disipación energética del planeta en su conjunto hacia el espacio, su temperatura sube, lo que se conoce como “efecto invernadero” (Acevedo, 2006).

Chile posee limitaciones para producir biocombustibles, dada la escasa superficie cultivable que dispone. Sin embargo, posee ventajas comparativas para producir variedades mejoradas con este propósito y que podrían entrar al mercado de las semillas en países que son grandes productores de estos cultivos, como Argentina y Brasil, países que cuentan con políticas definidas para la sustitución de los combustibles fósiles (Campos *et al*, 2008).

Tipos de biocombustibles

Los biocombustibles se pueden clasificar según la fuente y el tipo. Respecto a la fuente pueden derivar de cultivos agrícolas, productos forestales y pesqueros, así como también de los subproductos y residuos de la agroindustria y explotaciones forestales. Los biocombustibles pueden ser sólidos (leña, carbón vegetal, etc); líquidos (biodiesel, etanol, etc.) y gaseosos (biogás).

FAO (2008) hace una distinción entre biocombustibles primarios, que son aquellos sin elaboración, y los biocombustibles secundarios, que son aquellos elaborados.

Los biocombustibles primarios, son aquellos que se utilizan en forma natural, es decir, tal como fueron recolectados. Éstos son de combustión directa y se usan generalmente para satisfacer la demanda de combustible para cocinar o generar calefacción, entre otros usos. Un ejemplo de estos biocombustibles son la leña, astillas y gránulos de madera.

Los biocombustibles secundarios, son aquellos que son usados en un mayor número de aplicaciones, como transporte y procesos industriales a altas temperaturas. De este tipo de biocombustible hay sólidos (carbón vegetal), líquidos (etanol, biodiesel) y gaseosos (biogás, gas de síntesis, hidrogeno).

Sin embargo, para una fácil comprensión de los tipos de biocombustibles, hay una clasificación más sencilla y que divide en tres los biocombustibles según la forma de obtención y la materia prima. Éstos son:

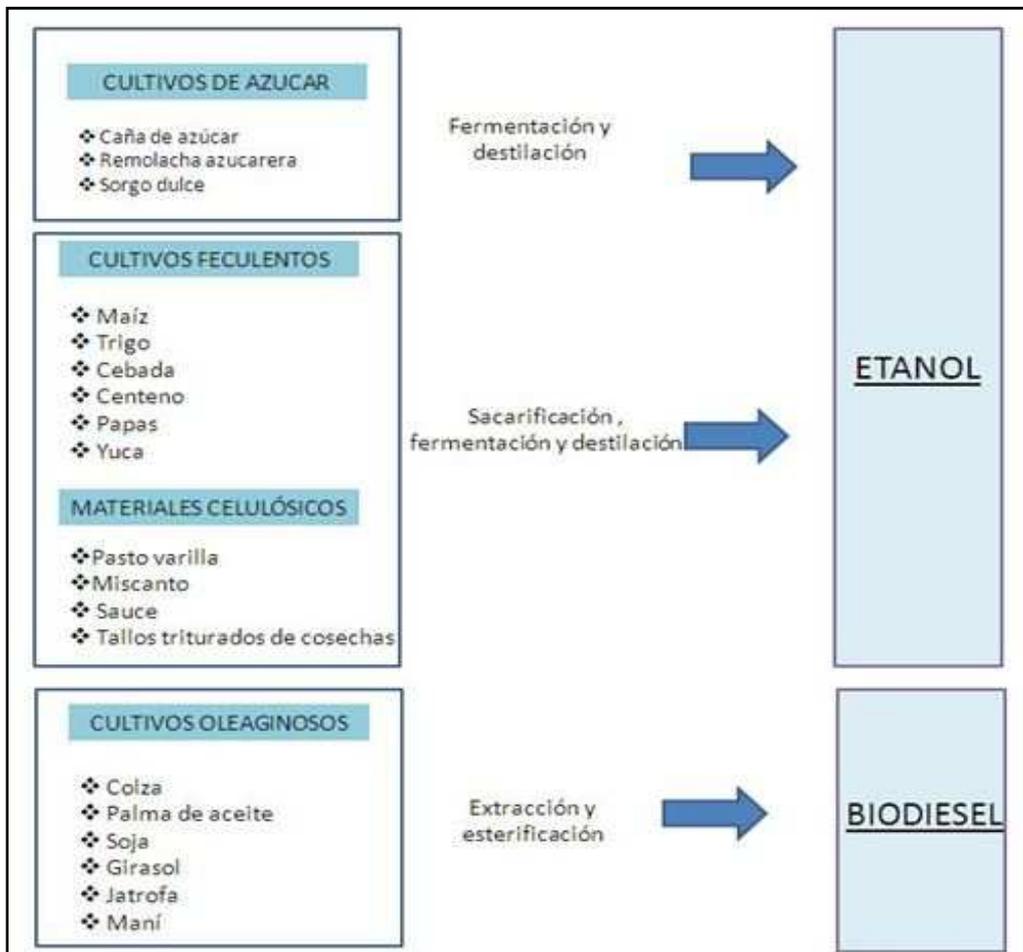
- El **bioetanol**, también llamado etanol de biomasa, se obtiene a partir de maíz, sorgo, caña de azúcar o remolacha. Brasil es el principal productor de Bioetanol (45% de la producción mundial), Estados Unidos representa el 44%, China el 6%, La Unión Europea el 3%, India el 1% y otros países el restante 1%. El ejemplo más visible de cómo este biocombustible puede llegar a ser más que rentable, se encuentra en Brasil, donde, se produce etanol a gran escala a partir de melazas de caña de azúcar o pulpa de mandioca. Este biocombustible se mezcla al 20% con la gasolina que utilizan los automóviles, lo que supone un considerable ahorro en la factura de petróleo, además de una verdadera buena noticia para el medio ambiente, al ser éste un combustible que no emite residuos contaminantes a la atmósfera.
- El **biogás** es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación anaeróbica de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos. Este gas se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos, estufas, secadores, calderas, u otros sistemas de combustión a gas, debidamente adaptados para tal efecto.
- El **biodiesel** es el combustible renovable que tiene el mayor potencial de desarrollo en todo el mundo. Se puede usar puro o mezclado con diesel en cualquier

proporción, en cualquier motor diesel. De hecho, en el año 1900, Rudolf Diesel utilizó aceite de maní en el primer motor diesel. El biodiesel se obtiene a partir de aceites vegetales y/o grasas animales –ej. raps, girasol, palma, soja, sebo, etc.–, permitiendo al campo y la industria aceitera otra posibilidad de comercialización y de diversificación de la producción (Anónimo, 2010a).

Materias primas

Este apartado se verá con más detalle en el capítulo II, aunque a modo general se puede decir que hay una amplia gama de productos que servirían de materia prima para elaborar biocombustibles. Sin embargo, la mayoría proviene de cultivos agrícolas y residuos forestales.

De acuerdo al tipo de materia prima y la forma de transformación, es el tipo de biocombustible que se obtiene. En la Figura 3 se ilustra la conversión de materias primas agrícolas a biocombustibles líquidos.



Fuente: FAO, 2008

Figura 3: Tipo de biocombustible según materia prima.

En términos generales, la producción mundial de etanol deriva principalmente de la caña de azúcar, como es el caso de Brasil, y en EEUU deriva principalmente del maíz. En el caso del Biodiesel, las principales materias primas son el raps en la UE, la soja en

EEUU y Brasil, y los aceites de coco y de palma en países tropicales y subtropicales (FAO, 2008).

Tipo de generación de los biocombustibles

Biocombustibles de primera generación

Son los biocombustibles que provienen de la biomasa, específicamente de cultivos agrícolas, los cuales son destinados a la alimentación humana, y grasas animales. Estos cultivos deben ser ricos en aceite vegetal. La tecnología usada se basa en la conversión bioquímica, la cual consiste en sacar la glicerina de estos productos. El método más utilizado es el de transesterificación de los aceites y grasas, el cual consiste en separar la glicerina con el uso de un alcohol (metanol o etanol) y de un catalizador básico (hidróxido de sodio o potasio) (Cavieres, 2008).

Algunos ejemplos de Biocombustibles de primera generación son:

- Etanol de caña de azúcar
- Etanol de maíz
- Biodiesel de soya
- Biodiesel de aceite de palma

En Chile este tipo de Biocombustible tiene bajísimo potencial, por la escasa superficie que se puede destinar para este propósito, a diferencia de lo que ocurre en otros países, como Brasil, que posee una superficie mayor para la producción de cultivos que sirvan como materia prima de bioetanol y/o biodiesel.

Biocombustibles de segunda generación

La principal diferencia con los biocombustibles de primera generación, es que este tipo de combustibles, no provienen de cultivos destinados a la alimentación humana, sino de otras fuentes, como residuos agroindustriales, gramíneas forrajeras de alta producción de biomasa y algas. Así, una de las críticas hacia los biocombustibles, sobre cambiar alimentos por combustible, queda zanjada.

Estos combustibles se han clasificado según el proceso que se utiliza para su obtención. Así tenemos los bioquímicos, que son producidos por hidrólisis enzimática y fermentación; y los termoquímicos, producidos por pirolisis, gasificación y síntesis de Fischer-Tropsch. Cabe destacar que las tecnologías para transformar biomasa celulósica a biocombustibles en la actualidad sí son existentes, pero no han podido ser aplicadas en producción a gran escala (Monteiro, 2010).

Los principales países que están apostando por estos nuevos biocombustibles son Alemania, Estados Unidos y Suecia, quienes están investigando para su implantación a gran escala.

Según la Agencia EFE, Alemania inauguró en Abril de 2008, la primera planta comercial de biocombustibles de segunda generación ubicada en Freiberg, la cual empleará como materia prima desechos de maderas y plantas. El fabricante, *Choren Industries*, habría anunciado que estaba previsto que la planta produzca cerca de 18 millones de litros de biocombustibles de segunda generación por año (Ganduglia *et al*, 2009).

Algunos ejemplos de Biocombustibles de segunda generación son:

- Etanol lignocelulósico
- Biodiesel de aceite de algas.

Actualmente en Chile se está investigando sobre este tipo de biocombustible, para determinar su potencialidad de producción y su factibilidad técnica y económica.

Según el Ministerio de Energía¹, a pesar de las grandes posibilidades que tiene el país de producir biocombustibles de segunda generación, hay barreras que se deben derribar, como el costo de producción v/s costo de combustibles fósiles. El costo de producción de los biocombustibles es altísimo en comparación a la de los combustibles fósiles, por lo que los empresarios aún no están dispuestos a invertir en este tipo de energía. Existe un número importante de consorcios en el país que se encuentran actualmente estudiando e investigando la potencialidad de estos biocombustibles, pero aún sin resultados convincentes para que las empresas se atrevan a dar este gran paso. Esto ocurre porque no hay proyectos actualmente que demuestren la validez de costos y la performance tecnológicas, ya que involucran altas inversiones. Y finalmente una de las barreras más complejas, es el uso de las materias primas para otros usos no energéticos, lo que impide destinar gran parte de estas fuentes al uso exclusivo de biocombustibles.

El Ministerio de Energía indica que se requiere un marco de política coherente y de largo plazo para la introducción de biocombustibles.

En Enero del 2011, comenzó a circular por las calles un bus del Transantiago a Biodiesel. Esto fue un acuerdo de cooperación entre Petrobras, quien provee el combustible, Scania, quien fabricó el bus y Alsacia, quien es el operador del bus.

La idea es tener este bus transitando por las calles de Santiago por un año e ir cambiando su recorrido a lo largo de este tiempo, para poder evaluarlo en las distintas vías que circula el Transantiago.

Petrobras proveerá el B5, un biodiesel con una mezcla que corresponde a 5% de metiléster y 95% de diesel tipo A1. Esta genera entre 3% y 5% menos de material particulado, hidrocarburos y monóxido de carbono. Además, no emite dióxido de azufre, por lo que resulta menos contaminante (Anónimo, 2010b).

Biocombustibles de tercera generación

Son los biocombustibles producidos a partir de materia prima modificada genéticamente con el fin de facilitar los procesos subsecuentes. Los agentes de conversión también son modificados genéticamente para que el proceso sea más eficiente (Monteiro, 2010).

¹ Comunicación personal, Viviana Ávalos, Ingeniera en Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Chile. Profesional del Ministerio de Energía, división de Energías Renovables No Convencionales. Fono: (56 2) 3656686. Mail: vavalos@minenergia.cl.

Situación internacional de los biocombustibles

El notable desarrollo que actualmente se observa de los biocombustibles a nivel mundial, sobre todo a partir del año 2000, tiene sus orígenes en dos variantes fundamentales, sobre las cuales cada país optó al momento de diseñar una política para su promoción:

- la seguridad energética y no dependencia, donde Brasil y USA son sus genuinos representantes, y
- la sustentabilidad ambiental, donde sus exponentes están en la Unión Europea (UE), principalmente en Alemania y Suecia.

Si bien en un principio, la opción elegida por cada nación para desarrollar esta industria fue privilegiar en forma independiente una de otra variante, el devenir del crecimiento económico mundial y sus crisis asociadas, las han hecho converger. Fenómenos tales como el efecto invernadero y el calentamiento global, junto con el Protocolo de Kyoto, la crisis por el aumento de la demanda energética, y el alza sostenida del precio del crudo, hicieron imposible concebir una estrategia de desarrollo sin considerar la variable de sustentabilidad ambiental, como también la seguridad e independencia energética (MINAGRI, 2007).

La bibliografía muestra claramente una decisión mundial por desarrollar biocombustibles, donde la expansión y el incremento exponencial coinciden con la guerra de Irak y la incertidumbre que se generó respecto de la disponibilidad de este recurso en la cantidad y oportunidad que se pudiera demandar. Más aún, cuando se visualiza una reactivación de la economía mundial y la irrupción de las economías asiáticas. Esta decisión se ve favorecida por el proceso de aceptación acreciente del Protocolo de Kyoto, con su entrada en vigencia, a partir del año 2005 (MINAGRI, 2007).

En cuanto a la situación mundial, se puede concluir que:

- Es una industria en franco desarrollo, tanto por el concepto de seguridad energética como por ser ambientalmente sustentable.
- La producción de biocombustibles (etanol y biodiesel) se concentra en pocos países y aunque son bienes pocos transados internacionalmente, existe un fuerte interés de varias naciones por generar un mercado de exportación, como es el caso de Brasil y Argentina.
- Los organismos internacionales están promoviendo su crecimiento, principalmente, como una alternativa para las naciones en vías de desarrollo. Actualmente, existen más de 35 países que han establecido un marco legal para estos fines y constantemente se incorporan otros.
- Si bien FAO ha promovido su expansión, existe preocupación de su parte, y de otros organismos e instituciones, por la competencia con la alimentación

humana y animal. Es por ello que se está incentivando la Investigación y el Desarrollo (I + D) en la búsqueda de nuevas materias primas, tales como jojoba, ricino, Jatrofa, material lignocelulósico, el aprovechamiento de grasa animal, de aceites reciclados y el cultivo de algas.

- La tecnología actual denominada de Primera Generación, que se caracteriza por el uso de biomasa que compite en parte con la alimentación, está dando pie al desarrollo de la tecnología de segunda generación, que utiliza materia prima lignocelulósica.
- El proceso de I + D de los biocombustibles está muy ligado a su homónimo de la industria automotriz, en lo que se refiere a los nuevos requerimientos de los motores que usaran estos biocombustibles.
- Dado que esta industria es muy incipiente en algunos países, la OMC, no tiene resuelto el tema de las normas de comercio aplicables a ella, lo que permite ciertos espacios de utilización en el ámbito de la sustentabilidad ambiental y desarrollo regional, sobre todo cuando se favorece a sectores mas postergados (MINAGRI, 2007).

Situación de biocombustibles en Chile

Chile tiene una alta dependencia de fuentes de energía no renovables: el 72% de la energía que el país consume se importa, el 98% del petróleo utilizado es importado y no existe certeza del comportamiento futuro de algunas fuentes de suministro energético (Ganduglia *et al*, 2009).

Chile tiene como objetivo dentro de la política energética, tener una energía a precios competitivos, seguridad energética y que esta energía sea amigable con el medio ambiente.

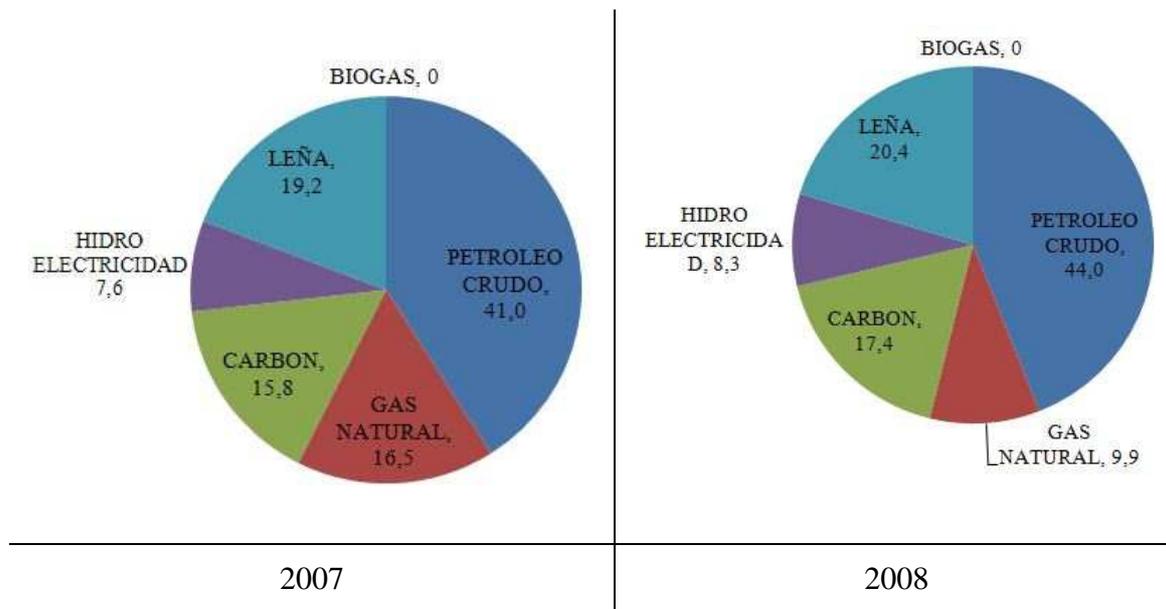
Las alternativas de suplir la demanda de energía de Chile estarían dadas por la posibilidad de importarla en su totalidad; importar una fracción y producir el resto en el país, o producir toda la energía con fuentes o materias primas nacionales.

Sin embargo, un estudio realizado por el Ministerio de Agricultura y que fue publicado en el 2007, obtuvo como conclusión que Chile tiene muy bajo potencial para producir Biocombustibles de primera generación, debido a la escasa superficie que posee el país para cultivar los insumos para producir el biocombustible.

Actualmente se están realizando muchos proyectos de investigación acerca de biocombustibles de segunda generación y su potencialidad en el país.

Matriz energética

La matriz energética de Chile fue abastecida entre un 19% y un 20% en el 2007 y 2008, respectivamente, por energía proveniente de nuestro país (leña y otros) (CNE, 2011).



Fuente: CNE, 2011.

Figura 4: Consumo Bruto Energía Primaria (Tetra calorías).

El hecho que Argentina haya aumentado los impuestos a las exportaciones de gas natural a Chile, trajo como consecuencia el aumento de utilización de energías convencionales en la matriz energética (IICA, 2010).

Tomando en cuenta ambos gráficos, se puede ver que el petróleo es la fuente de energía más utilizada en Chile, y por eso se explica el gran porcentaje de importación de este producto. Es por ello, que surge la necesidad de reemplazar al petróleo por combustibles no fósiles y así evitar que sea dependiente de otros países en ese aspecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E. 2006. Agroenergía, un desafío para Chile. (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Anónimo. 2006. Diversidad de la matriz energética: explorando los caminos de los biocombustibles. Revista Bioplanet. 8(43): 58-60.
- Anónimo, 2010a. Los biocombustibles. Disponible en: http://exterior.pntic.mec.es/pvec0002/e_biocombus.htm. Leído el 25 de Septiembre de 2010.
- Anónimo, 2010b. Bus a biodiesel ayudará a mejorar el aire de Santiago. Diario Las Últimas Noticias. Leído el 27 de Diciembre de 2010.
- Campos, A., Rojas, I. y Muñoz, C. 2008. Bioenergía y producción de semillas: Prospección técnica de mercado y económica. Boletín INIA n° 180. 124 p.
- Cavieres, P. 2008. Biocombustibles de Primera Generación. Revista Electro Industria. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=959&edi=52>. Leído el 23 de Septiembre de 2010.
- Comisión Nacional de Energía. 2011. Balances Energéticos. Disponible en: http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/Balances_Energ.html. Leído el 28 de Octubre de 2010.
- Demirbas, A. 2009. Production of biofuels with special emphasis on biodiesel. pp 45-54. In: Pandey, A (ed). Handbook of plant-based biofuels. Boca Raton, Florida, EEUU. 297 P.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2008. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Parte I: Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades. Roma. 146 p.
- Gallardo, D. 1998. Determinación del contenido lignocelulósico de *Salix viminalis*. para producción de bioenergía. Memoria Ingeniero forestal. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. Chile. 57 p.
- Ganduglia, F., León, G., Gasparini, R., Rodriguez, M., Huarte, G., Estrada, J. y Filgueiras, P. 2009. Manual de biocombustibles. IICA-ARPEL. Costa Rica y Uruguay. 206 p.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2007. Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. San José, Costa Rica. 24 p.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en la Américas: II Biodiesel. San José, Costa Rica. 346 p.
- Márquez, L. 1995. Los biocarburantes: limitaciones y perspectivas. pp. 65-104. In: Sánchez, F. Energías renovables. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. España. 237p

- Ministerio de Agricultura. 2007. Visión internacional de los biocombustibles. *In: Contribución de la política agraria al desarrollo de los biocombustibles en Chile.* MINAGRI y ODEPA. Santiago, Chile. 139 p.
- Monteiro, C. 2010. Situación de los biocombustibles de 2° y 3° generación en América Latina y Caribe. (Ed) Olade e IICA. Brasil. 99 p.
- Morales, P. 2007. Análisis de prefactibilidad económica de la instalación de una planta de producción de biodiesel en Chile. Antumapu, revista de extensión agropecuaria y medio ambiente. Vol 5 (n°1): 7-10.
- Pinto, M. 2006. Bioquímica de la producción de biocombustibles. pp. 47-60. *In: (Ed) Agro energía: un desafío para Chile.* 2006. Series Ciencias Agronómicas n° 11. Santiago, Chile. 176 p.

II. MATERIAS PRIMAS

La materia prima representa el 65-75% del costo total de la producción del biodiesel. El éxito en la industria de biodiesel en Chile depende de la correcta elección de la materia prima. Es necesario escoger materias primas que tengan una adecuada disponibilidad a un buen precio, además de cumplir los objetivos ambientales y de optimización en el funcionamiento del motor. Las propiedades de los biocombustibles están determinadas de manera importante por la materia prima de origen (Rojo y Acevedo, 2006).

Existe una amplia gama de fuentes de materias primas para el biodiesel, como las grasas animales, aceites vegetales que provienen de cultivos anuales, aceites reciclados, obtenidos de restaurantes o en la industria alimenticia.

El otro factor importante es el requerimiento de tierras de cultivo. En este sentido tendría cierta ventaja *Jatrofa Curcas*, que es adaptable a terrenos marginales, por lo que no desplazaría a los cultivos alimenticios (Ganduglia *et al*, 2009).

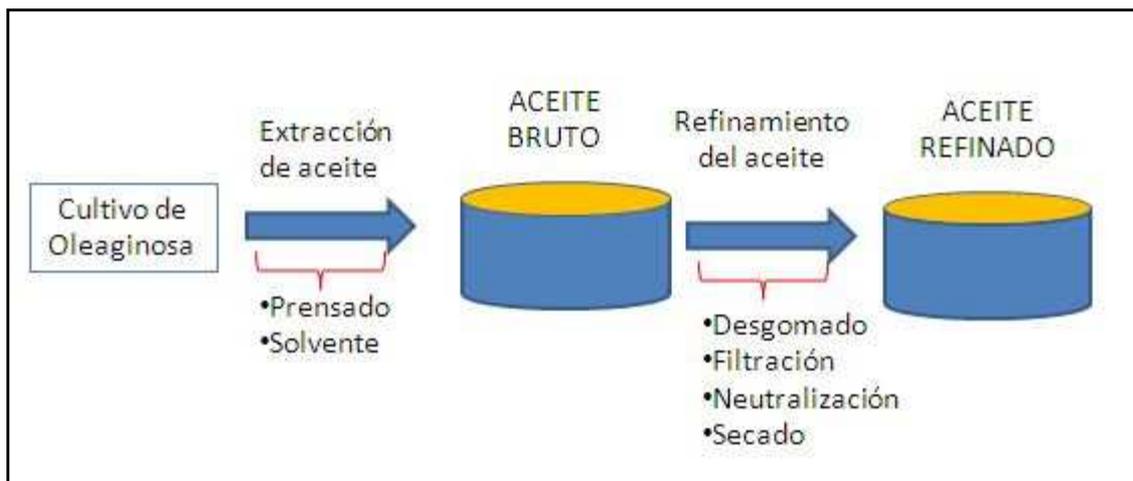
Si bien el biodiesel puede obtenerse de grasa animal y aceites reciclados, la materia prima más utilizada en el mundo son los aceites vegetales. Hay dos etapas que deben pasar necesariamente estos aceites vegetales para convertirse en biodiesel: la primera es la conversión de la materia prima en aceite vegetal; y la segunda, es la transformación de este aceite vegetal en éster (Ganduglia *et al*, 2009).

Estas son las principales materias primas que se utilizan para la elaboración de biodiesel: se consideran como biomasa precursora potencial todos los aceites vegetales, siendo los más importantes el de palma, soya, raps (canola o colza) y maravilla (girasol). Estos cuatro aceites concentran el 81% del mercado mundial (MINAGRI, 2007).

ACEITES Y GRASAS

Las materias primas deben ser procesadas de tal manera que el aceite resultante cumpla con las características determinadas para que el biocombustible cumpla con las especificaciones deseadas. La materia prima debe pasar por varios procesos para obtener aceite refinado y así someterlo al proceso de transesterificación.

La Figura 5 muestra un esquema de este proceso:



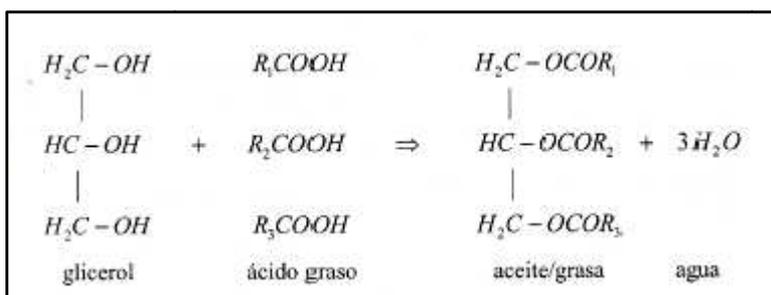
Fuente: Ganduglia *et al*, 2009.

Figura 5 : Proceso de producción de aceite refinado.

Una vez que el aceite ya esté refinado y cumpla con las condiciones de acidez y humedad necesarias (<1% y <0,5%, respectivamente), está listo para empezar el proceso de transformación química de los aceites a ésteres.

Composición y propiedades

Los aceites y grasas son sustancias hidrofóbicas, insolubles en agua, del reino animal o vegetal, que difieren básicamente en el estado de agregación en que se encuentren a temperatura ambiente. Estos lípidos, químicamente son ésteres grasos de glicerol y se pueden sintetizar haciendo reaccionar un mol de glicerol con tres moles de ácidos grasos. También se les denomina triglicéridos (Figura 6).



Fuente: Romano, 2005.

Figura 6: Ecuación que representa la síntesis de los triglicéridos.

En la Figura 6, R_1 , R_2 y R_3 representan cadenas hidrocarbonadas de ácidos grasos, que en la mayoría de los casos varían entre 12 y 18 átomos de carbono. Los R_i ($1 \leq i \leq 3$) pueden ser iguales o distintos entre sí, dependiendo del caso particular de aceite. En general, difieren en la longitud de la cadena y el número de enlaces covalentes dobles presentes (Romano, 2005).

Según Rojo y Acevedo (2006), los triglicéridos están formados por ácidos grasos que pueden ser saturados o insaturados. Un ácido graso saturado (AGS) es aquel que químicamente no puede hidrogenarse, mientras que un ácido graso insaturado puede hidrogenarse, debido a que posee uno o más dobles enlaces. La composición química y algunas de las características del biodiesel dependen de la composición de ácidos grasos en la materia prima, los cuales podrán diferir tanto en la longitud de sus cadenas, como en su grado de insaturación (entre más dobles enlaces tenga un ácido graso, mayor va a ser su grado de insaturación).

En el Cuadro 1 se listan los nombres de los principales ácidos grasos que componen los aceites y las fórmulas químicas correspondientes. La notación x:y se entiende como el número de átomos de carbono que forma la molécula del aceite (x) y el número de insaturaciones (y). En consecuencia, $y=0$ para los AGS.

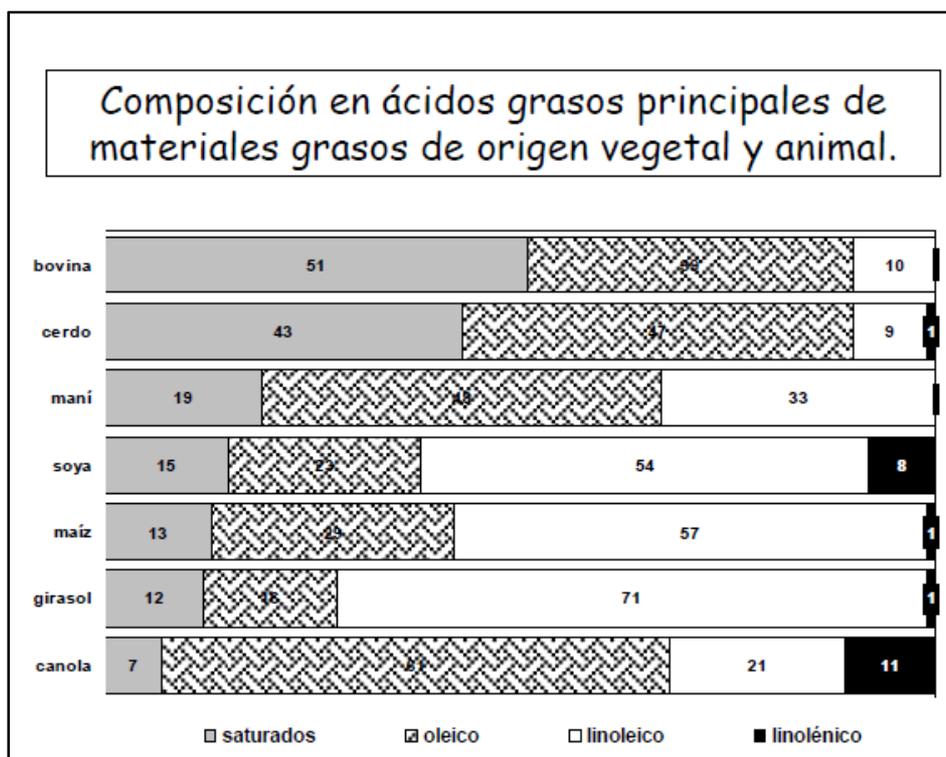
Cuadro 1: Fórmulas químicas semidesarrolladas de los principales ácidos grasos que forman los aceites vegetales.

Nombre del ácido graso	Fórmula química
Láurico (12:0)	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{10} \text{COOH}$
Palmítico (16:0)	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{14} \text{COOH}$
Estearico (18:0)	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{16} \text{COOH}$
Oleico (18:1)	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_7 \text{CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_7 \text{COOH}$
Linoleico (18:2)	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_4 \text{CH}=\text{CH} \text{CH}_2 \text{CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_7 \text{COOH}$
Linolénico (18:3)	$\text{CH}_3 \text{CH}_2 (\text{CH}=\text{CH} \text{CH}_2)_3 (\text{CH}_2)_6 \text{COOH}$
Erúcico (22:1)	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_7 \text{CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_{11} \text{COOH}$
Ricinoleico (18:1)	$\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_5 \text{CHOH} \text{CH}_2 \text{CH}=\text{CH} (\text{CH}_2)_7 \text{COOH}$

Fuente: Romano, 2005.

Cada aceite no está compuesto de un solo ácido graso, sino de un conjunto de ellos, donde suele primar el que le da origen al nombre del aceite, por ejemplo, el aceite palmítico, en el aceite de palma. Por dicha razón, el porcentaje de insaturaciones varía entre cada uno de ellos, haciendo que algunos tengan más factibilidad que otros para ser utilizados como biodiesel, mostrándose en la figura 7 siguiente algunos ejemplos.

Por un lado, existen los derivados de aceites vegetales con un alto contenido de compuestos saturados (bajo Índice de Yodo), que poseen un Numero de Cetano mayor (ver capítulo de utilización en motores), mientras que sus propiedades a bajas temperaturas son peores. Por otro lado, el biodiesel procedente de aceites vegetales con un alto contenido de compuestos insaturados, (alto Índice Yodo), que poseen un menor Numero Cetano, sus propiedades a bajas temperaturas son mejores. Esto lleva a que en el uso práctico, esta característica, así como otras, obliguen a realizar mezclas de aceites para permitir pasar la normativa. Es así que, por ejemplo, un aceite que se pueda conseguir en mayor volumen, pero que tenga una característica no muy adecuada, se puede juntar con otro que tenga esa característica con mejores valores.



Fuente: Grompone, 2011.

Figura 7: Composición de ácidos grasos en diferentes aceites.

La calidad de los aceites definirá las características del biodiesel. Es por eso que están contemplados ciertos aspectos dentro de las normas, las cuales entre los países no difieren mucho, pero coinciden de manera categórica en el diferente valor del índice de yodo que muestra la composición del aceite.

La norma europea estableció un valor de 120 para proteger su industria que utiliza aceite de raps, mientras que en Estados Unidos no se incluyó esta cláusula. Entretanto, en Argentina y Brasil se fijó en 135 con el propósito de incluir al aceite de soya, mientras que en Australia se modificó el método de análisis para incluir el sebo vacuno como materia prima. Esto refleja que los valores no son sólo técnicos sino que también cuentan las políticas nacionales. Las normas, lejos de ser inamovibles, están en continua revisión (Burin, 2010).

Las emisiones de NO_x suelen aumentar al utilizar biodiesel, aunque esto varía dependiendo de la materia prima utilizada. Aquellos producidos a partir de un producto con mayor cantidad de ácidos grasos insaturados producen emisiones significativamente mayores que aquellas provenientes materias primas con un menor grado de insaturación (Rojo y Acevedo, 2006).

El proceso más utilizado para la obtención de biodiesel es la transesterificación, el cual será explicado más adelante (página 62). Sin embargo, es importante destacar que este proceso es afectado por distintos factores, como la calidad del aceite, la presencia de

ácidos grasos libres, concentración y tipo de catálisis, temperatura, tiempo de reacción y la relación molar.

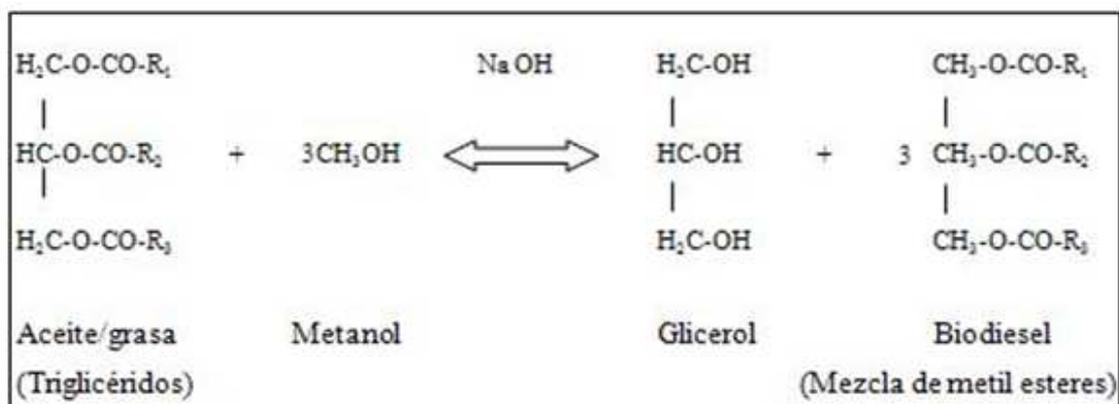
Un **ácido graso** es una molécula orgánica de naturaleza lipídica formada por una larga cadena hidrocarbonada lineal, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo, es decir, es un ácido carboxílico de alta masa molecular.

El contenido de **ácidos grasos libres (AGL)** y **humedad** son parámetros importantísimos para determinar la viabilidad de la transesterificación. Es así que si se utiliza un catalizador básico, es necesario que el aceite usado contenga menos del 3% de AGL, para que la reacción sea completa. Cuanto mayor es la acidez del aceite, menor es la eficiencia de la reacción química. Si se utilizan catalizadores básicos con aceites que contengan un alto contenido de AGL, parte de ellos reaccionan con el catalizador para formar jabón, lo que inhibiría la separación del biodiesel de la glicerina y además llevaría a la formación de emulsiones durante el lavado (Romano, 2005; Carballo, 2009).

La **relación de concentraciones entre el aceite y el alcohol**, es otra variable importante en el proceso de transesterificación. La relación estequiométrica (

Figura 8) indica que 1 mol de aceite reacciona con 3 moles de metanol y se obtienen 3 moles de ésteres ácidos y 1 mol de glicerol. Romano (2005) explica que dado que es un proceso de equilibrio, la presencia de exceso de alcohol en los reactivos desplazará el equilibrio hacia la derecha (Principio de Le Chatelier), obteniéndose mayor cantidad de productos.

Aunque una alta relación molar alcohol/aceite no afecta las propiedades del metil éster, si puede interferir en la separación entre la glicerina y el biodiesel, dado que aumenta la solubilidad de la primera en el último (Romano, 2005).



Fuente: Romano, 2005.

Figura 8: Ecuación de la transesterificación.

La transesterificación puede ser llevada a cabo a distintas **temperaturas**. Esto quiere decir que mientras mayor es la temperatura, mayor es la conversión, para el mismo tiempo de reacción. Las temperaturas generalmente usadas para este proceso, son menores a 65°C.

En cuanto a los **catalizadores**, en el capítulo III hay una extensa explicación sobre su uso y sus características.

Los **alcoholes** que se puede utilizar para la producción de biodiesel son los de cadena corta. Entre ellos metanol (CH₃OH), etanol (C₂H₅OH), propanol (C₄H₈O), butanol (C₄H₁₀O) y alcohol amílico (C₅H₁₁OH). El metanol y el etanol son los más usados debido fundamentalmente al bajo costo y a sus propiedades. El metanol se elige sobre el etanol, a pesar de su toxicidad, debido a ventajas técnicas durante el proceso (Romano, 2005).

El etanol, denominado también como alcohol etílico, es un compuesto cuyo peso molecular es 46,07 y densidad de 0.80. Es un líquido incoloro, muy volátil, fácilmente inflamable, polar y, por lo tanto, muy soluble en agua, hierve a 78 °C y se congela a -112 °C. El etanol tiene una serie de cualidades que lo hacen más conveniente que el metanol para ser usado en motores de combustión. A diferencia del metanol, el etanol es un líquido no tóxico, no contaminante, relativamente barato y fácil de obtener. Su combustión genera CO₂ y H₂O, no deja residuos contaminantes (Pinto, 2006).

Las materias primas utilizadas para producir biodiesel son aceites vegetales o grasas animales y alcoholes de cadena corta. Los aceites más ampliamente utilizados son los de colza (fundamentalmente en países de la Unión Europea), soya y girasol, aunque también se emplean, entre otros, los aceites de maní, palma, lino, aceites comestibles usados o grasas animales (Romano, 2005)

En el Cuadro 2 se puede ver el pronóstico de los principales aceites usados para producción de biodiesel (en 1.000 toneladas métricas):

Cuadro 2: Pronóstico de aceites para producción de biodiesel.

REGIONES	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Unión Europea	375	475	875	1375	2000	3200	4860	5440	5970	6500	6750	7000
Colza	350	450	800	1200	1700	2500	3200	3350	3600	3850	3850	3850
Palma			50	100	200	500	1000	1200	1300	1400	1500	1600
Soya				25	50	100	500	700	850	1000	1150	1300
Otros	25	25	25	50	50	100	160	190	220	250	250	250
E.E.U.U	10	20	40	85	125	250	1155	1400	1700	2000	2300	2600
Colza							250	300	300	300	300	300
Palma							75	100	150	200	250	300
Soya	5	15	35	75	115	225	750	900	1100	1300	1500	1700
Otros	5	5	5	10	10	25	80	100	150	200	250	300
Brasil				10	15	45	400	550	650	750	825	900
Palma							50	75	100	135	150	165
Soya				5	5	25	300	400	450	500	550	600
Otros				5	10	20	50	75	100	115	125	135
Otros Países				25	50	100	425	600	775	900	1000	1100
Colza							25	50	75	100	100	100
Palma				10	20	50	300	400	500	550	600	650
Soya				5	10	20	50	75	100	125	150	175
Otros				10	20	30	50	75	100	125	150	175
Total	385	495	915	1495	2190	3485	6690	7840	8895	9950	10875	11600
Colza	350	450	800	1200	1700	2500	3475	3700	3975	4250	4250	4250
Palma	0	0	50	110	220	550	1425	1775	2050	2285	2500	2715
Soya	5	15	35	110	180	260	1450	1925	2300	2725	3350	3775
Otros	30	30	30	75	90	175	340	440	570	690	775	860

Fuente: Ganduglia *et al*, 2009.

Principales fuentes de aceite en Chile

***Helyantus annus* (Maravilla)**

En Chile, su cultivo se localiza principalmente en los suelos regados de la zona central, específicamente entre la RM y la VIII región. En la década del '90 la superficie sembrada decayó drásticamente debido a la competencia con la maravilla importada desde Bolivia y Argentina. En los últimos años, se generó un repunte de la superficie sembrada, gracias a los semilleros para la producción de híbridos. Los manejos realizados actualmente por las empresas semilleras difieren bastante de aquellos que se realizan para el cultivo destinado a producción de aceite, lo que complica la obtención de los coeficientes técnicos apropiados (USM *et al*, 2007).

***Brassica napus* (Colza o Raps)**

En Chile, desde la década del 50, cuando fue introducido en el país, ha mostrado un crecimiento lento en la superficie de siembra. En 1989 logró su máximo con poco más de 60.000 ha. Durante la temporada 2005/06 se sembraron cerca de 16.000 ha de raps, la cual fue destinada básicamente a fabricación de alimentos para salmones y el sector pecuario (USM *et al*, 2007).

El raps en Chile se cultiva desde la VII a la X regiones, especialmente en el área agroecológica del valle central y precordillera andina, sobre andisoles o trumaos, con un rendimiento promedio de 35 qq ha⁻¹ con un rango de variación de entre 20 y 50 qq ha⁻¹. (USM *et al*, 2007).

El Cuadro 3 muestra la superficie sembrada, toneladas y rendimiento de maravilla y de raps.

Como se puede ver en el Cuadro, el raps es mejor candidato como materia prima de biodiesel que la maravilla, ya que su superficie sembrada es mayor, y por lo mismo su rendimiento.

Cuadro 3 : Superficie de siembra y rendimientos de maravilla y raps.

Superficie sembrada (ha)

Cultivo	Periodo	'79-2000	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11
Maravilla		10.960	1.800	1.530	1.860	2.200	1.780	2.660	3.548	3.610	4.356	3.053	2.652
Raps		26.648	22.800	750	5.350	6.060	12.130	13.520	11.490	17.250	25.135	10.983	18.568
TOTAL		37.607	24.600	2.280	7.210	8.260	13.910	16.180	15.038	20.860	29.491	14.036	21.220

Toneladas

Cultivo	Periodo	'79-2000	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11
Maravilla		19.761	3.131	2.690	2.613	3.218	2.793	5.284	7.451	7.607	10.007	7.972	3.373
Raps		50.538	67.371	2.016	19.421	22.111	41.225	47.151	43.399	66.590	78.501	43.934	71.466
TOTAL		70.298	70.502	4.705	22.034	25.329	44.017	52.435	50.850	74.197	88.508	51.905	74.839

Quintales métricos por hectárea (qqm)

Cultivo	Periodo	'79-2000	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11
Maravilla		17,5	17,4	17,6	14,1	14,6	15,7	19,9	21,0	21,1	23,0	26,1	12,7
Raps		18,9	29,5	26,9	36,3	36,5	34,0	34,9	37,8	38,6	31,2	40,0	38,5
TOTAL		36	47	44	50	51	50	55	59	60	54	66	51

Fuente: ODEPA, 2011a

Principales fuentes de aceite en el mundo

Glycine max (Soya)

- Características: La soya se originó en Asia hace aproximadamente 5000 años. Es un cultivo anual, cuya planta alcanza generalmente una altura de 80 cm y su ciclo vegetativo oscila entre tres a siete meses. La semilla de soya se produce en vainas de 4 a 6 cm de longitud y cada una de 3 a 4 granos de soya. La soya se desarrolla óptimamente en regiones cálidas y tropicales. La soya se adapta a una gran variedad de latitudes que van de 0 a 38 grados y los mayores rendimientos en la cosecha se obtienen a menos de 1000 metros de altura. También se adapta a una gran variedad de suelos, excepto los arenosos. No presenta altos requerimientos de suelos ricos en nutrientes. La soya, al ser una leguminosa permite fijar nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con microorganismos. Es sensible al anegamiento. Sin embargo, moderadamente sensible a la salinidad del suelo. Sus semillas contienen un elevado porcentaje de proteínas que la constituyen en una de las fuentes proteicas más ricas y más baratas que existen. Es una de las oleaginosas de mayor importancia en el mundo. En los últimos años se ha incrementado el uso del aceite de soya para la producción de biodiesel.
- Contenido de aceite: 18-20%
- Eficiencia de la conversión a biocombustible (L Ton⁻¹): 205
- Subproductos: harina de soya (producción animal) y glicerina
- Rendimiento biodiesel (L ha⁻¹): 465

En términos de producción, la soya en Latinoamérica tiene dos grandes representantes, Argentina y Brasil, países que destacan en su nivel de producción. En cuanto a la producción mundial, EE.UU lidera la producción de esta oleaginosa. Sin embargo, Argentina y Brasil lo siguen con gran porcentaje de participación en la producción. En la Figura 9 y la Figura 10 muestra la participación de algunos países de Sudamérica y la participación a nivel mundial en la producción de soya, respectivamente.

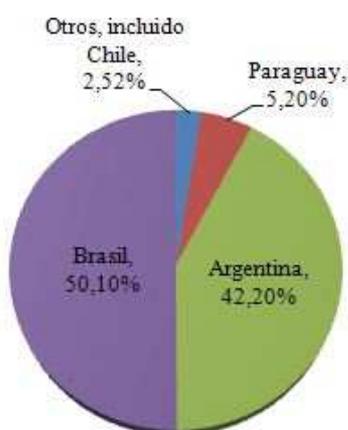


Figura 9: Soya, participación en la producción por países de Sudamérica.

Fuente: Ganduglia *et al*, 2009.



Figura 10: Soya, participación por país en la producción mundial.

Fuente: MINAGRI, 2007.

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores, Argentina y Brasil son potenciales proveedores de soya a nivel mundial, y por lo tanto de aceite, para la producción de biodiesel. Según el estudio del MINAGRI (2007), si no se adopta una política de seguridad energética que resguarde los intereses nacionales, es probable que estas naciones busquen ingresar al mercado chileno.

En cuanto a la producción de aceite de soya, se puede ver que según datos de la temporada 2005/06, EE.UU fue uno de los principales productores de aceite de soya, seguido por China y luego Argentina y Brasil. Sin embargo, en términos de exportación de aceite de soya, según datos de la temporada 2005/06, Argentina es el principal proveedor de este producto, con 5,1 millones de toneladas (96,2% de su producción), el cual representó más de un 50% del transado mundialmente. Le sigue Brasil, con 2,6 millones de toneladas exportadas (46,5% de su producción) y que representó el 27% del transado mundialmente.

Hay estudios que proyectan la producción mundial de aceite de soya para la temporada 2020/21 a una cifra de 48,4 millones de toneladas, es decir, se incrementaría en un 42% respecto de la temporada 2005/06, que fue de 34,1 millones de toneladas. En cuanto a los países productores, éstos se mantendrían, pero variaría su participación porcentual.

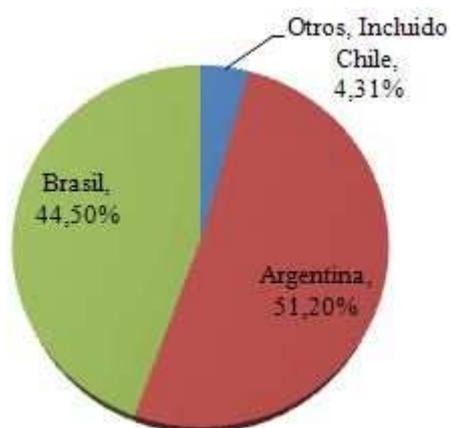


Figura 11: Aceite de soya, participación por países de Sudamérica.

Fuente: Ganduglia *et al*, 2009.

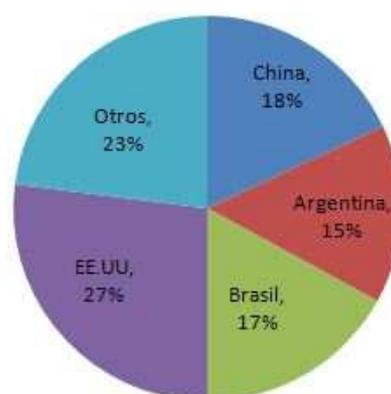


Figura 12: Aceite de soya, participación por país a nivel mundial.

Fuente: MINAGRI, 2007.

El uso de la soya como materia prima del biodiesel tiene ventajas muy importantes que hacen que sea una de las opciones más probables de uso. Algunas de ellas son: desde el punto de vista agronómico, es una planta que se adapta a distintos ambientes agronómicos y su grano contiene entre 38% y 42% de contenido proteico, altamente valorado y consumido en la alimentación animal y humana. En este sentido, la producción de harina de soja resultante de la extracción del aceite del grano aporta decisivamente a la rentabilidad de los proyectos de biodiesel. Además, al ser el biodiesel un co-producto de la producción de harina de soja, no se afecta la cadena alimentaria de la región, entre otras (Ganduglia *et al*, 2009).

A pesar de lo mencionado anteriormente, el uso de la Soya también presenta ciertas desventajas, como el bajo contenido de aceite y rendimiento potencial en litros por hectárea de biodiesel, lo que hace que su uso sea una alternativa menos eficiente si se compara con la mayoría de las oleaginosas y la calidad química del aceite de soya, que se caracteriza por tener una baja proporción de ácidos grasos monoinsaturados (23.5%) y una alta proporción de ácidos grasos poli-insaturados (60.5%), da como resultado un biodiesel “aceptable”, pero que no es óptimo en comparación con el biodiesel obtenido de otras materias primas, como el aceite de colza, girasol, entre otros (Ganduglia *et al*, 2009).

***Brassica napus* (Colza o Raps)**

- Características: Se ha expandido con el pasar del tiempo desde India hasta Europa, ya que es de las pocas especies oleaginosas aptas para ser cultivada en zonas templadas y frías. Es una planta anual que alcanza de 0,3 a 1 metro de altura, las hojas tienen de 5 a 40 cm, la floración se produce a principios de primavera con flores amarillas, el fruto es una silicua de 5 a 7 cm con varias semillas de 1,5 a 2 mm de diámetro.
- Contenido de aceite: 40-50%
- Eficiencia de la conversión a biocombustible (L ton⁻¹): 465
- Subproductos: Torta de aceite de semilla de colza y glicerina, como subproducto del biodiesel. También tiene la opción de producir miel de colza.
- Rendimiento biodiesel (L ha⁻¹): 732

La colza o raps constituye un cultivo marginal en la estructura productiva actual de granos y oleaginosas en Sudamérica. El área cultivada con raps en la temporada 2006/07 representó alrededor de 125.000 hectáreas, con una producción agrícola del orden de las 195.000 toneladas y de aceite de alrededor de 64.000 toneladas. La producción de grano y aceite de raps se concentra en los países de la Región Sur, siendo Brasil, Paraguay y Chile los principales productores. El rendimiento agrícola promedio de la región se encuentra por debajo de la media mundial, aunque cabe señalar el rendimiento medio obtenido por Chile, que se encuentra entre los más altos del mundo (Figura 13).

En cuanto al aceite de raps, Chile también tiene gran participación en su producción, como se aprecia en el Figura 14.

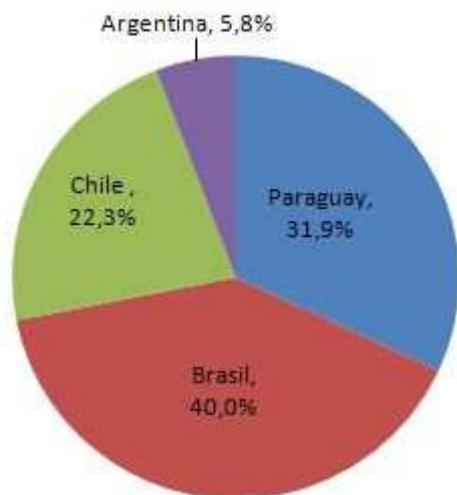


Figura 13: Raps, participación en la producción por países en Sudamérica.

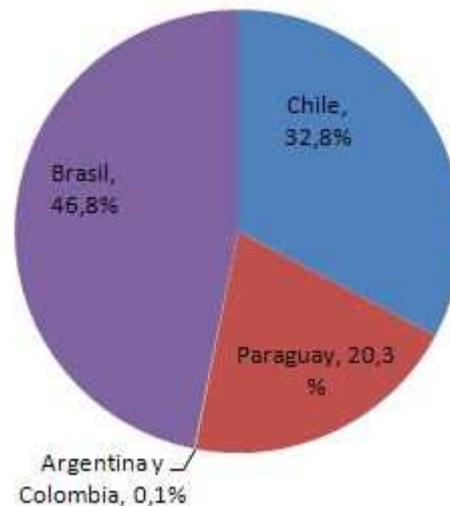


Figura 14: Aceite de Raps, participación en la producción por países en Sudamérica.

Fuente: Ganduglia *et al*, 2009.

Fuente: Ganduglia *et al*, 2009.

En el caso del raps, hay países con gran participación a nivel regional y mundial en su producción, pero no son grandes exportadores. Por ejemplo, en la temporada 2005/06, la UE aportó con un 35% de la producción mundial, pero participó con sólo el 7% de las exportaciones. En cambio Canadá, aportó sólo con un 9% de la producción mundial de raps, pero aportó casi con el 80% de las exportaciones (MINAGRI, 2007).

En Chile, el raps constituye la oleaginosa de mayor disponibilidad inmediata para la producción de biodiesel. Además, la producción chilena de raps cuenta con algunos factores que la sitúan por encima de otros cultivos en términos de competitividad: material genético adecuado y adaptado a las distintas zonas de cultivo; altos rendimientos por hectárea; especialización de los agricultores en el cultivo; agroindustrias funcionando en las áreas de cultivo; relación contractual de las empresas con los productores y poder de compra de los productos y subproductos; e investigación asociada desde hace años respecto de la colza-canola como materia prima para biodiesel. Chile cuenta con una superficie máxima disponible para la producción de raps de 235.000 hectáreas, que generaría una producción de biodiesel suficiente para cumplir un eventual requerimiento de sustitución del 5% de gasoil por biodiesel. A través de este cultivo sería posible dinamizar la agricultura de las regiones VII, IX y X (Ganduglia *et al*, 2009).

El raps como fuente de materia prima, es una de las opciones más prometedoras y valorada, por lo menos en la región Sur, teniendo como ventaja su adaptabilidad a una gran diversidad de condiciones de suelos y de clima; el alto potencial de superficie con aptitud para su cultivo en varios países de la región; su alto contenido de aceite en grano (40-50%) y rendimiento potencial de biodiesel por hectárea, superior al de otras oleaginosas de ciclo anual, entre ellas la soja; y la elevada calidad química de su aceite,

la que se debe al alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados, lo que permite obtener un biodiesel de calidad óptima, y el bajo contenido de ácidos grasos saturados, que genera un biodiesel de mejor desempeño en climas fríos en comparación a la soya o el girasol, y poliinsaturados, lo que determina una menor tendencia a la oxidación y polimerización, los que podrían determinar la formación de ácidos corrosivos, entre otras (Ganduglia *et al*, 2009).

A pesar de ser una fuente de materia prima con varias ventajas desde el punto de vista de uso, esta oleaginosa ha tenido que enfrentar ciertas restricciones que han limitado su desarrollo en la región, las cuales están relacionadas en primer lugar con la tecnología a usar, ya que hay escasa información y conocimiento sobre el manejo del cultivo, comportamiento y fertilización de cultivares, es decir, que la inversión e investigación del raps en la región Sur ha estado limitada en lo que respecta al desarrollo de tecnologías de manejo adecuadas a las condiciones edafoclimáticas de cada región de cultivo (Ganduglia *et al*, 2009).

***Jatropha curcas* (Jatrofa)**

- Características: Originaria de México y Centro América. Oleaginosa perenne de porte arbustivo que crece más de dos o tres metros. Cada planta produce, a partir del primer año, alrededor de cuatro a cinco kilos de semilla, la cual tiene un rendimiento industrial de 38% aprox. La Jatrofa posee un alto porcentaje de aceite en sus semillas. Otro factor que resulta atractivo de este cultivo es que no requiere de mucha mano de obra y cuidados una vez establecido, ya que es un vegetal muy rústico y con bajos requerimientos en cuanto a abono y control de plagas y enfermedades. En Chile, se ha pensado como alternativa auspiciosa, por su adaptación a condiciones de semiaridez y por la posibilidad de ser un cultivo interesante para el Norte Chico.
- Contenido de aceite en la semilla: 28-39%
- Subproductos: La pulpa de la fruta, la cáscara de la semilla y la torta resultante de la extracción del aceite (que contiene 56% de proteínas),
- Rendimiento biodiesel ($L\ ha^{-1}$): 450-2.290

El aceite de Jatrofa puede ser transformado en biodiesel y también ser utilizado directamente como combustible en lámparas y motores de combustión. No es recomendable el uso directo del aceite obtenido del cultivo, por su mayor viscosidad con relación al diesel y menor tiempo de iniciación de la combustión (Carballo, 2009).

El cultivo de la Jatrofa presenta tolerancia a suelos pobres, rápido crecimiento en condiciones de baja fertilidad, resistencia a la sequía y fácil propagación. Además, muestra baja susceptibilidad a enfermedades y plagas. Todas estas razones hacen pensar que en Chile se podría visualizar a la Jatrofa como fuente de materia prima de aceite, y cultivarla en el norte y centro norte de nuestro país, por su gran capacidad de adaptarse a condiciones de semiaridez que presentan estas zonas (Contreras *et al*, 2009).

Según Ganduglia *et al* (2009), el elevado interés en el uso de la Jatrofa como materia prima, se debe a varias ventajas que le han atribuido algunos autores. Algunas de ellas son: sus semillas al ser tóxicas, el aceite que se obtiene del cultivo no es comestible, por

lo que no es cultivo con el que se produzca competencia con el uso alimenticio; se ha considerado como una especie recuperadora de suelos, lo que la convierte en un cultivo alternativo de reforestación de zonas erosionadas o con riesgo de desertificación; y la química del aceite, aunque no es óptima, supera a la de las otras oleaginosas como la soja, el girasol y el cártamo, entre otros (posee un 40% de ácidos grasos monoinsaturados).

Existen un sin número de cultivos como fuentes de aceite vegetal, pero por motivos de elaboración del manual, se nombrarán solo algunas de ellas.

***Helyantus annuus* (Girasol)**

Originario de Norte América, pero se adapta muy bien a diferentes climas. El girasol se utiliza principalmente para la producción de aceite. El ciclo promedio del girasol es 100-150 días y la duración de la floración es de 7-10 días. El girasol es considerado de alta calidad por presentar un bajo porcentaje de ácidos grasos saturados y un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados.

El girasol tiene hasta un 58% de aceite en su fruto. Es el tercer complejo oleaginoso más importante de Sudamérica. Argentina es uno de los grandes productores de esta oleaginosa, es el tercer productor mundial de semilla de girasol y es el primer exportador mundial de aceite de girasol.

En Chile, este cultivo se localiza preferentemente en los suelos regados de la zona central (RM Y VIII Región). De las 90 en adelante, se produce una drástica caída en la superficie sembrada en el país de maravilla, ya que se produce una fuerte competencia de mezclas de aceites importados de Bolivia y Argentina. Esta situación ha cambiado en los últimos años, puesto que ha habido un repunte de la superficie sembrada particularmente de semilleros para la producción de híbridos.

***Elaeis guineensis* (Palma aceitera o palma africana)**

Es una palmera tropical que crece en climas cálidos en la franja ecuatorial de la tierra y puede llegar a crecer hasta 8,3 -20 metros de altura. El aceite se obtiene de dos fuentes: del fruto (aceite de palma) y de la almendra (aceite de almendra/alpiste). Ambos tienen propiedades físicas y químicas diferentes. Su demanda ha aumentado significativamente ya que se puede emplear como materia prima para la producción de biodiesel a buen costo y rendimiento.

Entre las ventajas de su uso se puede mencionar que es una de las oleaginosas perennes de mayor productividad y rendimiento por aceite por unidad de superficie, superando en 5 a 7 veces a oleaginosas de ciclo corto y que se trata de un cultivo intensivo en mano de obra, lo que puede generar un alto impacto en la generación de empleos y potencial inclusión social (Ganduglia *et al*, 2009).

OTRAS FUENTES DE MATERIAS PRIMAS

En la búsqueda de encontrar alternativas a los combustibles fósiles, la primera opción para sustituirlos es la de cambiar la materia prima, es decir, en vez de petróleo, usar biomasa. Sin embargo, estas fuentes de materias primas, los llamados “biocombustibles de primera generación”, entraron a competir con la demanda de alimentos y el cuestionamiento sobre si existe en Chile superficie agrícola suficiente para utilizarlas como aéreas de producción de semillas con el fin de obtener aceite vegetal y, además, para producción de semillas y cultivos para consumo humano. El estudio realizado por el Ministerio de Agricultura en el 2007 demostró que este tipo de biocombustibles en Chile no son posibles, ya que el país posee una superficie agrícola disponible insuficiente para cultivar estas fuentes de materias primas sin ir en desmedro de los cultivos para alimentación humana.

Además, es posible la utilización de aceites usados, como también nuevas alternativas que han surgido que podrían ser válidas en el país, como el uso de material lignocelulósico y algas marinas.

Aceites usados

Los aceites usados, son una alternativa bastante importante a la hora de decidir las materias primas a utilizar, ya que en sí, es una materia prima que se puede considerar un desecho, que es altamente contaminante de los cursos de agua, y que se podrá obtener a buen precio. Existen muchas fuentes para obtener estas materias primas, ya sean domiciliarios, mediante campañas de reciclaje, restaurantes, cadenas de comida (cuyas estimaciones se muestran en el Cuadro 4), como en industrial de frituras.

Cuadro 4: Estimación de aceites usados en restaurantes de comida rápida.

Cadena	Vol. Aceite(L)	Locales	Total est.(L/Semana)
Burger Inn	120	9	1.080
Burger King	125	18	2.250
Doggi's	150	17	2.550
Kentucky FC	200	23	4.600
Lomitón	85	18	1.530
Mc Donalds	220	43	9.460
Mailing	110	8	880
			22.350

Fuente: Pedreros, 2008.

En estos casos hay que considerar que las materias primas son muy variadas, por dicha razón hay que tener un buen sistema de control de calidad, como la realización de filtrajes, eliminación de agua, y, probablemente sea necesario realizar una esterificación previa. Aunque muchos estudios económicos contemplan esta materia prima como

gratuita, considerando que muchas empresas pagan para que les retiren estos aceites, a medida que aumente la demanda, estos subirán de valor (hoy en día muchas empresas los venden a aproximadamente el 8% del valor del aceite nuevo).

Grasas animales

De igual forma que los aceites usados, las grasas de animales también son una buena alternativa de materias primas, ya sean de mataderos o bien desechos de asadores (grasas que caen de los pollos al ser asados), como de otras industrias.

El Cuadro 5 muestra las grasas animales disponibles para producción de biodiesel en el año 2010 y la proyección a Septiembre de 2011.

Cuadro 5: Grasas animales disponibles para biodiesel 2010 y proyección a septiembre 2011.

Especie	Producción carne en vara (ton)*	Rendimiento grasa (%)**	Producción materia prima (ton)	Porcentaje utilización para BD**	Producción Biodiesel (m ³)	Estimación a septiembre 2011
Bovinos	210.745	8	16.860	80	13.488	-28%
Ovinos	10150	8	812	80	650	igual
Porcinos	456.321	10	45.632	80	36.506	-14%
caprinos	20	8	2	80	1	-7%
equinos	7.448	5	372	80	298	-6%
Total	684.683		63.678		50.942	-0,55

* Fuente: datos ODEPA, 2011b.

** Hervé, 2007.

Muchas grasas presentan problemas de que a bajas temperaturas están prácticamente sólidas, por lo cual se necesita tener consideraciones extras para su utilización, ya sean motores duales o sistema de calefacción, parámetros que se verán con más detalles en el capítulo V.

Algas Marinas

En Chile, la Universidad de Antofagasta está trabajando en el estudio de esta alternativa para obtener aceite y así poder producir biodiesel. Rivas (2010), menciona que dentro de las ventajas en el uso de algas como fuente de aceite, está la alta eficiencia

fotosintética de estas especies; su alta producción de biomasa; el rápido crecimiento que presentan las algas (5-15 días); cultivo independiente de la calidad de la tierra; relativa fácil industria; y el alto porcentaje de producción de aceite.

Aunque hay algunos estudios con macroalgas, en el país se ha privilegiado la investigación con microalgas. Si comparamos el aceite de biodiesel producido por microalgas frente a los cultivos agrícolas habituales, hay ciertos puntos que favorecen a las microalgas como fuentes de aceite. Algunas de ellas son que no compiten por suelo ni agua; se cultivan en regiones áridas (se pueden usar acuíferos de agua salada); la tasa de crecimiento es muy superior en comparación a los cultivos habituales; una muy buena calidad del aceite; y que su principal nutriente es el CO₂, donde surge la posibilidad de usar el de centrales energéticas.

En el Cuadro 6 se ilustra la producción de aceite de algunos cultivos y la producción de aceite obtenido de las microalgas, el cual fue realizado según los datos obtenidos de los estudios realizados en la Universidad de Antofagasta.

Moneim *et al* (2010), realizaron una investigación, la que consistía en comparar la producción de biodiesel a partir de ocho especies diferentes de algas utilizando dos sistemas de extracción con disolventes distintos. Como resultados de esta investigación, pudieron comprobar que los extractos de microalgas verdes produjeron mayor porcentaje de lípidos y biodiesel. Por otro lado, las macroalgas (rojo, marrón y verde), produjeron los porcentajes más bajos de biodiesel. La producción de lípidos, glicerol y biodiesel fue notablemente mejorada cuando se aumentó la concentración de sal o en ausencia de nitrógeno, durante su cultivo, con una producción máxima en ausencia de nitrógeno.

Sin embargo, a pesar del gran potencial que tienen las algas y microalgas como fuentes de aceite, Monteiro (2010) menciona algunas restricciones importantes, tales como que la tecnología aún no está disponible a escala industrial, a pesar de las décadas de desarrollo en EE.UU, Japón y algunos países de la UE; la mantención de las condiciones óptimas para el crecimiento rápido de las algas y su supervivencia, ya que implica costos muchísimos mayores a los requeridos por cultivos terrestres; entre otras.

COBAL (2011), da algunos valores de producción, donde según ellos 60.000 m² permiten cosechar 25 toneladas diarias de algas, de las cuales se puede extraer un 45% de aceite, basado en una concentración de aceite de un 55%, y un rendimiento de 1 litro de biodiesel por litro de aceite.

El Cuadro 7 muestra la comparación de propiedades de biodiesel producido por microalgas y diesel convencional.

Cuadro 6: Producción de aceite de algunos cultivos.

Cultivo	Aceite kg ha⁻¹	Cultivo	Aceite kg ha⁻¹
Maíz	145	Arroz	696
Caléndula	256	Girasol	655
Algodón	273	Cacao	863
Soya	375	Colza	1.000
Café	386	Oliva	1.019
Avellana	405	Jojoba	1.528
Semilla de mostaza	481	Coco	2.260
Sésamo	585	Palma	5.000
		Microalgas	30.000

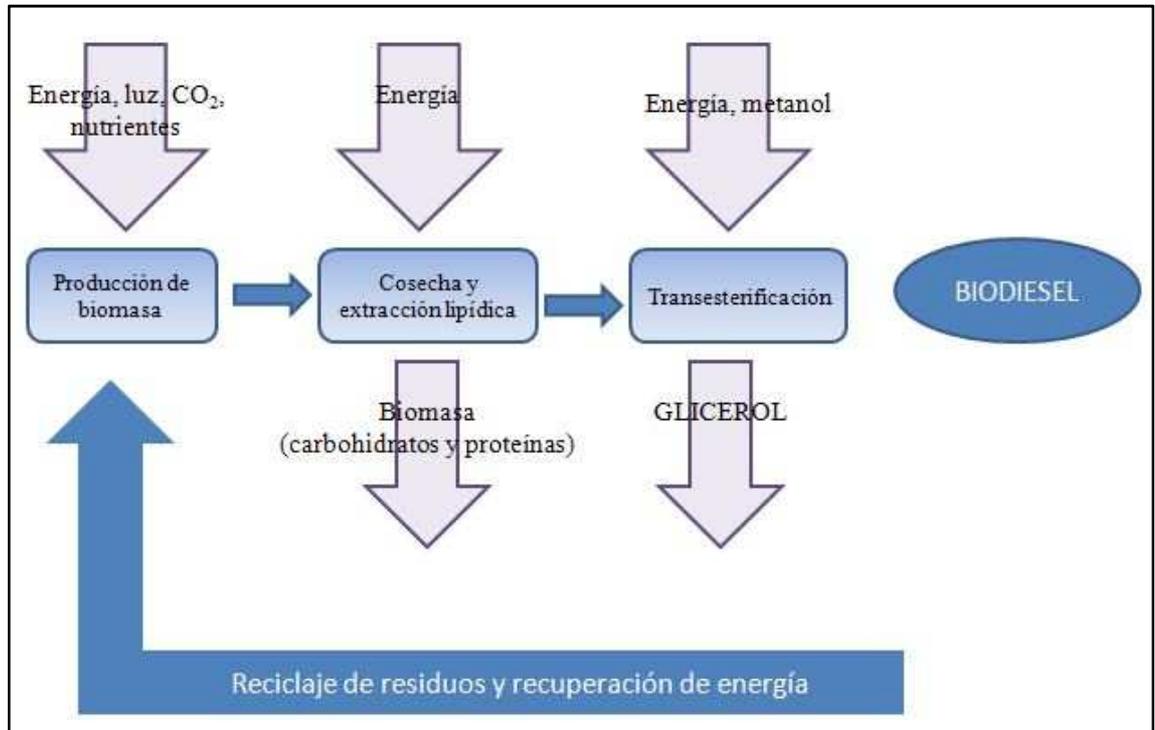
Fuente: adaptación Mariela Rivas, 2010.

Cuadro 7: Comparación de Biodiesel desde aceite microalgas y combustible Diesel.

Propiedades	Biodiesel desde microalgas	Combustible Diesel
Densidad (Kg/l)	0,864	0,838
Viscosidad (Pa S)	5×10^{-4} (40°C)	$1,9-4,1 \times 10^{-4}$ (40°C)
Flash point (°C)	115	75
Punto solidificación (°C)	-12	-50-10
Cold filter plugging point (°C)	-11	-3 (-6,7 máx.)
Valor ácido (mg KOH/g)	0,374	0,5
Valor calor (Mj/Kg)	41	40-45
Razón H/C	1,18	1,81

Fuente: adaptación Rivas, 2010.

A continuación, la Figura 15 muestra un esquema de producción de biodiesel a partir de microalgas.



Fuente: adaptación de Monteiro, 2010.

Figura 15: Producción de biodiesel a partir de microalgas.

Material Lignocelulósico

Chile no se ha marginado de la tendencia mundial de generar energía de fuentes alternativas. Actualmente, ya existe la tecnología para generar energía a partir complejos industriales de celulosa, los que aprovechan sus propios desechos para producir bioenergía.

La biomasa celulósica puede derivar de los productos y subproductos del bosque y de la industria maderera; de los residuos de cultivos agrícolas; de los desechos domésticos, de instalaciones agro-pecuarias y de industrias agro-alimentarias; de los cultivos energéticos y de los residuos sólidos urbanos. Los residuos forestales son todos los materiales orgánicos que sobran en el bosque después de la cosecha (Monteiro, 2010).

Según los estudios realizados del tema de biomasa celulósica, a pesar de que el volumen de residuos agrícola sea muy elevado, sólo un parte relativamente pequeña sería aprovechable para energía, ya que no existen aún tecnologías/costos adecuados para la recolección y el transporte.

Para la elección de una especie energética, se debe tener en cuenta su composición e indicadores agronómicos (productividad, costo de producción, adaptabilidad a diferentes suelos y climas, etc.).

La madera, desde la antigüedad, ha sido el combustible mayormente utilizado por el hombre, tanto para calefacción como para iluminación. Desde que llegó la era industrial, su uso pasó a un segundo plano debido a la tala indiscriminada de los bosques de los países detentores de tecnología y a la conversión de los sistemas térmicos a los combustibles fósiles (Monteiro, 2010).

En cuanto a su disponibilidad, tiene que haber un equilibrio entre lo ecológico, lo económico y lo social. Lo primero se refiere a la preservación del medio ambiente. Lo segundo, es tener claro si al usar esta biomasa para bioenergía, no interfiere con otros usos más económicos, como industrial o alimenticio. Y lo tercero, es sobre la existencia o no de procesos confiables y operaciones para conversión de la biomasa en combustibles de uso más general (Monteiro, 2010).

Este tipo de materia prima también ha sido considerada para producir bioetanol, puesto que sería más barata que producirla de los cultivos y menos competitiva, en cuanto al consumo humano. La cantidad de residuos agrícolas que se producen en nuestro país, solo de los cultivos de trigo y maíz, es de tres millones de toneladas (Armijo, 2006).

Este tipo de material es transformado a biodiesel a través de un proceso de transformación termoquímica, descrito con más detalles en el apartado Transformación termoquímica de la página 58.

BIBLIOGRAFIA

- Armijo, E. 2006. Etanol. pp 61-72. . In: (Ed) Agro energía: un desafío para Chile. 2006. Series Ciencias Agronómicas n° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Burin, M. 2010. Biocombustibles a partir de aceites usados, un camino de obstáculos y desafíos. Disponible en: <http://biodiesel.com.ar/3133/biocombustibles-a-partir-de-aceites-usados-un-camino-de-obstaculos-y-desafios>. Leído, 14 noviembre 2011.
- Carballo, L. 2009. Biodiesel: una alternativa energética eco sostenible. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos67/biodiesel-alternativa-energetica/biodiesel-alternativa-energetica.shtml>. Leído el 15 de Octubre de 2010.
- COBAL, 2011. Biodiesel. Disponible en: <http://www.cobal.cl/biodiesel.html>. Leído 14 de Noviembre de 2011.
- Contreras, C., Pizarro, V. y Sierra C. 2009. Región de Coquimbo: *Jatropha curcas*, para producción de biocombustible en Chile semiárido. Revista Inia Tierra Adentro n°86 (Sept-Oct) 12-13.
- Ganduglia, F., León, G., Gasparini, R., Rodríguez, M., Huarte, G., Estrada, J. y Filgueiras, P. 2009. Manual de biocombustibles (Ed) IICA- ARPEL. Costa Rica y Uruguay. 206 p.
- Grompone, M. 2011. Biodiesel Clase 1. Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/archivos/biodiesel/clase-1.pdf>. Leído el 15 de Noviembre de 2011.
- Hervé, J. 2007. Diseño conceptual de una planta de biodiesel. Memoria para optar a título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 144 p.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura). 2007. Análisis de la producción de los biocombustibles. pp43-65. In: Contribución de la política agraria al desarrollo de los biocombustibles en Chile. Santiago, Chile. 139 p.
- Moneim, A., Shalaby, E. y Shannab, S. 2010. Enhancement of biodiesel production from different species of algae. Revista Grasas y Aceites n° 61 (4) (Octubre-Diciembre) 416-422.
- Monteiro, C. 2010. Situación de los biocombustibles de 2° y 3° generación en América Latina y Caribe. (Ed) Olade e IICA. Brasil. 99p.
- ODEPA, CHILE. 2011a. Bioenergía. Disponible en: <http://www.odepa.cl/servlet/articulos.ServletMostrarDetalle;jsessionid=4F7AA6FF11C21FF01A97CCB95057F3E8?idcla=12&idn=1736>. Leído el 29 de Octubre de 2011.
- ODEPA, CHILE 2011b. Estadísticas por macro rublos pecuario. Disponible en: <http://www.odepa.cl/menu/MacroRubros.action;jsessionid=CE3D832936011577940AB23FA9591F5A?rubro=pecuaria&reporte=>. Leído el 14 noviembre 2011.

- Pedreros, S. 2008. Estudio de viabilidad técnica y económica de una planta de producción de biodiesel. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 77 p.
- Pinto, M. 2006. Bioquímica de la producción de biocombustibles. pp. 47-60. *In* (Ed) Agro energía: un desafío para Chile. 2006. Series Ciencias Agronómicas n° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Rivas, M. 2010. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. Seminario Mes de la Energía Colegio de Ingenieros de Chile.
- Rojo, F. y Acevedo, E. 2006. Biodiesel. pp 83-98. *In:* (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Romano, S. 2005. Biodiesel. pp 11-88. *In:* Combustibles alternativos. Ediciones corporativas, Buenos Aires, Argentina. 189 p.
- USM (Universidad Federico Santa María); Ministerio del Minería y Energía, CNE, FIA y ODEPA. 2007. Evaluación del Potencial Productivo de Biocombustibles en Chile con Cultivos Agrícolas Tradicionales. Santiago, Chile. 148 p.

III. BIODIESEL

BIODIESEL

Una definición literal, es que serían los “combustibles de origen biológico”. Sin embargo, en esta definición se incluiría al petróleo, ya que este procede de restos fósiles que existen desde hace millones de años. Una mejor definición sería que son los “combustibles de origen biológico obtenidos de manera renovable a partir de restos orgánicos”. Entre las fuentes de materias primas los aceites provenientes de palma africana, soya, higuera, Jatrofa, colza y otras plantas (IICA, 2010).

Según la normativa Chilena, Biodiesel es “*es todo combustible líquido compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos obtenidos a partir de aceites vegetales, grasa animal o aceite comestible usado*” (CNE, 2011).

De acuerdo con la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) una definición más técnica de biodiesel y de la mezcla que se haga con éste sería:

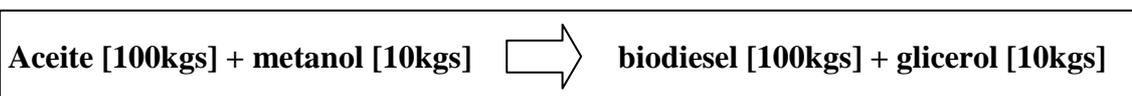
- Biodiesel 100 (B100): es el biocombustible 100% biodiesel, sin mezcla con gasoil y que cumplen los requerimientos de la ASTM D 6751.
- Biodiesel mezcla: es el biodiesel mezclado con gasoil y se denomina BXX, donde XX representa el porcentaje del volumen de biodiesel en la mezcla. Por ejemplo, B20, significa una mezcla con 20% de biodiesel y 80% de diesel derivado del petróleo (Ganduglia *et al*, 2009).

Un éster monoalquílico es el producto de la reacción de un alcohol de cadena abierta no ramificada, tal como metanol o etanol, con una grasa o un aceite (triglicéridos) para formar glicerol (glicerina) y los ésteres de ácidos grasos de cadena larga, comúnmente llamado “biodiesel”. Los mayores componentes de un aceite vegetal son los triglicéridos. Los triglicéridos son ésteres de glicerol con ácidos de cadena larga, llamados usualmente “ácidos grasos” (Hervé, 2007).

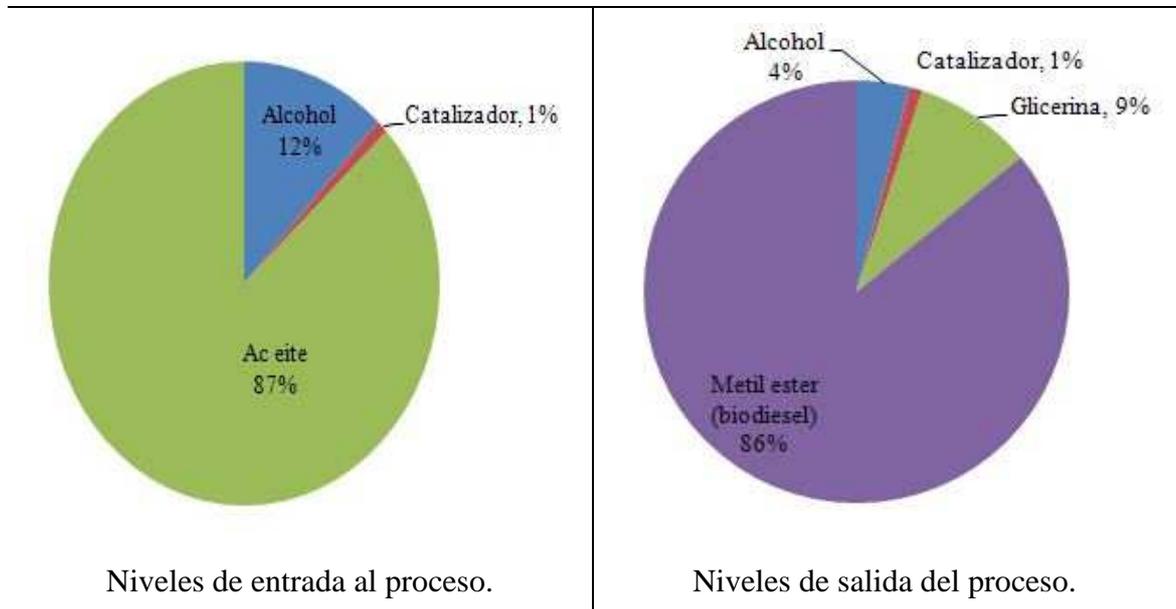
En términos generales, se puede decir que Biodiesel es un combustible líquido obtenido de la combinación de aceites vegetales y/o animales con un alcohol y un catalizador a través de un proceso químico llamado “transesterificación”.

La transesterificación, a modo general, consiste en convertir los triglicéridos en ésteres, para lo cual se produce una reacción en los aceites mediante el uso de un alcohol, que puede ser metanol o etanol, y un catalizador, que puede ser hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. Luego se decanta la sustancia resultante, quedando el biodiesel en la parte superior y glicerina en la parte inferior. Es importante señalar que la calidad del biodiesel tiene mucho que ver con el tipo de materia prima utilizada (IICA, 2010). Este proceso será explicado con mayor detalle más adelante, en el apartado sobre transesterificación de la página 65.

Al fabricar biodiesel, se convierte la casi la totalidad del aceite directamente en éster. Así, el balance en masa aproximativo de producción de biodiesel se puede describir como sigue:



En la Figura 16 se puede apreciar un balance del proceso de producción de biodiesel:



Fuente: adaptación de Hervé, 2007.

Figura 16: Balance de la producción de biodiesel.

Materias primas

Aunque se ha visto en el capítulo anterior, es importante retomar este aspecto debido a que las materias primas utilizadas para producir biodiesel, requieren tener ciertas características y propiedades en su composición para obtener un producto con la calidad que requiere la normativa en Chile. Estas características serán descritas junto con las del diesel tradicional en el Cuadro 8, en la cual se enlistan las especificaciones que deberán cumplir según las normas de nuestro país.

Para cumplir estas normas, hay que conocer las características de los aceites vegetales a usar, con el fin de poder cumplir estas especificaciones. A continuación un cuadro adaptado con datos recolectados durante la investigación sobre las características de algunos aceites vegetales y el diesel convencional:

Cuadro 8: Características aceites vegetales y diesel convencional.

	Diesel	Palma	Algodón	Jatrofa	Colza	Soya	Girasol
Densidad a 20°C	0,836	0,945	0,921	0,92	0,92	0,92	0,92
Viscosidad a 20°C	6	60	73	77	78	61	58
Punto de fusión (°C)	-12	23/27	0/-4		0/-2	-12/-19	-6
Composición química (% en masa)	-9	31	-1	2	-11	-4	-5
C		76,4	77,7		77,9	78,3	
H		11,7	11,7		11,7	11,3	
O		11,5	10,9		10,4	10,3	
Número de cetano	52	38/40	35/40	52/51	32/36	36/39	33
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/Kg)	35,4	36,5	36,8	38,8	37,4	37,3	37,8
Residuo carbonoso (%)	0,15				0,25		0,42
Azufre (%)	0,29				0,0001		0,01

Fuente: adaptación de Márquez, 1995; Falasca y Ulberich, 2008, Legaz, 2011

Biodiesel y su forma de obtención

La forma más utilizada de obtención de biodiesel es la llamada “transesterificación”. Aunque este proceso está descrito con más detalles en el apartado sobre transesterificación de la página 65, a modo general se puede resumir como la reacción entre un triglicérido (compuesto por una molécula de glicerol esterificada por tres moléculas de ácidos grasos), contenido en el aceite vegetal o grasa animal y un alcohol ligero (metanol o etanol), obteniéndose como productos glicerina y ésteres derivados de los tres ácidos grasos de partida, es decir, biodiesel. En general se suele usar metanol como alcohol de sustitución, en cuyo caso el biodiesel estará compuesto por ésteres metílicos (Ganduglia *et al*, 2009).

El proceso comienza con la extracción del aceite de las materias primas. Como subproducto se forman “tortas” que pueden ser destinadas a producción animal. Esta extracción puede ser química o mecánica. El inconveniente de las “tortas” obtenidas de la extracción química, es que las salmoneras no aceptan los productos que hayan sido extraídos por solventes. Los aceites vegetales pueden ser usados directamente en motores Diesel, pero su alta viscosidad y baja estabilidad generan problemas que deben ser solucionados con modificaciones en el motor. Otra opción es realizar transesterificación con estos aceites y así transformarlos en Biodiesel (Rojo y Acevedo, 2006).

Este proceso también es conocido como “alcoholólisis”. Este proceso lo constituyen 3 reacciones reversibles y consecutivas, en las cuales el triglicérido se va convirtiendo

sucesivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. Y en cada reacción es liberado un mol de éster metílico (Reyes citado por Pedreros, 2008).

A pesar de que el metanol tiene, respecto del etanol, mayores restricciones ambientales y de manipuleo, existe una tendencia de uso, por las siguientes razones:

1. Su menor precio
2. Tecnología disponibles y madura
3. Menor complejidad en el proceso
4. Separación menos dificultosa de la mezcla alcohol/agua
5. Menor volumen de alcohol que re circula.

Aunque el etanol tiene la ventaja de ser materia prima de fuente renovable, su posible utilización, en un futuro, en reemplazo del metanol, requerirá necesariamente del desarrollo de tecnologías para obtener un proceso eficiente y competitivo en costos (Ganduglia *et al*, 2009).

El catalizador que se utiliza durante la reacción es una ayuda para acelerar el proceso, pero no se consume durante éste.

Este proceso será explicado detalladamente en el capítulo IV.

Ventajas y desventajas del biodiesel

El biodiesel tiene ventajas muy importantes respecto a otros combustibles, como el ser competitivo frente a otras tecnologías que reducen la contaminación y complementa todas las nuevas tecnologías de diesel para reducción de gases contaminante. También tiene ventajas respecto al medio ambiente, como no incrementar el monóxido de carbono, reduce la cantidad de azufre y los cultivos de semillas de aceite vegetal absorben CO₂ mientras crecen, por lo que en el balance no hay aumento en las emisiones (Lecaros, 2006). Finalmente, en cuanto a la economía, podemos decir que genera la oportunidad económica para sectores rurales, como por ejemplo la generación de empleos en zonas rurales, representa oportunidades de ampliar el mercado de la agricultura Chilena, ya que aumenta la demanda por productos agrícolas (Rojo y Acevedo, 2006).

En cuanto a sus desventajas, la principal limitación que tiene nuestro país frente a la producción de biodiesel, y biocombustibles en general, es la escasez relativa de terrenos agrícolas cultivables (MINAGRI, 2007).

Sin embargo, existen varias otras ventajas y desventajas del uso de biodiesel. A continuación el Cuadro 9 muestra algunas de ellas.

Cuadro 9: Ventajas y desventajas del uso de biodiesel.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Materia prima fácil de obtener. • Procesos de conversión biológica y conservan el componente nitrogenado del suelo. • Es un combustible renovable. • Es biodegradable. • Reduce la dependencia del combustible fósil. • Reduce emisiones de gases de efecto invernadero. • Mejora la lubricación del combustible fósil. • Permite reducir los niveles de azufre. • Se puede usar en motores diesel sin que sea necesario modificarlos. • Se puede obtener de productos reciclados. • El contenido energético del biodiesel es de 90% en relación con el diesel proveniente del petróleo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene menos energía que el diesel convencional. • Sus propiedades son menos favorables para el flujo frío¹. • Muestran un incremento en las emisiones de óxido nítrico (NO_x) en comparación con el diesel. • Su poder solvente lo hace incompatible con una serie de plásticos y elementos derivados del caucho natural². • Presenta escasa estabilidad hidrolítica y oxidativa. Por ello, su almacenamiento no es aconsejable por periodos superiores a 6 meses.

¹ El biodiesel comienza a congelarse o transformarse en gel a temperaturas mayores que el diesel. Si esto ocurre, el combustible puede taponar los filtros. Se puede solucionar incorporando aditivos o ser moderado por el efecto de dilución de las mezclas.

² El biodiesel puede degradar o ablandar cierto tipo de componentes, ya que no es compatible con algunos metales (Zn, Cu) o plásticos. Si se usa biodiesel puro o en una alta proporción, es necesario cambiar estos componentes. Las mezclas de 20% de biodiesel o menos no presentan mayores problemas de incompatibilidad.

Fuente: Adaptado de: Gallardo, 1998; Acevedo, 2006 y Ganduglia *et al*, 2009.

DIESEL VS BIODIESEL

Una pregunta recurrente es ¿el biodiesel es mejor que el diesel convencional o viceversa? Esta respuesta, según diferentes bibliografías, no es posible determinarla de forma absoluta, es decir, afirmar si el biodiesel es mejor que el diesel. De forma general, se podría decir que son similares, algunas veces es mejor, otras no tanto. Eso depende básicamente de qué biodiesel se use para realizar la comparación y con qué diesel se le compare (Ciria, 2003).

El Cuadro 10 muestra una comparación entre las propiedades de un biodiesel y un diesel. Al observar estas especificaciones se puede notar que hay algunas muy parecidas y otras muy diferentes. Estas últimas van a ser las causantes de la mayor parte de los problemas asociados al motor por el uso de este tipo de biocombustibles.

Cuadro 10: Propiedades en común de biodiesel y diesel según legislación chilena.

Parámetro	Unidades	DS 66/2010 Diesel	DS11/2008 Biodiesel
Densidad (15°C)	g/cm ³	0,820-0,845	0,860-0,900
Viscosidad cinemática 40°C	cSt	1,9-41	3,5-5,0
Punto Inflamación	°C	52	120
Punto de escurrimiento	°C	-1	-1
Azufre	ppm	15	15
Residuo carbonoso (10%)	%	0,2	0,05
Agua y sedimento	% V/V	0,05	0,05
Corrosión al cobre	Grado de corrosión	1	2
Cenizas sulfatadas	% M/M	0,01	0,02

Fuente: BNC 2008, 2010.

De esta Cuadro se puede concluir lo siguiente:

- La densidad y la viscosidad cinemática son considerablemente mayores en el biodiesel.
- El punto de fusión es más favorable para el diesel. Esto es muy importante en las regiones frías.
- El punto de inflamación es muy superior en el biodiesel con respecto al diesel, lo que garantiza un manejo mucho más seguro en el manipuleo y almacenaje.
- El poder calorífico no sufre gran modificación, aunque se puede evidenciar que es menor en el biodiesel.

En los Cuadro 11 y 12 se puede ver las otras propiedades de diesel y biodiesel, según la norma chilena, propias de cada combustible (no compartidas).

Cuadro 11: Propiedades que no son compartidas entre el diesel y el biodiesel, según las normas chilenas.

Propiedad	Unidad de medida	DS 66/2010 Diesel
Destilación 90% (máx.-min)	°C	350-282
Número de cetano (min)	N°	50
Aromáticos (máx.)	% V/V	35
Aromáticos policíclicos (máx.)	% M/M	8
Color	-----	Sin color
Lubricidad	µm	460

Fuente: BCN, 2010.

Cuadro 12: Propiedades que no son compartidas entre el diesel y el biodiesel, según las normas chilenas, Biodiesel.

Propiedad	Unidad de medida	DS 11/2008 Biodiesel
Valor de neutralización	mg KOH/g muestra	máx. 0,5
Contenido de éster	% masa	mín. 96,5
Contenido de metanol	% masa	máx. 0,20
Glicerina libre	% masa	máx. 0,02
Glicerina total	% masa	máx. 0,25
Fósforo	mg/kg	máx. 10
Contenido de alcalinos (Na+K)	mg/kg	máx. 5
Contenido de metales (Ca+Mg)	mg/kg	máx. 5
Estabilidad a la oxidación a 110°C	horas	mín. 6

Fuente: BCN, 2008.

Reyes *et al* (2005), realizaron un estudio sobre biodiesel fabricado de aceite de girasol, y comprobaron que todas las mezclas que realizaron de diesel con biodiesel, generaron potencias inferiores a la potencia generada con 100% diesel. Obtuvieron como pérdida menor un 3,5% con B20 y como mayor pérdida un 12,5% para 100% biodiesel (B100). Respecto al consumo del combustible, obtuvieron como resultado que el consumo de combustible disminuye sostenidamente al aumentar el contenido de biodiesel en las mezclas alcanzando su mínimo valor cuando se utiliza un combustible con 100% de biodiesel. Tal como ellos lo afirman, el biodiesel actúa como un aditivo de limpieza, eliminando residuos adheridos en estos sistemas, lo que se traduce en un mejor funcionamiento general del motor. Respecto al consumo volumétrico específico de combustible, medido en kWh L⁻¹, comprobaron que éste era mayor a medida que se incrementaba el contenido de biodiesel en las mezclas, obteniéndose el máximo valor para un contenido de 80% de biodiesel (B80). Finalmente, los resultados que obtuvieron en el ítem de emisión de material particulado, es que hubo una tendencia general a la disminución sistemática de la opacidad de las emisiones al aumentar la proporción de biodiesel.

El uso de biodiesel puede provocar problemas en el equipo de inyección, como otros problemas, los cuales se resumen en el Cuadro 13.

Cuadro 13: Inconvenientes del uso de biodiesel.

Características Biodiesel	Efecto	Modo de fallo
Ester metílico de ácido graso ó FAME (Fatty Acid Methyl Ester)	Provoca que las juntas de nitrilo se vuelvan más blandas, se hinchen o se endurezcan y se rompan.	Fugas de combustible
Metanol libre en el FAME	-Corroe Al y Zn -Disminuye el Punto de Inflamación.	Corrosión de sistema de inyección (FIE)
Reactivos del proceso del FAME	K y Na forman compuestos sólidos	Bloqueo de las boquillas
Agua disuelta en el FAME	Reacción inversa de FAME a ácidos grasos	Colmatación de filtros.
Agua libre en las mezclas	-Corrosión -Presencia de bacterias -Aumento de la conductividad eléctrica del combustible	-Corrosión del FIE -Formación de fangos
Glicerina libre	-Corroe metales no férricos -Empapa los filtros de celulosa -Forma sedimentos en las partes móviles -Tiende a formar lacas	-Obstruye los filtros -Coquizado del inyector
Mono y di-glicéridos	Similar a la glicerina	
Ácidos grasos libres	-Proporciona un electrolito y acelera la corrosión del Zn -Forma sales de ácidos orgánicos -Forma compuestos orgánicos	-Corrosión del FIE -Colmatación de filtros -Sedimentos en partes
Aumentan los módulos de elasticidad	Aumenta la presión de la inyección	Reducción de la vida en servicio
Alta viscosidad a baja temperatura	-Genera un excesivo calor local en las bombas de distribución rotatorias -Aumento del estrés de los componentes	-Ataque a la bomba -Fallos prematuros -Pobre atomización del spray en la boquilla
Impurezas sólidas	Problemas potenciales de lubricidad	Vida de servicio reducida

Fuente: Ciria, 2003.

Hay que contemplar, que el biodiesel no es un material inerte, ya que aunque ha sido procesado, este sigue siendo biológico, por lo cual tiene un periodo en el cual debe ser utilizado para evitar que se degrade, como por ejemplo, hongos, reacciones químicas, entre otros, presentándose en el Cuadro 14 algunos de esos puntos, además en el apéndice I se pueden ver ejemplos de desgaste de piezas del motor por uso de biodiesel. Es por esta razón que el biodiesel debe ser utilizado dentro de un periodo de 6 meses desde su preparación y no almacenarlo por más tiempo (Homer y Hunter, 2006).

Cuadro 14: Productos de envejecimiento.

Características Biodiesel	Efecto	Modo de fallo
Ácidos corrosivos (fórmico y acético)	Corroe todas las partes metálicas	Corrosión del FIE
Ácidos orgánicos de peso molecular mayor	Similar a los ácidos grasos	
Productos de polimerización	Depósitos, especialmente en mezclas de combustibles	-Colmatación de filtros -Formación de lacas en zonas calientes

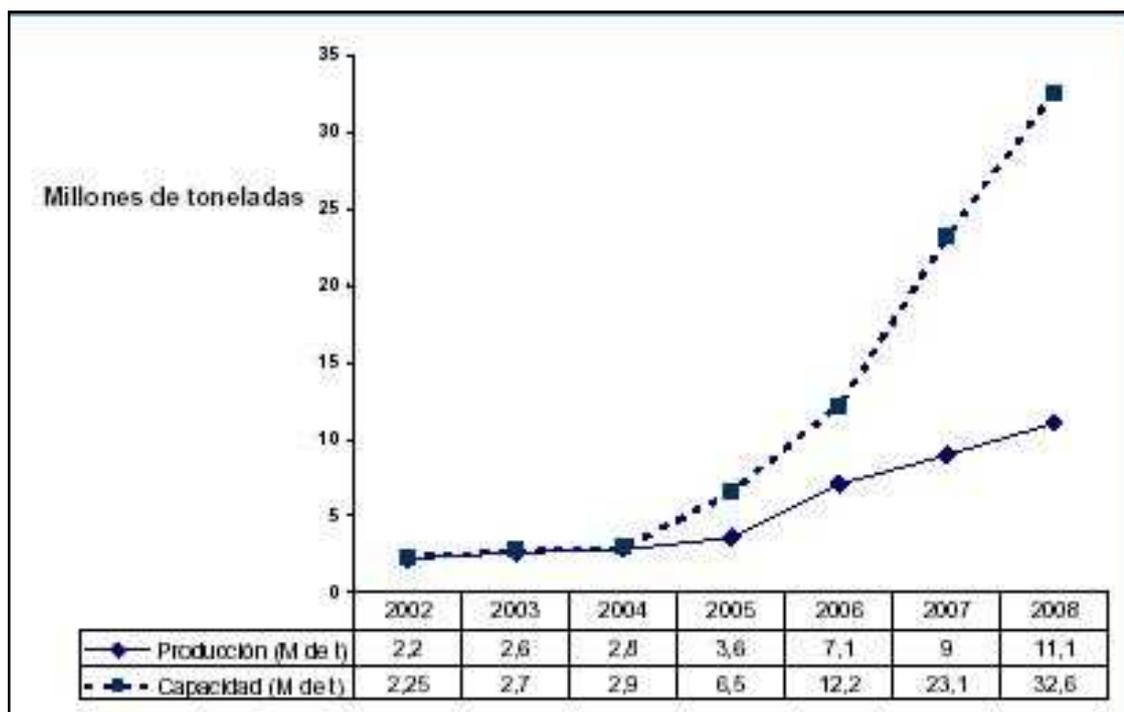
Fuente: Ciria, 2003.

Situación mundial de biodiesel

En 1973, y producto de la crisis petrolera que afectó ese año, se retomaron los estudios de los aceites naturales como reemplazantes de los combustibles fósiles en distintos países. Pero en 1990 fue el gran impulso producto de la guerra del Golfo Pérsico (Romano, 2005).

La producción mundial de biodiesel se mantuvo relativamente estable entre dos y tres millones de toneladas anuales hasta el 2004, y no es hasta el 2005, cuando la producción se dispara hasta alcanzar en el 2008 las 11,1 millones de toneladas. Con ello se registra una tasa anual de crecimiento de 37% para el periodo 2004-2008 (Figura 17).

En la actualidad, la producción mundial de biodiesel se concentra en pocos países. Por ejemplo, del total durante 2006, alrededor del 75% se produjo en Europa, donde Alemania contribuyó con el 55%, y la mayor parte del 25% restante fue producido por Estados Unidos de América. Estas cifras son muy dinámicas entre los países de América que reportan la producción de biodiesel a cierta escala comercial (como Canadá, Brasil y Argentina), mientras que la mayoría de los demás países informan una producción incipiente o en una escala de prueba (IICA, 2010).



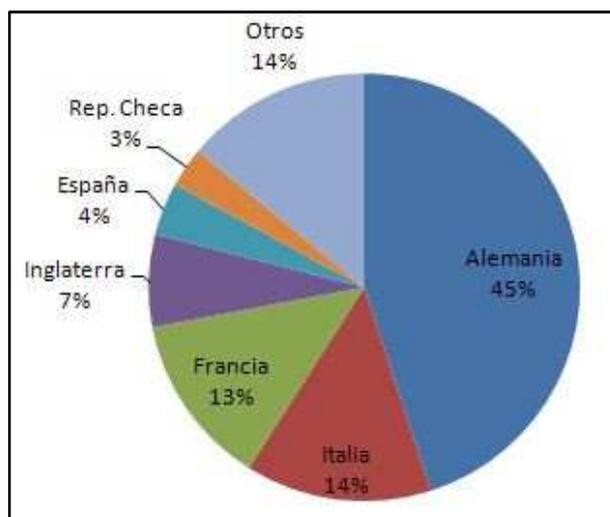
Fuente: IICA, 2010.

Figura 17: Aumento de la producción mundial de biodiesel entre 2002 y 2008.

Unión europea

En 1993 la producción de biodiesel en Europa fue de 80.000 toneladas; en el 2001 se incremento a 780.000 y en el 2003 alcanzo la cifra de 1.430.000 toneladas. Al 2005 la producción ya alcanzó las 2.740.000 toneladas. En la figura 15 se puede ver la producción de biodiesel en el año 2006 en la UE.

La materia prima principal de este biocombustibles es el raps, el cual es el primer tipo de aceite vegetal que se usó para la obtención de biodiesel. El aceite contiene aproximadamente 60% de ácidos grasos oleicos mono insaturados y solo un 6% de ácidos grasos saturados. El biodiesel que se obtiene del raps, presenta buena estabilidad y es de buena calidad. Con nuevas variedades se están alcanzando valores mayores, hasta del 87% de ácidos grasos oleicos (Romano, 2005).



Fuente: adaptación de MINAGRI.

Figura 18: Participación producción de biodiésel en UE.

La colza es la tercera fuente de aceites vegetales en el mundo, luego de soya y palma.

Los principales productores de biodiésel en la **Unión Europea** son Alemania, Francia, Italia y Austria.

Alemania, es el principal productor de Biodiésel a nivel mundial. Su producción crece en el orden del 50% durante los últimos años. A pesar del aumento en su producción en el año 2006, su participación relativa se redujo en un 7% respecto del año 2005, cuando su contribución fue del 52%. Esta menor participación relativa se explica por el significativo aumento de la producción de biodiésel en la UE, debido a la incorporación masiva de su uso en la comunidad Europea (MINAGRI, 2007).

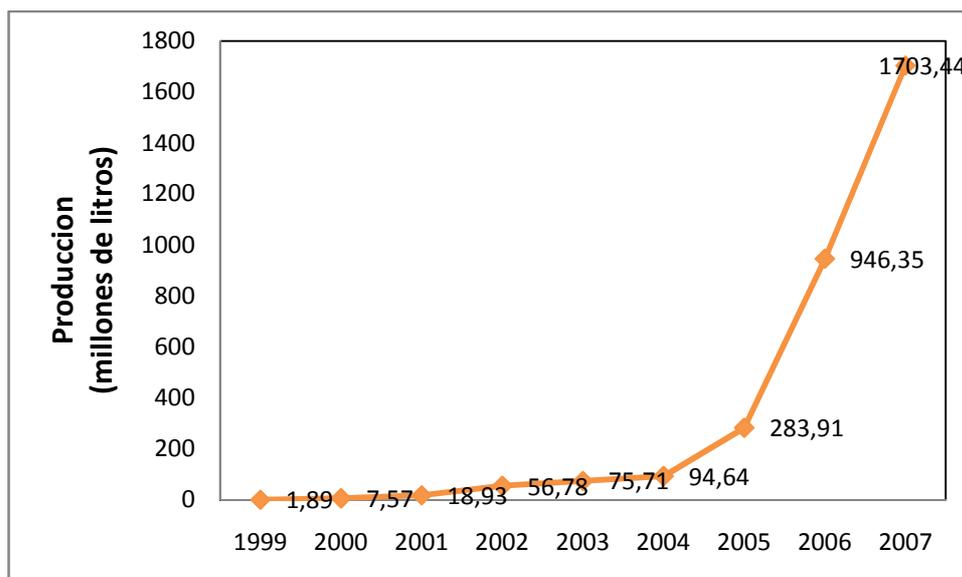
Aproximadamente el 10% de las estaciones de servicio alemanas venden además de combustibles fósiles, biodiésel. Los clientes lo usan puro o en mezcla con el gasoil, en distintas proporciones. (Romano, 2005).

Francia, cuenta con una gran cantidad de materia prima para la producción de biocombustible. Francia, aparte de producir biodiésel, también produce bioetanol.

Francia tiene un límite de producción anual de biodiésel libre de impuestos, el cual fue impuesto por la UE, para asegurar una competencia equitativa entre los distintos países de la UE (Romano, 2005).

América

Estados Unidos, es el tercer país productor de biodiésel del mundo y el principal productor en América. En el 2007 su producción fue de 1.7 billones de litros. La Figura 19 muestra que en el periodo 2004-2007 ha ido en aumento, a una vigorosa tasa de media de cambio de 162.1% (IICA, 2010).



Fuente: adaptación de IICA, 2010.

Figura 19: Evolución de la producción de biodiesel en periodo 1999-2007.

La producción aceitera se concentra principalmente en la soya y el algodón, con una participación del 80.6% y 13.7% de la superficie total cultivada de oleaginosas; seguidos más lejos por el girasol, maní, colza y el lino (IICA, 2010).

Este país es el principal productor de soya del mundo, con producciones anuales de alrededor de 80 millones de toneladas anuales. En cuanto al algodón, se puede decir que se ha mantenido estable la producción alrededor de los 6 millones y medio de toneladas anuales.

Argentina, su materia prima principal es la soya. En el 2007 se realizaron sus primeras exportaciones. Ese año exporto casi 320 mil toneladas por un monto de US\$268 millones, cuyos principales destinos fueron Estados Unidos y la UE (Alemania y Países Bajos) (Cuadro 15).

Cuadro 15: Exportaciones de Argentina de biodiesel en 2007.

Destino	Cantidad (t)	Valor (miles de US\$)	Participación	Precio promedio (US\$/t)
EE.UU	242.948	207.351	76.1%	853
UE	75.537	60.539	23.7%	801
Paraguay	355	339	0.1%	946
Australia	250	194	0.1%	776
Total	319.090	268.423	100%	3.376

Fuente: IICA, 2010.

Argentina presenta condiciones altamente favorables para transformarse en uno de los principales polos mundiales de producción de biodiesel, con presencia significativa en el mercado internacional.

En la actualidad el país cuenta con grandes ventajas comparativas que lo llevan a posicionarse como el quinto productor mundial de biodiesel. La capacidad de producción de biodiesel se cuadruplicó en tres años (Anónimo, 2011).

Brasil, es un país productor de biodiesel desde el 2005, año en el cual el Gobierno Federal lanza el Programa Nacional de Producción y Uso de Biodiesel (PNPB). A partir de entonces, la producción de biodiesel, principalmente basado en el aceite de soja, se dispara y crece hasta llegar a producir más de 400 millones de litros en el 2007, mientras que en e 2008 se produjeron 1164 millones de litros, es decir, casi tres veces más del biodiesel producido en el 2007 (Cuadro 16).

Cuadro 16: Producción de biodiesel en Brasil.

Año	Producción (millones de litros)
2005	0.74
2006	69.00
2007	404.32
2008	1167.12

Fuente: IICA, 2010.

La materia prima principal utilizada en Brasil es la soya. Sin embargo, también usan otras fuentes, pero que le siguen de lejos a la soya, y son las grasas de varias fuentes y el sebo bovino.

En Chile, se ha propuesto que la introducción de nuevas especies en zonas degradadas, con el fin de ser utilizadas como fuente de bioenergía, podría llegar a ser una buena solución a la erosión de suelos no utilizados, y por ende, pueden ser una alternativa socioeconómica, ya que contribuiría a incrementar la rentabilidad de los agricultores o de la empresa agrícola y a generar empleo en zonas marginales (Homer y Hunter, 2007).

BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, E. 2006. Agroenergía, un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Anónimo, 2011. Evolución de la producción Argentina de biodiesel. Disponible en: <http://biodiesel.com.ar/3366/evolucion-de-la-produccion-argentina-de-biodiesel>. Leído el 03 de Abril.
- BCN (Biblioteca Congreso Nacional). 2010. Ministerio Secretaría General de la Presidencia: Decreto 66. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1012499>.
- BCN (Biblioteca Congreso Nacional, Chile). 2008. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción; subsecretaria de Economía, Fomento y Construcción. Disponible en: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=271031>
- Ciria, J. 2003. Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel. Disponible en: <http://www.wearcheckiberica.es/Documentacion/Doctecnica/documentos.asp>. Leído el 02 de Junio 2011.
- CNE (Comisión Nacional de Energía, Chile). 2011. Biocombustibles: Tipos de energía. Disponible en: (Comisión Nacional de Energía). http://www.cne.cl/cnewww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/biocombustible_tipoenergia/biodiesel.html. Leído el 21 de Marzo de 2011.
- Falasca, S. y Ulberich, A. 2008. Las especies del género *Jatropha* para producir biodiesel en Argentina. Revista virtual REDESMA. Disponible en: <http://revistavirtual.redesma.org/vol3/pdf/investigacion/Jatropha.pdf>. Leído el 20 de Octubre de 2011.
- Ganduglia, F., León, G., Gasparini, R., Rodríguez, M., Huarte, G., Estrada, J. y Filgueiras, P. 2009. Manual de biocombustibles. ARPEL -IICA. Costa Rica y Uruguay. 206 p.
- Gallardo, D. 1998. Determinación del contenido lignocelulósico de *Salix viminalis*. para producción de bioenergía. Memoria Ingeniero forestal. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales. 57 p.
- Hervé, J. 2007. Diseño conceptual de una planta de biodiesel. Memoria para optar a título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 144 p.
- Homer, I. y Hunter, E. 2007. Biodiesel, métodos artesanales para su fabricación. Antumapu, revista de extensión agropecuaria y medio ambiente. Vol 5 (n°1): 11-15.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2007. Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. San José, Costa Rica. 24 p.

- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en la Américas: II Biodiesel. San José, Costa Rica. 346 p.
- Lecaros, P. 2006. Biocombustibles en Chile. Trabajo de investigación Mercados Eléctricos. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería, departamento de Ingeniería Eléctrica. 35 p.
- Legaz, R. 2011. Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible. Master thesis Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en : <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/9403/6/3.4.%20EI%20aceite%20vegetal.pdf>
- Márquez, L. 1995. Los biocarburantes: limitaciones y perspectivas. pp. 65-104. *In* Sánchez, F. Energías renovables. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. España. 237p
- Ministerio de Agricultura. 2007. Visión sectorial de los biocombustibles. pp 37-41. *In*: Contribución de la política agraria al desarrollo de los biocombustibles en Chile. MINAGRI y ODEPA. Santiago, Chile. 139 p.
- Pedreros, S. 2008. Estudio de viabilidad técnica y económica de una planta de producción de biodiesel. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 77 p.
- Reyes, J., Sepúlveda, M. y Melin, P. 2005. Caracterización de Biodiesel fabricado con aceite de girasol fresco y usado. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Concepción, Chile.
- Rojo, F. y Acevedo, E. 2006. Biodiesel. pp 83-98. *In*: (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Romano, S. 2005. Biodiesel. pp 11-88. *In*: Combustibles alternativos. Ediciones corporativas. Buenos Aires, Argentina. 189 p.

IV. FORMAS DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL

El aceite vegetal, como las grasas animales, presenta una viscosidad mucho mayor que el diesel tradicional, es por esto que la transformación de ellos, para utilizarse como biocombustible es un método utilizado para disminuir esta viscosidad.

FORMAS DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL

Como ya se ha mencionado en varias oportunidades, los “biocombustibles” son generalmente líquidos que se originan mayormente² a partir de la transformación de la biomasa, mediante diferentes procesos y que serían capaces de sustituir a los combustibles fósiles. Y por “biomasa” se entiende como la materia derivada de organismos vivos, especialmente de vegetales, tanto terrestres como acuáticos (Pinto, 2006).

El biodiesel se obtiene mediante esterificación de aceites vegetales extraídos de especies capaces de sintetizarlos y almacenarlos en gran cantidad en órganos especiales, como las semillas (Pinto, 2006).

La biomasa puede ser transformada en útiles formas de energía usando varios procesos. La elección del proceso de conversión depende del tipo y cantidad de la materia prima de biomasa, la forma de energía deseada, condiciones económicas, entre otros. (Goyal *et al*, 2009).

Hay que especificar que no siempre se deben transformar los aceites (especificándose más sobre esto en el capítulo V, página 78), ya que en ciertas circunstancias se podrá utilizar directamente el aceite, o bien tratar de “diluirlo” con parafina o gasolina+alcohol etílico, mostrándose en el

Cuadro 20 de dicho capítulo la comparación entre la viscosidades de los diferentes métodos.

MICROEMULSIÓN

Una de las formas de disminuir la viscosidad de los aceites vegetales, es a través de la preparación de microemulsiones con alcoholes. Una microemulsión es una dispersión coloidal, termodinámicamente estable y ópticamente transparente. Estas microemulsiones pueden ser de aceite, agua, tensioactivos, entre otros. Está formada por dos líquidos, generalmente inmiscibles, y, al menos, un surfactante. En este caso, en general también se agrega un mejorador de cetano. El tamaño de las micelas de una microemulsión está en el rango de 1 a 150 nm (Romano, 2005; López, 2010)

² También pueden provenir de grasas animales y otro tipo de orígenes

TRASFORMACIÓN TERMOQUÍMICA

Mediante procesos que se detallarán a continuación, uno de los productos finales de la gasificación, (en condiciones controladas) es un producto denominado “diesel sintético”, aunque su denominación, si utilizamos los criterios definidos en capítulos anteriores, sería “biodiesel”, pero más específicamente, un biodiesel de segunda generación.

La base de la formación del denominado “diesel sintético”, es la utilización del gas proveniente de los procesos modificados de la gasificación, siendo parte de ellos la pirólisis que se verá a continuación con más detalle.

Normalmente los procesos de gasificación, ya sea carbón o residuos vegetales, producen un gas de síntesis, el cual es sometido a un proceso de limpieza obteniéndose un gas rico en CO y H₂, los cuales en condiciones controladas de presión y temperatura se pueden juntar en cadenas de hidrocarburos y cíclicas como parafinas. Muchas veces este proceso, para permitir una adecuada relación estequiométrica, necesita del aporte extra de hidrógeno.

En la conversión termoquímica, la biomasa es transformada en un gas combustible o en un combustible líquido portador de la energía. En presencia de alta temperatura, se producen reacciones de oxidación parcial (gas de gasógeno) o completa (combustión en ciclo de vapor) o en presencia de otros agentes que no sea aire (gas de síntesis). Se incluye dentro de la conversión termoquímica, la producción de carbón y gas por pirólisis y la obtención de combustible líquidos por licuefacción (Kavalov *et al*, 2005, citado por Gutiérrez, 2006).

Este gas de síntesis generado es el que será la base para la obtención de metanol y de gasolinas. Gutiérrez (2006) describe en el caso de las gasolinas, que lo fundamental desde el punto de vista químico es la reacción del monóxido de carbono con hidrógeno en presencia de catalizadores de hierro y cobalto. Se generan reacciones simultáneas y a diferentes velocidades produciéndose mezclas de hidrocarburos del tipo olefínica y parafínica desde metano a parafinas sólidas. El proceso se conoce como síntesis de Fischer-Tropsch y se realiza bajo presión, y de acuerdo al nivel de esta presión se obtienen diferentes proporciones de los componentes principales, gasolina, diesel y parafinas. A presiones bajo 5 atmósferas se logra una proporción de 60% de gasolina, 30% de diesel y 10% de parafina. El aspecto y consistencia que presenta este combustible líquido, es el de un hidrocarburo petrolífero parafínico.

Cuadro 17: Rendimientos de Diesel sintético.

Materia prima	L diesel/ton. mat. prima
Residuos urbanos	330
Residuo Forestal	300
Plásticos	800
Carbón	400

Fuente: COBAL, 2011.

Hoy en día hay importantes iniciativas en esta área, como la presencia de empresas para comercializar estas tecnologías, como sería COBAL u otras como consorcios Universidad-Empresas, como BIOCOTSA que es un Consorcio Tecnológico financiado por INNOVA CORFO e integrado por el Consorcio Maderero S.A., ENAP Refinerías S.A. y la Universidad de Chile.

En Marzo de 2011, El Mercurio publicó que Peter Hiller se asoció con los Cueto (controladores de LAN) y al empresario Pablo Vargas, para construir una planta de biodiesel de segunda generación, a partir de desechos forestales (Anónimo, 2011b).

En los Anexo IV, se encuentra un listado con los proyectos de investigación en biocombustibles y los consorcios que hoy en día trabajan en ellos

Pirólisis

Aunque en sí, la pirólisis no es una vía para hacer el biodiesel como tal, si dentro de sus múltiples productos, está el anteriormente descrito diesel sintético (Figura 1), que es un sustituto del petróleo diesel a partir de residuos vegetales. En este caso se analiza la pirólisis como un proceso previo de las etapas anteriores, en donde la pirólisis es un proceso en el cual la descomposición de sustancias orgánicas ocurre a alta temperatura en ausencia de oxígeno. Los aceites vegetales comienzan a descomponerse a temperaturas mayores de los 250°C (Romano, 2005).

La cantidad y calidad de los productos obtenidos de la pirólisis dependen de varios parámetros, como la reacción de temperatura, presión, velocidad de calentamiento, tiempo de reacción, etc. Líquidos orgánicos, gases y agua se forman en diferentes cantidades, dependiendo básicamente de la composición de la biomasa, velocidad de calentamiento, temperatura de la pirólisis y el tiempo de residencia en el reactor de pirólisis (Goyal *et al*, 2009).

Los procesos básicos que toman lugar en la pirólisis son:

1. Transferencia de calor desde una fuente de calor, dando lugar a un aumento de la temperatura dentro del combustible.
2. El inicio de las reacciones de la pirólisis debido al incremento de la temperatura, conduce a la formación de volátiles y de carbón.
3. Salida de los volátiles, como resultado de la transferencia de calor entre los volátiles calientes y el combustible frío no pirólisisado.
4. Condensación de algunos volátiles en las partes frías del combustible para producir alquitrán.
5. Reacciones de pirólisis autocatalíticas secundarias.

El proceso de pirólisis puede ser endotérmico o exotérmico, dependiendo de la temperatura del sistema de reacción. Los pasos del proceso incluyen en primer lugar, el secado de la materia prima; luego, se realiza la molienda del material en un tamaño lo suficientemente pequeño para una rápida reacción; y por último, la separación de los productos (biocombustible) (Goyal *et al*, 2009).

La pirólisis puede ser clasificada en tres tipos:

- Pirólisis lenta: este es el proceso convencional de pirólisis en donde la velocidad de calentamiento es lenta (5-7°C/min aprox).
- Pirólisis rápida: este tipo de pirólisis es considerada mejor que el proceso convencional. Esto es porque la velocidad de calentamiento es de 300 a 500°C/min y el rendimiento es mucho más alto.
- Pirólisis flash: es una versión mejorada de la pirólisis rápida, en donde la temperatura de reacción es obtenida en solo segundos. La velocidad de calentamiento son muy altas, alrededor de 1000°C/min con tiempos de reacción de algunos segundos. Este tipo de pirólisis puede ser categorizada como:
 - ◆ Hidro-pirólisis flash: es llevada a cabo en presencia de hidrogeno.
 - ◆ Pirólisis solar flash: la energía solar es usada para el proceso de pirolisis.
 - ◆ Proceso térmico rápido: es llevada a cabo con temperaturas entre 900 y 950°C.
 - ◆ Pirólisis al vacío flash: en este caso, se incorpora el vacío al proceso de pirolisis. Esto detiene las reacciones de descomposición secundarias, dando mayor rendimiento, y reduciendo la producción de gas. El vacío facilita la rápida eliminación de líquido del sistema.
 - ◆ Pirólisis catalítica de biomasa: la pirólisis catalítica es hecha para mejorar la calidad del combustible.

Mecanismos de pirólisis de biomasa

El mecanismo de pirólisis consiste indirectamente de los mecanismos de pirólisis de sus componentes, como, celulosa, hemicelulosa y lignina.

- ❖ Pirólisis de celulosa: La degradación de la celulosa comienza con temperaturas sobre los 52°C (325 K) y es caracterizada por disminuir el grado de polimerización. Este tipo de pirólisis tiene dos reacciones básicas, que son a) degradación, descomposición y carbonización a temperaturas más bajas; y b) rápida volatilización acompañada de la formación de levoglucosan de pirólisis a altas temperaturas.
- ❖ Pirólisis de hemicelulosa: la hemicelulosa, la cual está presente en árboles caducifolios, principalmente como pentosanos, y en árboles de coníferas casi en su totalidad como hexosanos, se descompone térmicamente muy rápido. La degradación de la hemicelulosa comienza por sobre los 100°C (373 K).
- ❖ Pirólisis de la lignina: la lignina es un complejo, polímero de origen natural. Existiendo dos diferentes procesos han sido desarrollados para la degradación de la lignina. Ambos son en dos etapas, y llegan a diferentes compuestos, donde una de ellas obtiene hidrocarburos reformulados, gasolina, cadenas múltiples de parafinas entre otros, mientras que el segundo método obtiene una gasolina parcialmente oxigenada. Todas ellas, mediante diferentes métodos se pueden transformar en combustible (Goyal *et al*, 2009).

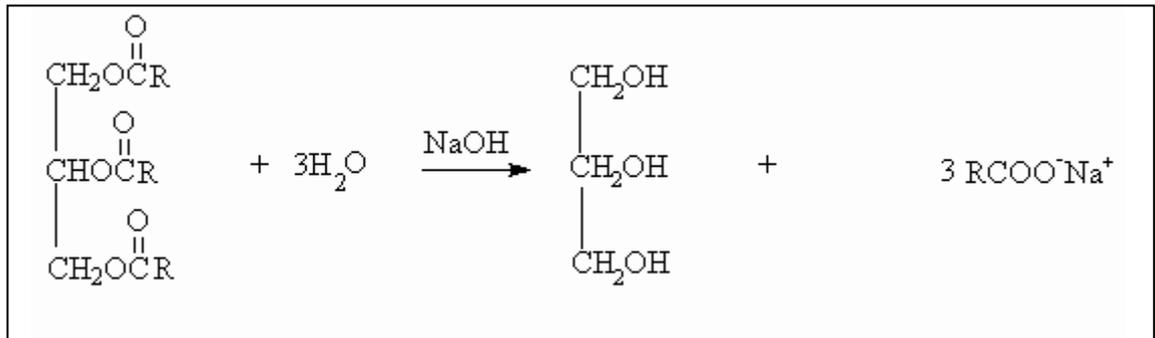
TRASFORMACIÓN BIOQUÍMICA

Resumen

La transesterificación es un proceso donde se usa un catalizador básico en presencia de un alcohol donde predomina el metanol, aunque si se amplía el criterio de los procesos de transformación bioquímica, habría que describir otro proceso muy asociado a éste, debido a que existen dos vías para obtener biodiesel, una vía indirecta y otra vía directa. La vía indirecta comprende tres etapas: la primera es una saponificación de los triglicéridos presentes en los aceites y grasas, para formar jabones y glicerina; luego una neutralización en medio ácido del jabón para generar un ácido libre (aceite de inversión); y por último, una esterificación del ácido graso con metanol en presencia de catalizadores, generalmente de tipo ácido (Reyes citado por Pedreros, 2008). El esquema de los procesos se grafican a continuación en la figura 20:

Saponificación y esterificación

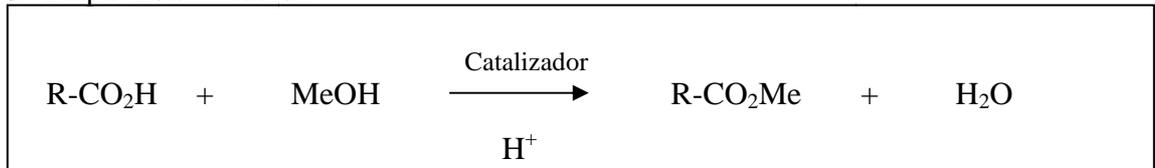
1° Etapa: Saponificación



2° Etapa: Neutralización



3° Etapa: Esterificación



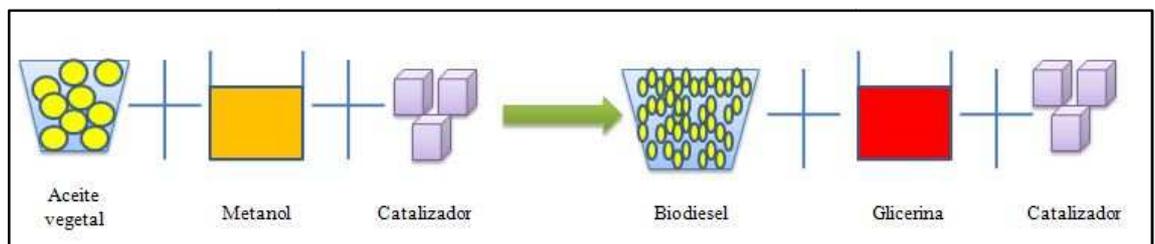
(Donde “R”, corresponden a radicales que pueden o no ser iguales)

Figura 20: Vía indirecta de obtención de biodiesel.

La otra vía de obtención de biodiesel, es la vía directa, o más conocida como “transesterificación”, reacción química que ha demostrado mejores resultados para su obtención.

Transesterificación

Es la forma más sencilla y utilizada, el cual podría ejemplificarse de la siguiente forma (figura 21):



Fuente: adaptación Hervé, 2007.

Figura 21: Transesterificación.

Clasificación

La obtención de biodiesel se puede clasificar en función del volumen producido o según el método de elaboración.

1. Clasificación en función del volumen producido

El proceso de producción puede ser batch o discontinuo, semicontinuo o continuo. La primera es si los volúmenes de obtención son pequeños, menores a $10 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$; el segundo, es una variante del proceso batch, y se utiliza para producciones entre 10 y $40 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$. Se trata de varios equipos en serie para realizar tanto la reacción y la decantación como el lavado. El producto intermedio debe ser trasladado a cada uno de estos equipos. Finalmente, el tercer tipo, se utiliza para grandes volúmenes de producción, mayores a $40 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ (Romano, 2005).

2. Clasificación en función del catalizador utilizado

Los catalizadores pueden ser homogéneos o heterogéneos. Los primeros incluyen los catalizadores ácidos y básicos. Dependiendo del tipo de catalizador que se utilice en el proceso de obtención de biodiesel, se divide en transesterificación ácida, básica o enzimática.

Un catalizador base produce reacciones considerablemente más rápidas que aquellas catalizadas por un ácido, esto se debe a que un catalizador básico es menos corrosivo para un equipamiento químico-industrial. Además, los catalizadores ácidos generalmente requieren de altas temperaturas, mientras que la alcoholisis básica, puede ser conducida a temperatura ambiente o a temperaturas próximas a la de ebullición del alcohol utilizado.

La catalización enzimática, donde se utiliza distintos tipos de enzimas lipasas, requiere de muchas horas de reacción y su costo es muy elevado para ser empleado a escala industrial (Reyes citado por Pedreros, 2008).

A continuación el cuadro comparativo muestra las ventajas, desventajas y características de las principales vías de transesterificación según el tipo de catalizador usado.

Cuadro 18: Ventajas y desventajas de las vías de transesterificación.

	Ventajas	Desventajas	Características de la transesterificación
Catálisis alcalina	<ul style="list-style-type: none"> - Es la tecnología más usada comercialmente - Condiciones moderadas de presión y temperatura - Se obtienen conversiones en tiempos de reacción de 60 min. aprox. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere que el aceite y el alcohol sean anhidro y limitar el contenido de ácidos grasos libres en la alimentación para evitar la formación de jabones. 	<ul style="list-style-type: none"> -Cantidad apreciable de operaciones unitarias para la separación de los productos
Catálisis ácida	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza en la adecuación del aceite (esterificación de los ácidos libres con metanol) - Puede procesar materias primas con altos niveles ácidos grasos libres (grasas animales y aceites usados) 	<ul style="list-style-type: none"> - Los tiempos de reacción son mucho más lentos. - Necesitan condiciones de temperatura y presión más severas que la catálisis alcalina. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza como un proceso pre-transesterificación antes de realizar dicho proceso vía la catálisis alcalina. - Requiere uso de catalizador ácido.
Catálisis de lipasas	<ul style="list-style-type: none"> - La reacción no es afectada por la presencia de agua en las materias primas ni por contenidos de ácidos libres. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los tiempos de reacción son elevados, por lo que no pueden ser procesos continuos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se usan solvente orgánicos como medio de reacción, porque mejoran la reactividad y brindan la posibilidad de neutralización. El alcohol se adiciona por etapas, para evitar la inhibición.
Alcoholes supercríticos	<ul style="list-style-type: none"> - Bajos tiempos de reacción. - Se pueden procesar materias primas con altos contenidos de ácidos grasos libres y agua. - No es necesario la utilización de un catalizador. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altos costos debido a las condiciones de la reacción a altas temperaturas y presiones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se emplean temperaturas y presiones elevadas.

Fuente: Ganduglia *et al*, 2009.

TRANSESTERIFICACIÓN

Como se ha mencionado en varias oportunidades, la reacción más usada para la producción de biodiesel es la transesterificación. La elección de la tecnología usada dependerá de varios factores, como por ejemplo, la capacidad deseada de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol y del catalizador (Pedrero, 2008).

Si la acidez del aceite lo exige, o hay presencia de ácidos grasos libres, se debe realizar un proceso previo del aceite ya que el catalizador reaccionará primero con cualquier ácido graso libre en el aceite para formar jabón y debería haber suficiente catalizador adicional, para catalizar la reacción tanto como para reaccionar con los ácidos grasos libres

El proceso de transesterificación para obtener biodiesel a partir de aceites vegetales, consiste en realizar la mezcla del alcohol con un catalizador en un contenedor especial, donde esta mezcla debe ser lo más homogénea posible con el fin de obtener la mayor eficiencia del proceso. La mezcla resultante del alcohol y el catalizador, pasa posteriormente por un reactor cerrado donde es adicionado el aceite vegetal, y así realizar el proceso de transesterificación. La mezcla se deja reaccionar a una temperatura entre 39°C y 48°C durante 1 hora manteniendo una agitación vigorosa. Así se obtiene el biodiesel crudo, que se separa de los restos de alcohol que puede ser reutilizado. La temperatura varía dependiendo del aceite usado: si es aceite nuevo, la temperatura es entre 35-42°C y si el aceite es usado, la temperatura varía entre 48-54°C. Esta temperatura debe mantenerse durante todo el proceso.

El nivel de ácidos grasos libres debe mantenerse bajo, es decir, menos de 0,5%, ya que si es muy elevado (0,5-1%), el jabón que se forma genera emulsiones con el alcohol y el aceite, impidiendo que la reacción tenga lugar. Ocurre lo mismo si hay agua presente en la reacción.

En forma paralela se debe elaborar metóxido de sodio ($\text{Na}^+\text{CH}_3\text{O}^-$), mediante la agitación durante 10 minutos de metanol y soda caustica. Este metóxido, se agrega al aceite caliente en agitación (mediante un taladro o motor conectado a algún vástago con hélice o aspa), sin dejar de agitar vigorosamente durante una hora, que es el tiempo suficiente para que ocurra la transesterificación. (Homer y Hunter, 2007).

Una vez que el tiempo de agitación ha concluido, se deja reposar por 12 horas, con el fin de que decante la glicerina y así, finalmente, separarla del metiléster, aspirándolo.

Durante el proceso de transesterificación, la agitación cumple un rol fundamental, ya que de ella depende el obtener un producto de buena calidad, puesto que si no se realiza en forma vigorosa, es posible que no se logre la reacción completa ni se libere toda la glicerina.

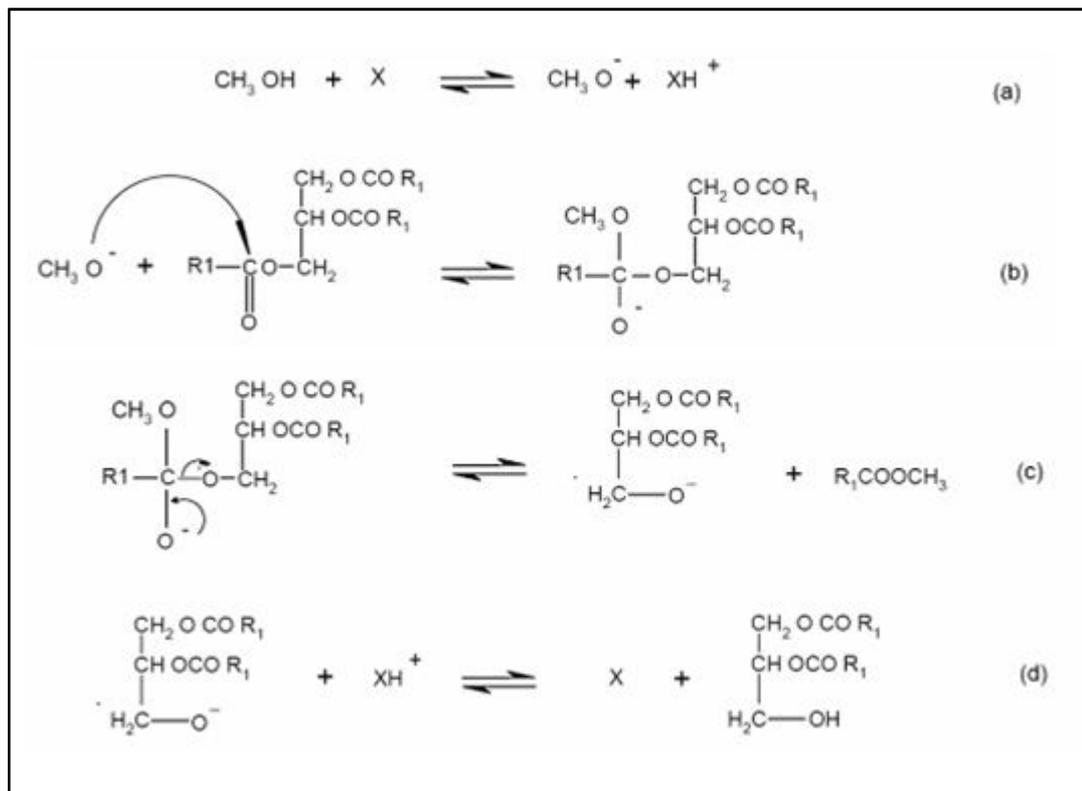
Normalmente se usa un exceso de alcohol, para asegurar la conversión total del aceite o la grasa en metiléster. En algunos sistemas, este exceso de alcohol se puede remover a través de una simple destilación. En otros casos, se realiza la remoción del alcohol luego que la glicerina es separada de los otros reactantes.

La glicerina que se obtiene como producto de la transesterificación, contiene el catalizador que no fue utilizado y jabón. Muchas veces se almacena como glicerina cruda, y otras veces se refina para poder ser utilizada como glicerina farmacéutica.

El alcohol y el agua que quedan del proceso de recuperación de glicerina y de purificación del metiléster, son sometidos a un proceso de destilación para recuperar el alcohol, ya que éste será reutilizado en el proceso.

El proceso químico que ocurre durante la transesterificación, es básicamente la transformación de un triglicérido a un metiléster. La Figura 22 muestra este proceso químico.

En la ecuación (a), el metanol (CH_3OH), reacciona con el catalizador, representado con la "X". R_1 es el grupo alquilo que forma parte de la cadena del ácido graso del triglicérido. En la ecuación (b), el radical cargado negativamente (CH_3O^-) reacciona con el doble enlace del grupo carbonilo del triglicérido. En la ecuación (c) es donde se lleva a cabo la formación de una molécula del éster alquílico (R_1COOCH_3) (en este caso del biodiesel, se trata de metiléster). En la ecuación (d), se regenera el catalizador formándose un diglicérido. Las ecuaciones de la (a) a la (d) se repiten hasta la desaparición del triglicérido, con la formación del mono alquil éster y glicerina como productos finales (Hervé, 2007).



Fuente: Hervé, 2007.

Figura 22: Proceso químico de la transesterificación.

Para tener un proceso mucho más eficiente, hay veces que la reacción se hace en dos etapas, en donde en la primera parte, se agrega sólo el 80% del alcohol y del catalizador. Luego que estos productos se mezclan, pasan por un separador de glicerol y entran a un segundo reactor, lugar donde se realiza la segunda etapa de la reacción. En este reactor

se colocan el 20% restante de alcohol y catalizador. Este proceso en dos etapas, permite una reacción más completa, pudiendo utilizar menos alcohol que en una reacción en una sola etapa.

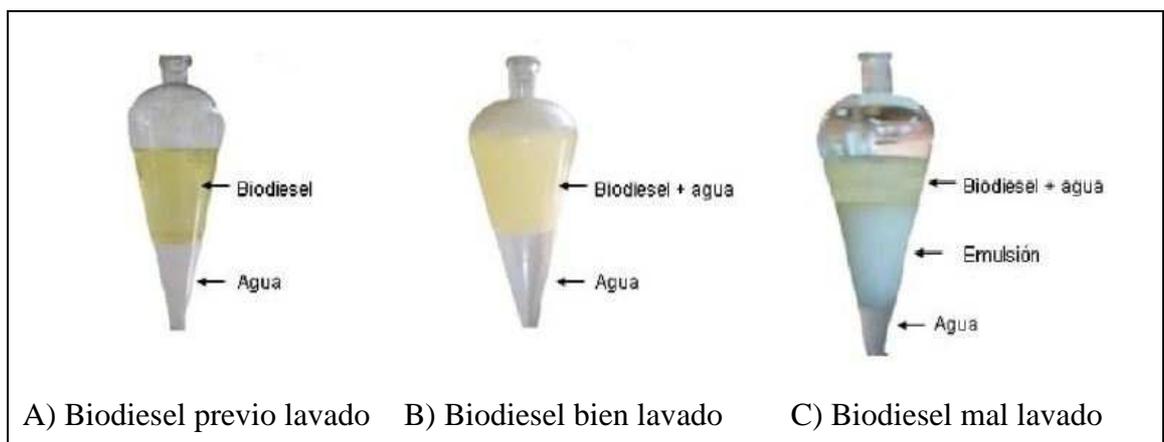
Lavado

Una vez que se obtiene el producto, éste tiene un pH muy alcalino, cercano a 9. Esto se debe a que a pesar de que se ha dejado decantar, en el metiléster aún hay restos de metanol y de soda caustica, y esto podría provocar daño en los motores. Es por esta razón que después de la transesterificación, existe un proceso de lavado, con el fin de remover los residuos y llevar el pH a valores neutros (Homer y Hunter, 2007).

Pero, como se ha mencionado, este proceso no siempre se realiza, ya que hay empresas que prefieren no lavar, si la acidez del producto así lo permite.

Según Homer (2006), existen dos dificultades frecuentes en la fabricación de biocombustibles. La primera es lograr un adecuado corte de cadenas y, por ende, la separación de la glicerina; y, posteriormente, debido a un procedimiento con mayor pérdida de producto, es el lavado del biocombustible, ya que si el biodiesel ha sido mal preparado (aspecto importante a pequeña escala) el exceso de agua o de agitación provoca la emulsión de éste, con formación de jabones que o podrán separarse por decantación, perdiéndose de esta forma, parte o el total del producto ensayado (Homer y Hunter, 2007).

Por esta razón, un test muy sencillo para determinar la calidad del biodiesel, es tomar una pequeña muestra de biodiesel, agregar la misma cantidad de agua, y agitar vigorosamente unos 15 segundos, para que se mezclen completamente. Posteriormente se deja reposar, y si al cabo de unos 30 minutos hay una separación completa, significa que el biodiesel es de buena calidad. Si entre ambas fases hay una capa de jabón o espuma, se puede seguir con el lavado pero se debe corregir con ácido fosfórico, y tomar las medidas de corrección del proceso de transesterificación. Y por último, si no se separan, quiere decir que el proceso de transesterificación falló, apreciándose en la Figura 23c la emulsión de un biodiesel mal preparado.



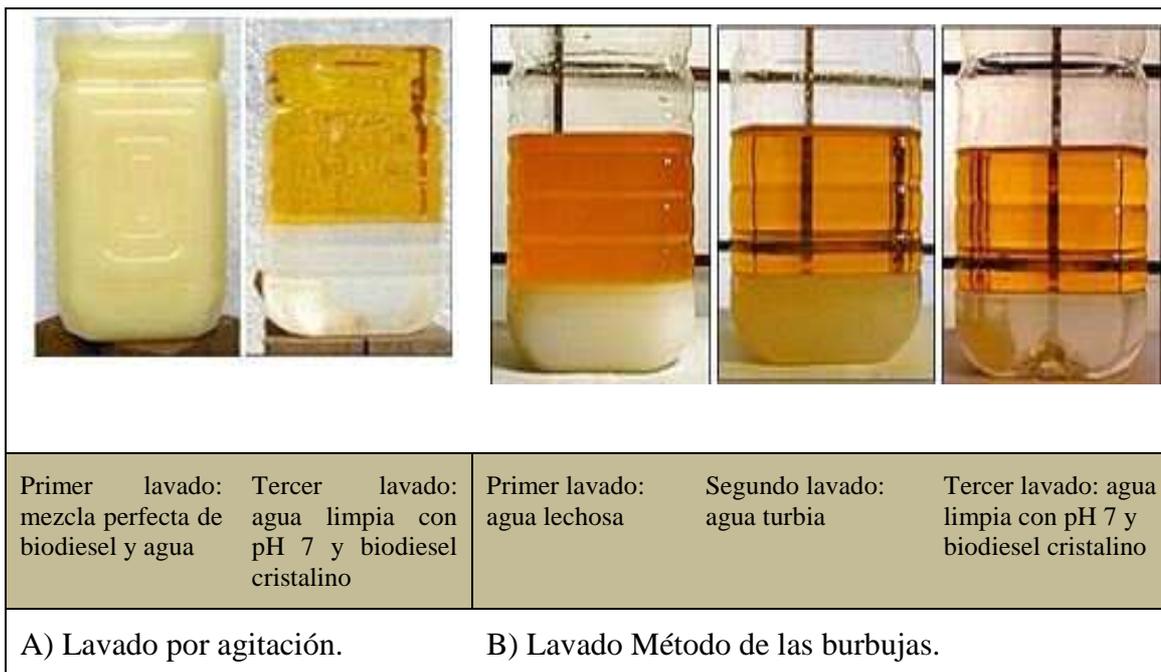
Fuente: Homer y Hunter, 2007.

Figura 23: Lavado de biodiesel: bien y mal realizados.

Para el proceso de lavado se pueden aplicar dos métodos: mediante **agitación** o mediante **el Método de aireación**. El primero, y tradicionalmente utilizado, consiste en agregar agua en una proporción de un 10% del volumen de aceite y agitar suavemente por unos 5 minutos. Luego se deja reposar unas 8 horas para decantar el agua presente, la que es extraída; finalmente el biocombustible se calienta a 100°C para evaporar los restos de agua que pudiesen estar mezclados con el combustible, manteniéndose las temperaturas hasta que dejen de salir burbujas.

El segundo método, basado en aireación, consiste en que las burbujas de aire se forman haciendo pasar aire comprimido a través de un difusor, para lo cual se necesita una pequeña bomba de acuario y una piedra difusora. En un tanque de lavado se coloca biodiesel, al que se le agrega agua en volumen entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ mayor que el volumen del biodiesel.

Existe una variante a este método, denominada **burbuja de la Universidad de Idaho**, en donde el pH del agua, debe ser tantas veces bajo 7, como el biodiesel es sobre 7. Así, si el biodiesel tiene pH 9, dos unidades sobre 7 (medido con papel pH o equipo manual), se debe preparar una mezcla de agua con un poco de vinagre que tenga pH 5, dos unidades bajo 7. Normalmente la aplicación de vinagre es en muy pequeñas cantidades, por lo cual vale la pena diluirlo un poco antes de realizar estas mezclas. El agua está en el fondo, donde se encuentra la piedra difusora. El combustible flota encima. Las burbujas de aire, idealmente abundantes y muy pequeñas, suben atravesando primero el agua y luego el biodiesel. Cada burbuja queda cubierta por una fina película de agua y la eleva a través del biodiesel, lavándolo en su recorrido. Cuando la burbuja llega a la superficie, estalla, dejando una gotita de agua que vuelve al fondo, atravesando de nuevo el biodiesel y lavándolo por segunda vez. Este método debe funcionar por unas 6 horas y luego se deja reposar. Algunas piedras difusoras de baja calidad sufren abrasión con el biodiesel. Por eso, las cerámicas son mejores y duran indefinidamente (Homer y Hunter, 2007). En la Figura 24 se ilustra ambos tipos de lavado y sus resultados.



Fuente: adaptación de Anónimo 2011a.

Figura 24: Tipos de lavados de biodiesel.

Y por último, el metiléster se debe calentar sobre los 100 °C para evaporar cualquier resto de agua que pudiese haber quedado, y al enfriarse, se filtra. Una vez finalizado todo este proceso, la pureza del éster producido de esta forma es de 98%, obteniéndose un producto con una viscosidad mucho menor que la del aceite inicial (Rojo y Acevedo, 2006).

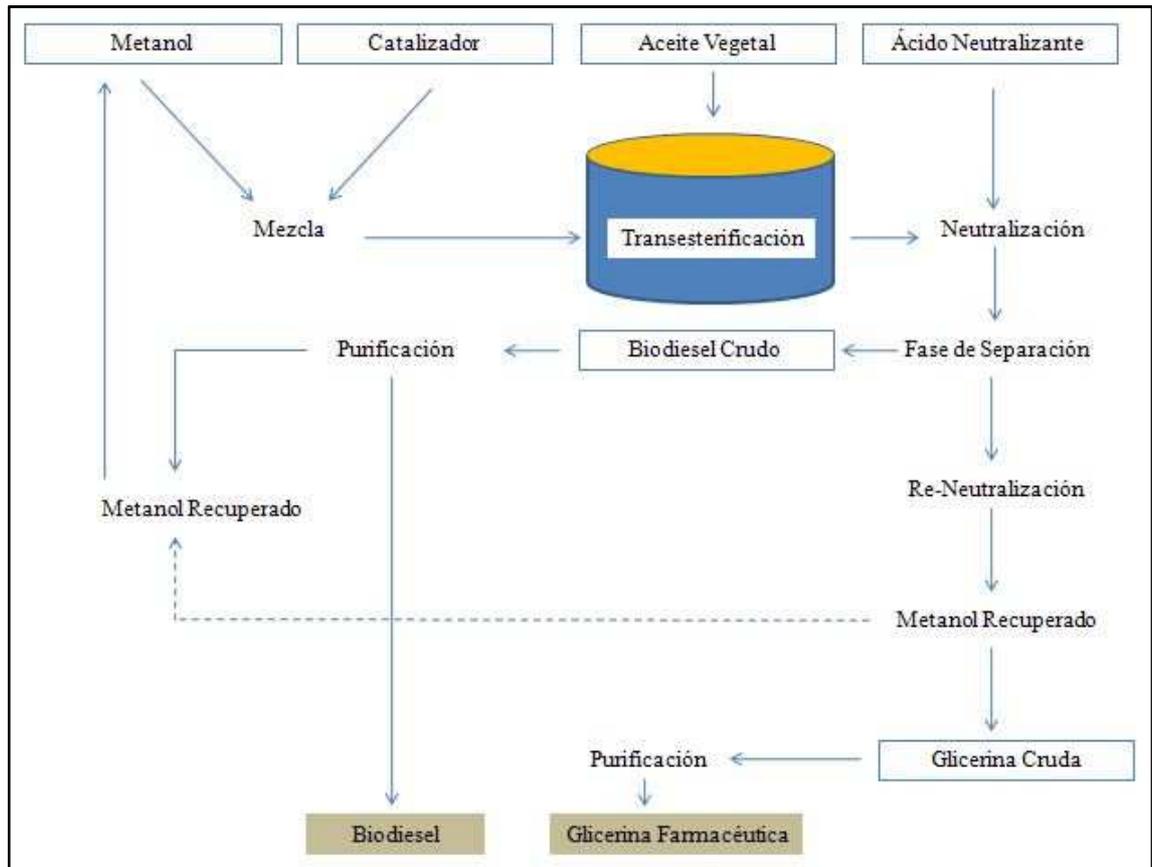
La glicerina puede ser purificada para ser comercializada en la industria farmacéutica.

Proceso de producción de biodiesel

Existen múltiples opciones de operación viables para la fabricación de biodiesel, aunquetodas ellas tienen en común los aspectos mencionados en el punto anterior de producción de biodiesel mediante el proceso de transesterificación. 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 (García y García, 2007).

En el APENDICE III : Producción de biodiesel a nivel doméstico (página 104) se pueden apreciar de imágenes de un biodiesel realizado en el Taller de Maquinaria Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas.

A continuación el proceso general de transesterificación se grafica en la Figura 25:



Fuente: adaptación Rojo, F. y Acevedo, E. 2006.

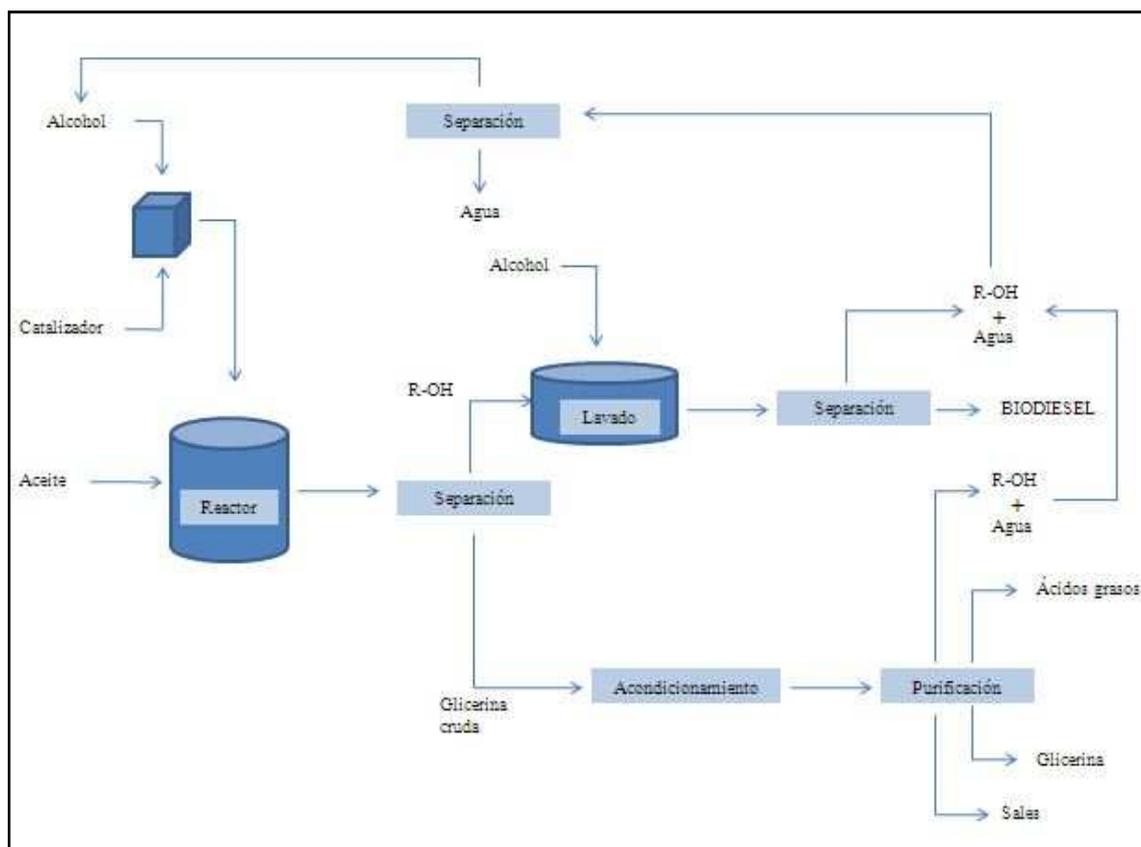
Figura 25: Proceso general de transesterificación.

Proceso discontinuo

Es uno de los métodos más simples para la producción de biodiesel. Esto consiste en reactores con agitación, donde el reactor puede estar sellado o tener un condensador de reflujo. La temperatura habitual de reacción es de 65°C, aunque existen publicaciones donde hablan de un rango de temperaturas entre 25 y 85°C.

Comúnmente se utiliza NaOH como catalizador, aunque KOH también es utilizado, en rangos del 0,3% al 1,5%, dependiendo del catalizador utilizado. La agitación es fundamental para que se haga una mezcla correcta de aceite, catalizador y alcohol en el reactor. Cuando la reacción está finalizando, la agitación debe ser menor, para que el glicerol se pueda separar de la fase éster (García y García, 2007).

La Figura 26 muestra el proceso de transesterificación discontinuo.



Fuentes: García y García, 2007.

Figura 26: Proceso de transesterificación discontinua.

Proceso continuo

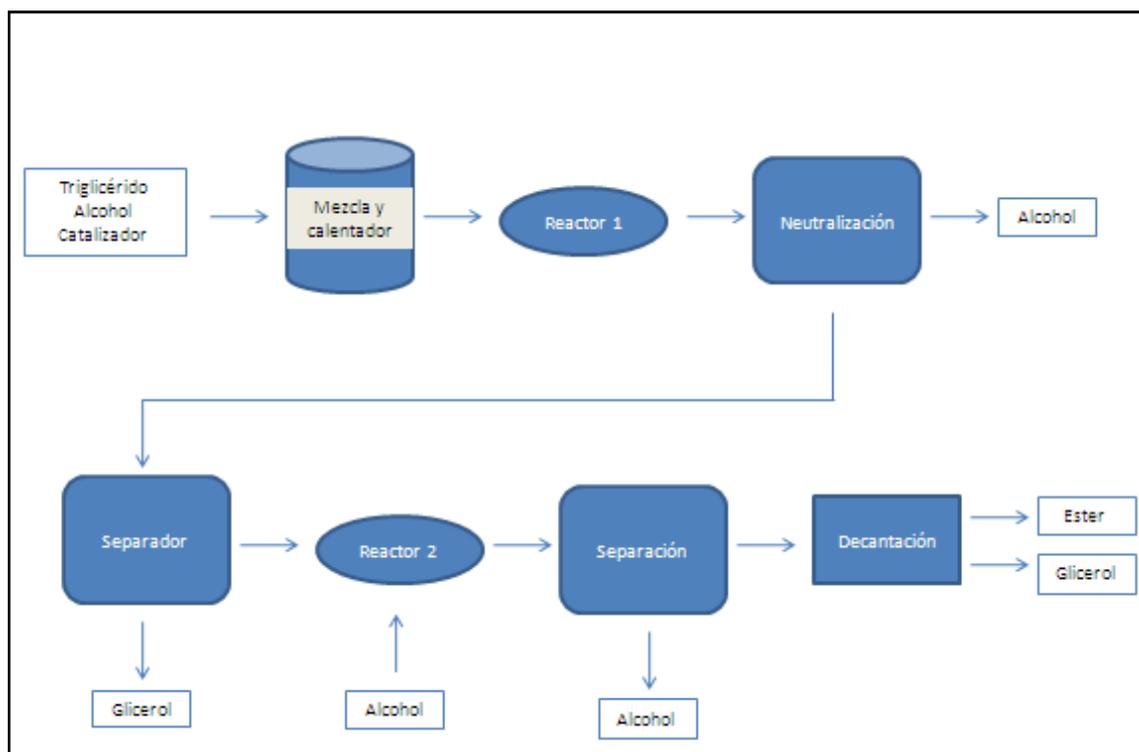
En este proceso, se utilizan reactores continuos, los llamados CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), que son del tipo tanque agitado. Estos reactores pueden ser de distintos volúmenes y así lograr aumentar los resultados de la reacción. Por el mismo motivo, tras la decantación de glicerol en el decantador, la reacción de un segundo CSTR es mucho más rápida (98% de producto de reacción).

Una de las cosas más importantes al diseñar los reactores CSTR, es que la mezcla se realice convenientemente. Producto de esto, aumenta la dispersión del glicerol en fase éster.

El tipo de reactor que se utiliza es el tubular, donde la mezcla se mueve preferentemente en dirección longitudinal, y poca mezcla en dirección axial. Este tipo de reactor de flujo pistón, Plug Flow Reactor (PFR), se comporta como si fueran pequeños reactores CSTR en serie.

Así, se convierte en un sistema en continuo que requiere tiempos de residencia menores, 6 a 10 minutos, de reacción. Este tipo de reactor puede operar a elevada temperatura y presión para aumentar el porcentaje de conversión (García y García, 2007).

Un esquema en qué consiste este proceso, es el que se ilustra en la figura 27.



Fuente: adaptación de García y García, 2007.

Figura 27: Proceso de transesterificación continua.

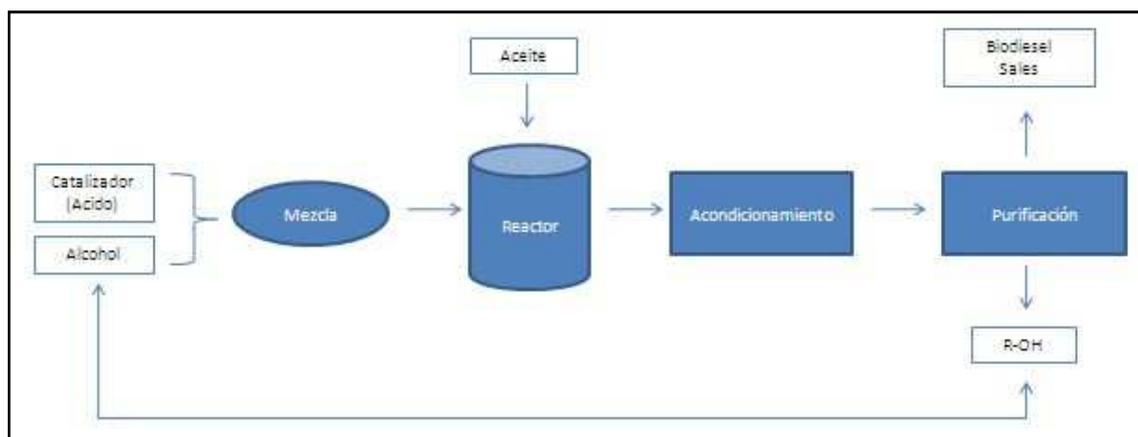
Proceso de Esterificación

Es uno de los procesos más comunes. Consiste en el calentamiento de la mezcla entre un alcohol y un ácido (generalmente en la esterificación se utilizan catalizadores ácidos) con ácido sulfúrico.

En este caso, el ácido sulfúrico es utilizado como catalizador y también como sustancia higroscópica, la que absorbe el agua que se forma durante la reacción. Algunas veces se sustituye por ácido fosfórico concentrado.

Según García y García (2007), en la práctica este procedimiento tiene varios inconvenientes. El alcohol puede sufrir reacciones de eliminación formando olefinas, esterificación con el propio ácido sulfúrico o de formación del éter y el ácido orgánico puede sufrir decarboxilación.

La figura 28 es un esquema de este proceso.



Fuente: adaptación García y García, 2007.

Figura 28: Proceso de Esterificación.

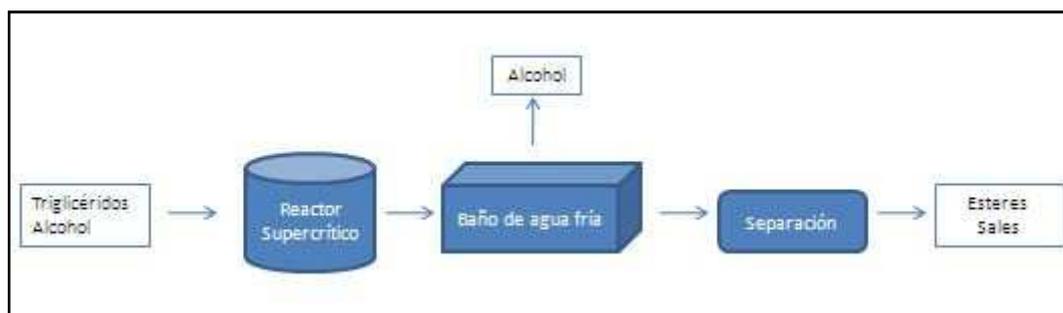
Proceso en condiciones Supercríticas

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 superácidos (García y García, 2007).

En estudios realizados usando este tipo de transesterificación, el procedimiento fue colocar el etanol y el aceite de palma refinado en un reactor de tipo tubular. Luego, el reactor fue colocado dentro de un horno, el cual había sido precalentado para tener la temperatura de reacción deseada. Los experimentos fueron realizados generalmente en condiciones críticas por encima de la temperatura y presión del etanol, los cuales fueron más de 243°C y 6.38 MPa, respectivamente. La reacción fue llevada a cabo por un tiempo de duración específica entre 2 a 30 min. Una vez que el tiempo de la reacción fue alcanzado, la reacción fue apagada inmediatamente por inmersión del reactor dentro de un baño de agua fría. Posteriormente, los productos fueron removidos del reactor tubular y el exceso de etanol, fue removido por evaporación. El resto de los productos formaron una solución de dos capas. La capa superior contenía biodiesel y aceite que no reaccionó. En la capa inferior quedó lo no deseado, el glicerol (Keat *et al*, 2009).

A pesar de lo interesante de los resultados obtenidos con este proceso, los costos de instalación y de operación son bastante elevados y la energía consumida es mayor, lo que hace difícil su implementación a nivel industrial (García y García, 2007).

La figura 29 muestra cómo sería este proceso.



Fuente: adaptación García y García, 2007.

Figura 29: Proceso Supercrítico.

BIBLIOGRAFIA

- Anónimo. 2011a. Lavado biodiesel. Disponible en: <http://es.journeytoforever.org/biocombustibles/lavado-biodiesel.cgi#lavado-agitacion> . Leído el 20 de Mayo 2011.
- Anónimo. 2011b. Peter Hiller se asocia con los Cueto y Enap para construir una planta biodiesel. Diario El Mercurio, sección Economía y Negocios. Leído el 12 de Marzo de 2011.
- COBAL, 2011. Biodiesel. Disponible en: <http://www.cobal.cl/biodiesel.html>. Leído 14 noviembre 2011.
- Ganduglia, F., León, G., Gasparini, R., Rodríguez, M., Huarte, G., Estrada, J. y Filgueiras, P. 2009. Manual de biocombustibles (Ed) ARPEL-IIICA. Costa Rica y Uruguay. 206 p.
- García, J. y García, J. 2007. Vigilancia Tecnológica n° 4 Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. CITME, CEIM, Comunidad de Madrid. Madrid. 125 p.
- Goyal, H., Saxena, R. y Seal, D. 2009. Thermochemical Conversion of Biomass to Liquids and Gaseous Fuels. pp 29-44. In: Pandey, A (ed). Handbook of plant-based biofuels. Boca Raton, Florida, EEUU. 297 P.
- Gutiérrez, M. 2006. Combustión y Gasificación de la Biomasa. pp 99-120. In: (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Hervé, J. 2007. Diseño conceptual de una planta de biodiesel. Memoria para optar a título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 144 p.
- Homer, I. 2006. Motores y biocombustibles. pp 149-164. In: (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Homer, I. y Hunter, E. 2007. Biodiesel, métodos artesanales para su fabricación. Antumapu, revista de extensión agropecuaria y medio ambiente. 5 (1): 11-15.
- Keat, L., Meei, G. y Subhash B. 2009. Supercritical ethanol technology for the production of biodiesel: Process optimization studies. The Journal of Supercritical Fluids. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>. Leído el 09 de Marzo de 2011.
- López, H. 2010. Estudio y desarrollo de una planta piloto para la obtención de biodiesel. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10147/1/Mem%C3%B2ria.pdf>. Leído el 20 de Mayo 2011.
- Pedreros, S. 2008. Estudio de viabilidad técnica y económica de una planta de producción de biodiesel. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 77 p.

- Pinto, M. 2006. Bioquímica de la producción de biocombustibles. pp 47-60. *In:* (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Rojo, F. y Acevedo, E. 2006. Biodiesel. pp 83-97. *In:* (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Romano, S. 2005. Biodiesel. pp 11-88. *In:* Combustibles alternativos. Ediciones corporativas, Buenos Aires, Argentina. 189 p.

V. UTILIZACIÓN DE ACEITES EN MOTORES Y CALDERAS

MOTORES

Los biocombustibles pueden ser utilizados en motores a gasolina, llamados también de encendido por chispa o de ciclo Otto, y/o en motores diesel, llamados de autoencendido, de compresión o ciclo diesel. En las actividades silvo-agropecuarias, la fuente energética más importante es el diesel, por lo que podría tener mayor importancia el biodiesel como biocombustible (Homer, 2006).

Los motores realizan un trabajo utilizando la energía aportada por el combustible. El motor de combustión interna es una máquina que transforma el calor desarrollado durante la combustión al interior de un cilindro en el movimiento de un pistón que está en su interior, el que, mediante una biela, transmite movimiento rectilíneo a un eje cigüeñal que lo transforma en movimiento rotatorio (Villa, 2003, citado por Homer, 2006)

Otto y Diesel, son motores cuyos nombres fueron colocados en honor a sus creadores. El primero, en 1876, construyó el primer motor de combustión interna, el que posteriormente fue desarrollado por G. Daimler, quien hizo que mediante el empleo de gasolina, se transforme la energía química en mecánica. El segundo, en 1880, diseñó un nuevo motor de combustión interna que utilizaba petróleo diesel.

La gran diferencia entre los dos sistemas, es que el motor diesel tiene un encendido por compresión, en donde el aire comprimido en la cámara de combustión tiene una temperatura tan elevada, que al inyectarle el petróleo, éste explota. Mientras que el motor Otto, tiene encendido por chispa, en donde la mezcla de aire y gasolina que hay en la cámara de combustión, necesita un elemento adicional para encenderse, el cual sería la chispa provocada por la bujía.

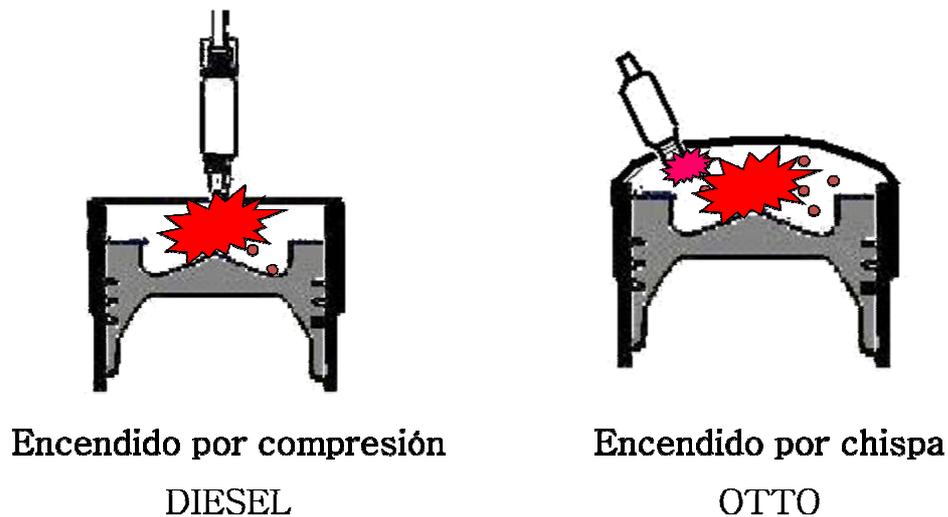


Figura 30: Esquema de encendido por compresión y por chispa.

Muchas veces se ha leído o escuchado hablar de los Octano o Cetano de un combustible, ¿pero que son estos índices? Los índices Octano y Cetano son índices para cuantificar el comportamiento de los combustibles, según se trate de gasolina o diesel, respectivamente. A continuación se explica las características de cada uno:

- Octano: mide la capacidad de una gasolina para resistirse a que se inicie el proceso de combustión de la misma (con O_2) a pesar de haber alcanzado la temperatura de auto-combustión. Es una comparación entre la resistencia a la combustión que opone el Iso-Octano (2 dimetil-4-metil pentano), al que se le asigna un valor de 100, es decir, mucha resistencia, y el Heptano (C_7H_{16}), que es muy poco resistente y el asigna un valor 0. Por ejemplo, una gasolina de 97 Octanos es equivalente a una mezcla de 97% de Iso-Octano y 3% de Heptano.
- Cetano: se utiliza en diesel y mide cuánto tiempo debe transcurrir desde que se inyecta el combustible hasta que se inflama. Así, mientras mayor es el índice, menor es el intervalo. Una combustión de calidad ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante, por dicha razón cuanto más elevado es el número de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión. Por el contrario, aquellos carburantes con un bajo número de cetano requieren mayor tiempo para que ocurra la ignición y después queman muy rápidamente, produciendo altos índices de elevación de presión. Si el número de cetano es demasiado bajo, la combustión es inadecuada y da lugar a ruido excesivo, aumento de las emisiones, reducción en el rendimiento del vehículo y aumento de la fatiga del motor. Humo y ruido excesivos son problemas comunes en los vehículos diésel, especialmente bajo condiciones de arranque en frío.

Los motores diesel pueden ser de inyección directa a la cámara de combustión en el pistón ó de forma indirecta o en pre-cámara, como se aprecia en la figura 31:

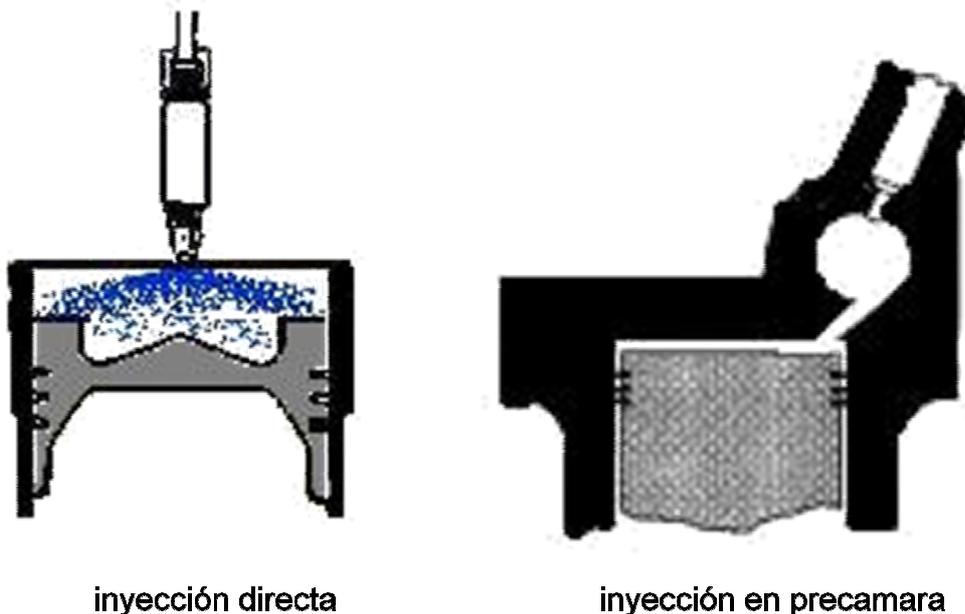


Figura 31: Esquema de inyección directa y de pre cámara.

Fuente: Homer, 2006.

Cuadro 19: Diferencias entre inyección directa y de pre cámara

Tipo de inyección	INYECCION DIRECTA	INYECCION EN PRE-CÁMARA
Características	Permiten ahorrar combustible superior al 10%, por eso han sido los de mayor desarrollo en el último tiempo. Este tipo de motor consiste en que se inyecta el combustible en la cámara de combustión que se encuentra en una cavidad en la parte superior de pistón.	El combustible no se inyecta en una concavidad del pistón, sino que éste es inyectado en una concavidad en la parte inferior de la culata, lugar donde se inicia la combustión. Lo que ocurre es que se produce un “chorro” de gases incandescentes sobre una pequeña concavidad del pistón, dando origen a una turbulencia.
Utilización	Se utiliza en motores de cilindrada alta, superior a 2500cc, y velocidad de giro más lenta.	Se utiliza en motores de cilindrada media a baja y alta velocidad de rotación (3.500 a 4.00 rpm en automóviles y 2.500 a 3.00 rpm en tractores)

Fuente: Homer, 2006.

BIOCOMBUSTIBLES

Para poder utilizar los biocombustibles en los motores convencionales diesel, se puede usar los aceites vegetales o producir los esteres metílicos de los aceites vegetales para su utilización como combustible, es decir, como biodiesel. A su vez, el biodiesel puede usarse puro, como es el caso de Brasil y EE.UU, o mezclado con diesel convencional, que es la forma de utilización más común.

Para que el uso de aceites en los motores tenga éxito, se debe lograr que los motores no sufran grandes modificaciones, la potencia y el consumo no sean muy afectados y no presente problemas a largo plazo. La elevada viscosidad es el gran problema para su uso en motores diesel (16 veces mayor que el petróleo). Esta situación afecta la fluidez del aceite, especialmente en frío, su inyección y, por lo tanto, su combustión.

Utilización directa de aceites vegetales

El uso directo en motores de aceites vegetales, presenta una serie de inconvenientes por la naturaleza de los aceites vegetales, ya que éstos requieren de una preparación, la cual consiste en un desgomado y filtración previos (López, 2010).

En el capítulo sobre Biodiesel, la Figura 5 explica la forma de obtener el aceite refinado del cultivo oleaginoso, luego de los procesos de extracción y refinado del aceite.

La Figura 32 muestra un pequeño esquema de posibilidades de uso de los aceites vegetales como combustibles.



Fuente: adaptación de López, 2010.

Figura 32: Uso de los aceites vegetales como combustibles.

Esta situación sería la adecuada para la utilización en calderas, debido a que éstas no son tan exigentes como los motores en viscosidad u otros parámetros, por lo cual no valdría la pena realizar transformaciones como la transesterificación.

Dilución del aceite

En capítulos anteriores se ha hablado que para la transformación del aceite, lo más utilizado mundialmente es la transesterificación, que da origen al biodiesel. Sin embargo, existe un segundo método para adaptar el aceite al motor. Éste consiste en cortar las cadenas de aceite añadiendo parafina en proporción de 10-40% (se recomienda 20%). Además el motor funciona mejor si es encendido y apagado con biodiesel o diesel, facilitando su encendido y limpieza. La viscosidad del aceite se puede disminuir si se mezcla con diesel, pero a niveles de 25% de aceite en la mezcla es necesario disponer de un sistema de inyección especial que pueda operar con combustible de mayor densidad. Otra alternativa interesante, sobre la que se experimenta, son las mezclas de aceites vegetales con gasolina ($\approx 14\%$) y etanol ($\approx 5\%$). Estas mezclas se pueden utilizar como carburante de los motores diesel de manera directa, con resultados similares al que se obtiene con el gasóleo comercial y sin que se lleguen a producir depósitos anormales en las cámaras de combustión (Homer 2006). En el Cuadro siguiente, se muestra que aunque logran bajar la viscosidad, ésta aún se encuentra en niveles altos

Cuadro 20: Comparación de las viscosidades obtenidas en un aceite nuevo versus el diesel (100%)

Aceite	Viscosidad %
Aceite nuevo	892,0
Aceite transesterificado (metiléster)	119,6
Aceite+20% parafina	458,6
Aceite+15% gasolina+ 5% alcohol etílico	345,0
Diesel	100,0

Fuente: Homer y Hunter, 2011.

Metiléster o biodiesel

El uso de biocombustibles en un motor diesel, implica que éste debe mezclarse con petróleo diesel, en un volumen no mayor del 15%, con el fin de no realizar mayores modificaciones a los motores, principalmente en la bomba inyectora. A pesar de eso, con un contenido superior al 5%, se debe tener la precaución de reemplazar los elementos que tengan goma y que estén en contacto con el biodiesel, como los conductos del combustible, y revisar continuamente los filtros de petróleo, ya que el biodiesel tiene un efecto de limpieza que puede provocar que se desprendan depósitos o incrustaciones antiguas en el sistema de combustible, los cuales podrían taponar los filtros (Homer, 2006).

En los capítulos respectivos, se ha tratado previamente con bastante detalle las condiciones y metodologías para su transformación.

Hoy en día, los estudios e investigaciones están enfocados en encontrar biocarburantes que puedan adaptarse a los motores actuales sin tener la necesidad de modificar éstos. Para ello, es necesario conocer el efecto de los biocarburantes con respecto a:

- El comportamiento de los motores que los utilizan a corto y largo plazo;
- La composición de las emisiones en forma de gases de escape;
- Sobre los materiales con los que están en contacto.

ADAPTACIONES DEL MOTOR PARA ACEITES Y/O BIODIESEL

Los combustibles de origen vegetal se pueden utilizar directamente en los motores ó bien en mezclas con diesel. Sin embargo, el problema que ocurre al momento de la inyección, es debido a la diferencia de viscosidad cinemática

El uso directo en motores de aceites vegetales, presenta una serie de inconvenientes por la naturaleza de los aceites vegetales, ya que éstos requieren de una preparación, la cual consiste en un desgomado y filtración previos (López, 2010)

La principal limitante como se comentó recién, ocurre al momento de la inyección, debido a la diferencia de viscosidad cinemática que existe entre el biodiesel (65,8 cSt a 20°C) y el diesel (5,1 cSt a 20°C), siendo este problema más notorio en motores de inyección directa. Las mezclas del producto vegetal con diesel permiten, modificando las proporción de sus componentes, mantener la viscosidad, el índice de cetano y el comportamiento en frío dentro de límites aceptables (Homer, 2006).

Por otro lado, la alternativa de la transformación de estos aceites a metilésteres, permite tener características físicas y físico-químicas parecidas al diesel, con el que pueden mezclarse en cualquier proporción y utilizarse en vehículos diesel convencionales, sin necesidad de introducir modificaciones en el diseño básico del motor. Sin embargo, cuando se emplean mezclas de biodiesel en proporción superior al 5%, es preciso reemplazar los conductos de goma del circuito del combustible por otros como el teflón blindado, caucho fluorado o poliamidas, debido a que el biodiesel es más corrosivo que el diesel. Además, como tiene capacidad de limpieza, puede producir al inicio de su utilización un desprendimiento de incrustaciones tanto en el tanque de combustible como en los conductos, lo que implica que se deban cambiar con mayor frecuencia los filtros de combustible para que no se afecte la bomba de inyección o el propio motor.

Como ya se dijo anteriormente, la naturaleza de los aceites vegetales hace que su utilización presente muchos inconvenientes. Por lo tanto, su utilización sin transformar hace que sea necesario la transformación de los motores o bien utilizar motores Elsbett (Elsbett Konstruktion) y el motor tipo W de Deutz-Fahr.

El motor **Elsbett** puede funcionar con aceites vegetales, diesel mineral, biodiesel o cualquier mezcla de los tres (Homer, 2006). Éste es un motor adiabático, es decir, que intercambia muy poco calor con el medio, y de esa manera evita entre un 25% y un 50% de las pérdidas de energía a través del sistema de refrigeración. Este motor tiene un número bajo de piezas, volumen y peso. No dispone del convencional sistema de enfriamiento, lo que le permite trabajar a temperaturas más altas, y así, un rendimiento termodinámico más eficiente. Otra característica importante de este motor, es que quema la totalidad del combustible, lo que hace que se considere como un motor prácticamente limpio, porque al quemar todo el aceite vegetal, no libera dióxido de azufre.

Según Márquez (1995), la consecuencia de lo antes descrito, es que los motores funcionan sin inconvenientes, con buen rendimiento termodinámico, ya sea utilizando diesel o aceites vegetales brutos, sin que aparezcan problemas cuando la viscosidad del combustible varía entre límites tan amplios como 2 y 40-45 cSt a 40°C.

El motor tipo **W de Deutz-Fahr**, es uno de los fuertes en el sector mundial de motores. Este tipo de motor tiene un procedimiento el que es llamado “combustión en dos etapas”. La combustión en dos etapas es una característica de los motores con precámara:

- Primera fase: se realiza la combustión en la precámara, que es en la que se produce la inyección, con un exceso de combustible y escasez de oxígeno, lo que dificulta la formación de NO_x.
- Segunda fase: la combustión se realiza a baja presión y temperatura, en la cámara principal en la que se encuentra el pistón. El exceso de aire en la misma y el efecto de turbulencia generado, favorece la combustión completa con bajas emisiones de residuos tóxicos.

Para poder llevar a la práctica un motor de tipo W, y usando como carburantes distintos tipos de aceites vegetales brutos, el Grupo KHD, al que pertenece Deutz-Fahr, apoya un sistema que ha llamado “Régimen dual Deutz-Hankelhausen”, que consiste en incorporar a los motores:

- Una bomba de impulsión de combustible del tipo de émbolos, adaptada a la mayor viscosidad del aceite.
- Sistema de precalentamiento del aceite, que puede ser:
 - ❖ Mediante calentamiento eléctrico del depósito;
 - ❖ Mediante la colocación de intercambiadores de calor en el depósito con el empleo del aceite para la refrigeración del motor;
 - ❖ Utilizando intercambiadores con el calor producido por el motor (Márquez, 1995).

PROBLEMAS EN EL MOTOR POR EL USO DE BIODIESEL

El desempeño del motor diesel se evalúa en base a las siguientes características:

- Facilidad de arranque
- Desarrollo de potencia
- Nivel de ruido
- Economía de combustible
- Desgaste (lubricidad)
- Operatividad a baja temperatura
- Duración del filtro y emisiones de escape

Por lo tanto, si se evalúa el funcionamiento del motor, según esas características, éste depende del diseño del motor y el combustible.

Hay una serie de problemas potenciales al motor cuando se utiliza biodiesel neto o en mezclas, siendo algunas de ellas las que se describen a continuación, y además se muestran algunas imágenes en el apéndice I.

- Taponamiento y obstrucción de filtros
- Bloqueo de toberas y orificios de inyección y de conductos, pasajes y drenajes del sistema de alimentación de combustible
- Aumento de la presión de inyección con excesiva caída de presión
- Pegado y rotura de anillos de pistón
- Formación de depósitos sobre inyectores, pistones y ranuras de pistón
- Atascamiento de la bomba de combustible por viscosidades altas
- Escasez de alimentación de combustible al motor (caída de la potencia) por viscosidades altas
- Desgaste acelerado de válvulas, agujas y pistones de la bomba de inyección y de los inyectores.
- Corrosión de metales
- Degradación severa del aceite lubricante: disminución inicial de viscosidad, seguida de un aumento después de varias horas. Disminución del número básico y aumento del número ácido
- Remoción de suciedades incrustadas en el tanque y en el sistema de alimentación de combustible
- Problemas de arranque y operación en frío
- Hinchamiento, endurecimiento y fragilización de sellos, tuberías, juntas, etc., recubrimientos de cables eléctricos y pegamentos.

Las causas de estos problemas se pueden atribuir a algunas propiedades del biodiesel, como por ejemplo:

- Formación de depósitos por exceso de metales formadores de cenizas
- Abrasión por cenizas
- Formación de sedimentos por polimerización o cristalización de moléculas pesadas
- Cristalización y gelificación a bajas temperaturas
- Oxidación, polimerización y degradación a ácidos, aldehídos y cetonas
- Hidrólisis de los ésteres con formación de ácidos libres
- Acumulación de agua, crecimiento microbiano y formación de lodos asociados
- Baja volatilidad del combustible (Saucedo, 2006).

Finalmente, para que el biodiesel sea de buena calidad, debe cumplir ciertos criterios específicos, como conversión completa de los triglicéridos a mono-álquil ésteres; remoción completa de la glicerina producida, el catalizador y el exceso de alcohol; ausencia de ácidos grasos libres; y limitación de los ésteres poli-insaturados.

Respecto al punto de conversión completa de triglicéridos a mono-álquil ésteres, el Cuadro 21 muestra los porcentajes de conversión de triglicéridos a monoglicéridos.

Cuadro 21: Porcentaje de conversión de triglicéridos a monoglicéridos

Contenido	%
Glicerina total	$\leq 0,25$
Triglicéridos	$\leq 0,2$
Diglicéridos	$\leq 0,2$
Monoglicéridos	$\leq 0,8$
Esteres mono alquílicos	$>96,5$

Fuente: Saucedo, 2006.

BIBLIOGRAFIA

- Homer, I. 2006. Motores y biocombustibles. pp 149-164. *In:* (Ed) Agroenergía: un desafío para Chile. Serie Ciencias Agronómicas N° 11. Santiago, Chile. 176 p.
- Homer, I y Hunter, E. 2011. Comparación de diferentes métodos artesanales para la obtención de biodiesel. SIMIENTE (IN PRESS)
- López, H. 2010. Estudio y desarrollo de una planta piloto para la obtención de biodiesel. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10147/1/Mem%C3%B2ria.pdf>. Leído el 02 de Abril de 2011.
- Márquez, L. 1995. Los biocarburantes: limitaciones y perspectivas. pp. 65-104. *In:* Sánchez, F. Energías renovables. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. España. 237p.
- Saucedo, E. 2006. Calidad del biodiesel y desempeño de los motores: presentación de la norma UNIT 1100:2005 Biodiesel (B100)- Combustible para mezcla con destilados medios del petróleo. Disponible en: http://www.unit.org.uy/misc/novedades/biodiesel_saucedo.pdf. Leído el 26 de Junio de 2011.

CONSIDERACIONES FINALES

Los biocombustibles han surgido por la necesidad del hombre de buscar formas de energía alternativas a los combustibles fósiles, ya que actualmente han subido sus precios de manera sostenida y porque el medio ambiente necesita urgentemente un cambio en las formas de energía, que contaminen menos y que sean más amigables con él mismo.

Los recursos naturales renovables aparecen como la alternativa más real para reemplazar a los combustibles tradicionales.

Un tipo de biocombustible, es el biodiesel. Es un biocombustible líquido, el cual destaca por el gran impulso que hoy en día tiene a lo largo del mundo. Este tipo de biocombustible tiene como materia prima principal los aceites vegetales. Sin embargo, hoy en día existen otras fuentes de aceite, como las algas marinas, grasa animal, desechos agrícolas, aceites usados, residuos forestales, etc.

En Chile, el tema de los biocombustibles, y el biodiesel específicamente, aún es un asunto de investigación. Un ejemplo de ello, es lo que está realizando actualmente la Universidad de Antofagasta, junto con otras organizaciones, donde investigan la capacidad de producción de aceite de las microalgas.

Existen varios estudios sobre la potencialidad de algunos cultivos como materia prima de biodiesel y la superficie agrícola que se pudiese destinar para eso, como es el caso del estudio realizado por CIREN.

En Chile aún no hay muchos incentivos para invertir en esta alternativa al diesel, y a pesar de que los biocombustibles están exentos del impuesto específico (siempre y cuando la mezcla no exceda del 5% de metilester), el biodiesel sería más caro que el diesel tradicional según diferentes estudios, ya que su producción es mucho más cara y de alguna manera el consumidor tendría que pagar ese costo.

Cabe destacar que existe otro punto de vista sobre la bioenergía, y es el factor social. A pesar de las ventajas que significa utilizar los recursos naturales renovables como materia prima de biocombustibles, hay muchas agrupaciones que no están de acuerdo con el desarrollo de este tipo de combustibles en desmedro de la naturaleza y/o de la alimentación humana, ya que una parte de las cosechas estaría destinada a la industria de los biocombustibles y no hacia la alimentación propiamente tal, o bien por el uso de la superficie disponible para fines no alimentarios.

Es por esto que hoy en día se busca producir aceite vegetal de cultivos específicos para la industria de los biocombustibles. Sin embargo, esto genera a su vez necesidad de terrenos para poder cultivarlos, lo cual desplazaría cultivos tradicionales y/o praderas.

A raíz de esta problemática es que se está potenciando aquellas fuentes de materias primas que no compitan por alimentos y que se puedan implementar en terrenos degradados o no agrícolas, siendo los residuos agrícolas y/o forestales una alternativa con bastante potencial. Pero este potencial no puede ir en desmedro del uso que se le da a estos residuos actualmente, como coberturas vegetales mínimas, para no afectar la fertilidad y la erosión.

Finalmente, se puede decir que la producción de biodiesel es una alternativa viable, más limpia y sobre todo, que proviene de recursos renovables. Sin embargo, Chile aún tiene un largo camino que recorrer en este tema. También hay que decir que el biodiesel es el biocombustible más fácil de realizar, ya que no se necesita una gran instalación para poder producirlo, puesto que cualquier pequeño productor puede hacer su propio biodiesel de sus residuos agrícolas u otra materia prima, lo que no ocurre con los otros tipos de biocombustibles, donde los procesos de obtención son más complejos de realizar.

Como desafíos, Chile debe proponerse lograr la producción de biocombustibles de segunda generación que sean amigables con el medio ambiente, a precios competitivos y que permitan diversificar la matriz energética incorporando energías renovables.

VI. ANEXOS

ANEXO I: NORMAS Y REGLAMENTOS DE BIOCOMBUSTIBLES

1. DS 11/2008, del Ministerio de Economía. Define las especificaciones de calidad para biodiesel y bioetanol, autoriza la mezcla de 2% y 5% con petróleo diesel y gasolina respectivamente y anuncia el registro de personas e instituciones en la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
2. Circular N° 30/2007, del Servicio de Impuestos Internos. Indica que los biocombustibles no son afectos al impuesto específico según Ley 18.502/1986.
3. Resolución N° 2443/2007, del Servicio Agrícola y Ganadero, autoriza el uso de gasolina como desnaturalizante del alcohol etílico, para la obtención de bioetanol de uso vehicular.
4. Resolución 746/2008, SEC. Establece protocolos de normas técnicas para el análisis y/o ensayos para bioetanol y biodiesel.
5. Decreto N° 128/2008, del Ministerio de Minería. Crea la Comisión Asesora Interministerial para los Biocombustibles.
6. Resolución N° 142/2009, del Ministerio de Economía, establece procedimiento para la inscripción de personas y empresas que ejecuten actividades relacionadas con biocombustibles.
7. Ley N° 20.339/2009 que modifica el DFL N° 1/1979 del Ministerio de Minería, incorpora los biocombustibles como combustible líquidos y otorga facultades a la SEC para su fiscalización.
8. Decreto N° 160/2009 que modifica el decreto N° 90/1996 del Ministerio de Economía, que reglamenta la seguridad en las instalaciones y las personas que operan los combustibles líquidos.

ANEXO II: BOLETÍN N° 4.873-08

Proyecto de ley, iniciado en moción de los Honorables Senadores señores Chadwick, Coloma, Gómez, Orpis y Pérez Várela, sobre fomento de las energías renovables y combustibles líquidos.

Artículo 1.- Disposición de uso. El diesel y la gasolina utilizada en el sector transporte que se expendan a público en estaciones de servicios, o en venta de volúmenes mayores directamente a estanques de almacenaje de operarios del rubro transporte, deberá contener un porcentaje mínimo obligatorio de biocombustibles. El contenido mínimo de biodiesel en el diesel será de un 5% y el contenido mínimo de etanol en las gasolinas será de un 5%.

Artículo 2.- Definición de normas. La definición de los parámetros de los biocombustibles en forma pura, y la en mezcla resultante, serán fijados por decreto. La norma definirá los biocombustible a través de sus componentes y sus características físico-químicas y determinará los parámetros máximos y mínimos que deberán tener los combustibles que resulten de las mezclas con biocombustibles, de acuerdo a lo establecido en el artículo 1°.

Artículo 3.- Fiscalización. El sistema de producción, transporte y comercialización de biocombustible se regirá por las mismas normas y reglamentos indicados para los combustibles fósiles y derivados del petróleo y será fiscalizada por los organismos pertinentes encargados de cada materia involucrada en la cadena que va desde la producción a la comercialización en detalle a público.

Artículo 4.- Calendario de aplicación biodiesel. El uso obligatorio de biodiesel tendrá una escala gradual de aplicación que será la siguiente:

Año	Porcentaje de uso obligatorio	
2010	2	Volumen/Volumen
2011	3	Volumen/Volumen
2012	4	Volumen/Volumen
2013	5	Volumen/Volumen

Artículo 5.- Calendario de aplicación etanol. Para el uso obligatorio de etanol se aplicará el siguiente calendario de aplicación.

Año	Porcentaje de uso obligatorio	
2010	5	Volumen/Volumen

Artículo 6.- Reconocimiento a la sustitución: Se establecerá un reconocimiento a la sustitución de importación de combustibles basados en carbono fósil realizado por cultivos dedicados a obtener biocombustibles en el país. Este reconocimiento valorará especialmente a los biocombustibles que se produzcan con granos comprobadamente de origen nacional. Para estos efectos, el elaborador de biocombustible deberá demostrar el origen del grano con la facturación de compra, lo que dará origen a un volumen de biocombustible producido que se trasladará en la cadena hasta el distribuidor minorista.

ANEXO III: PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN BIOCOMBUSTIBLES

Nombre del Proyecto	Universidad o Centro de investigación	Investigador Responsable	Mail
Desarrollo de un paquete tecnológico para producir bioenergía a partir de algas	Universidad de Tarapacá	Carmen Gloria Seguel	cseguel@uta.cl
Utilización de Brassica Napus para la producción de Biodiesel: Desarrollo y optimización del proceso	Universidad la Frontera	Robinson Betancourt	rbeta@ufro.cl
Optimización y mejoramiento biotecnológico de las condiciones de cultivo de la microalga verde botryococcus braunii para la obtención de bio-hidrocarburos.	Universidad de Antofagasta	Mariella Rivas	mrivas@uantof.cl
Evaluación agronómica de jatropha curcas I. Como materia prima para producir biodiesel bajo condiciones edafoclimáticas de Chile semiárido	INIA		
Diversificación de la matriz energética con un modelo local de desarrollo sustentable basado en bietanol a partir de nabo forrajero en la patagonia	INIA Tamel Aike		
Biofuels Assessment on Technical Opportunities and Research Needs for Latin America	Universidad Católica de Valparaiso	German Aroca	garoca@ucv.cl
Optimización del proceso de tratamiento de lignocelulosas con miras a la obtención de bioetanol		René Julio Carmona Ricardo Silva Soto	recarmon@uchile.cl rsilva@uchile.cl
Producción de Biomasa con fines bioenergéticos		Edmundo Acevedo Hinojosa	eacevedo@uchile.cl
Diplomado de Postítulo en Bioenergía		Misael Gutiérrez	m Gutierr@uchile.cl

Fuente: CNE, 2011.

ANEXO IV: CONSORCIOS DE BIOCOMBUSTIBLES

- Hay dos consorcios para la producción de biocombustibles a partir de material lignocelulósico (2008). Financiamiento: más de US\$7 millones

Consortio	Tipo	Integrantes
BIOCOMSA	Lignocelulosa	ENAP Refinerías Universidad de Chile Consortio Maderero http://www.consorcibiocomsa.cl
BIOENERCEL	Lignocelulosa	Universidad de Concepción Universidad Católica de Valparaíso Fundación Chile CMPC Celulosa S.A. Masisa S.A. http://www.bioenercel.com/

Fuente: Viviana Avalos (CNE), 2010.

- Hay tres consorcios para la producción de biocombustibles a partir de micro y macro algas (2010). Financiamiento: US\$19 millones aprox.

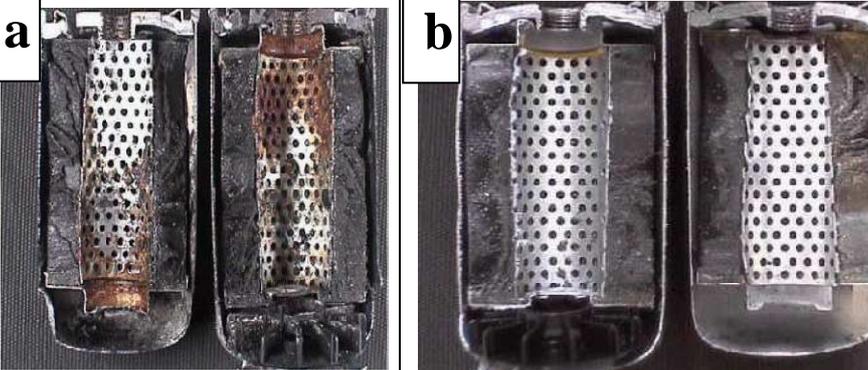
Consortio	Tipo	Integrantes
ALGAEFUEL	Micro algas	Edelnor Copec Rentapack Bioscan Universidad Católica de Chile
DESERT BIOENERGY	Micro algas	Universidad de Antofagasta Electroandina S.A. Prodalmar Ltda. Molinera Gorbea Ltda. Universidad de la Frontera CICITEM
BAL BIOFUELS	Macro algas	BAL Chile Enap Refinerías Bio Architecture Lab Universidad de Los Lagos

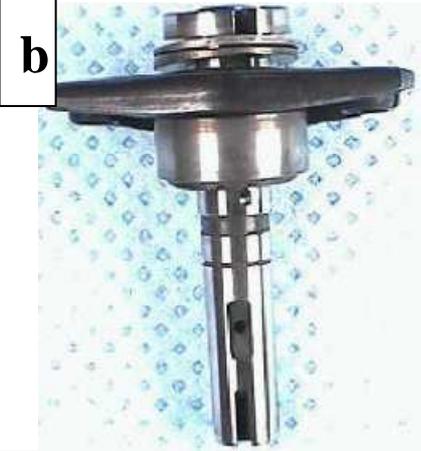
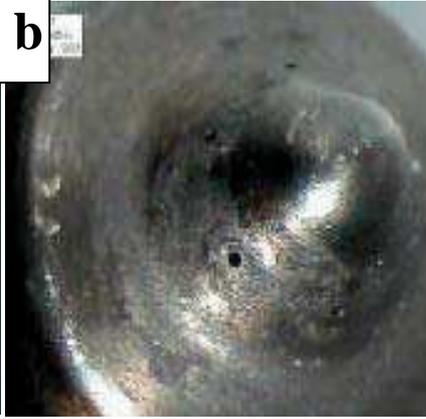
Fuente: Viviana Avalos (CNE), 2010.

VII. APÉNDICES

APÉNDICE I: DAÑO EN MOTORES POR USO DE BIOCOMBUSTIBLE

Fuente: Saucedo, 2006

<p>Depósitos insolubles de productos de envejecimiento del biodiesel</p>	
<p>Hinchamiento de elastómeros (O-Ring de caucho nitrilo deformado)</p>	
<p>Oxidación por agua libre (Eje de accionamiento y embrague de bomba distribuidora oxidados)</p>	
<p>Oxidación y taponamiento de filtros a) Éster metílico de raps b) Diesel</p>	

<p>Laqueado de piezas</p> <p>a) laqueado por sustancias insolubles de la polimerización del biodiesel</p> <p>b) Pistón nuevo</p>	<p>a</p> 	<p>b</p> 
<p>Corrosión por ácidos</p> <p>(Piezas de latón atacadas por el ácido fórmico producido en la degradación de los ésteres metílicos de raps.)</p>		
<p>Depósitos sobre el inyector de combustible</p> <p>a) Ester metílico de soya</p> <p>b) Diesel, 200 hrs de operación</p>	<p>a</p> 	<p>b</p> 
<p>Depósitos sobre el inyector de combustible</p> <p>a) Biodiesel de raps</p> <p>b) Diesel</p>	<p>a</p> 	<p>b</p> 

APÉNDICE II: GLOSARIO

- **Agua y sedimentos:** el nivel establecido, es el mismo del diesel convencional. El agua se puede formar por condensación en el tanque de almacenamiento. El exceso de agua puede causar corrosión y generar un ambiente ideal para la proliferación de microorganismos. La presencia de agua y sólidos de desgaste, normalmente, pueden colmatar filtros y darle al combustible propiedades de lubricidad menores. El biodiesel puede absorber hasta 40 veces más agua que el diesel. La oxidación puede incrementar el nivel de sedimentos. El hecho que haya agua en el motor, puede atacar los tanques de almacenamiento, ya que el agua se acidifica. Los microorganismos que se forman, producen limos y lodos, colmatando los filtros. Además, algunos de estos microorganismos pueden convertir el azufre que posea el combustible en ácido sulfúrico, que corroe la superficie metálica del tanque. Respecto al agua en el tanque, puede presentarse de dos formas: disuelta en el combustible o separada de la fase de combustible en forma libre. En el primer caso, la cantidad de agua, depende de la solubilidad de ésta en el biodiesel. Y en el segundo caso, depende de cómo se manipule y transporte el combustible. La presencia de sedimentos, depende de la insaponificables en la materia prima y proceso de producción, es decir, un mal proceso de purificación del combustible o contaminación. Afectan principalmente a la temperatura de cristalización y al número de cetano (NC).

- **Azufre:** protege el sistema catalítico del escape. El biodiesel generalmente contiene menos de 15 ppm de azufre. Un valor alto indicaría contaminación del biodiesel y provocaría mayores emisiones de SO₂. Contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor. También pueden afectar al funcionamiento del sistema de control de emisiones y a límites medioambientales.

- **Cenizas sulfatadas:** los materiales que forman cenizas pueden presentarse en el biodiesel de diferentes maneras:
 - 1) Sólidos abrasivos
 - 2) Jabones metálicos solubles
 - 3) Catalizadores no removidos

Los sólidos abrasivos y los catalizadores no removidos pueden afectar los inyectores, filtros y bomba de inyección, generar desgaste en los pistones y anillos, y depósitos en el motor. Por otro lado, los jabones metálicos solubles tienen poco efecto en el desgaste, pero pueden afectar los empaques, contribuir al taponamiento de filtros y generar depósitos en el motor.

- **Contenido de agua:** el biodiesel tiene propiedades higroscópicas, por lo que puede absorber pequeñas cantidades de agua en la atmósfera. Un exceso de agua en el biodiesel puede ocasionar problemas de hidrólisis (aparición de ácidos grasos libres).

- **Contenido de éster (min):** valores inferiores a la especificación indican reacción incompleta/presencia de aceite. Provocará alta viscosidad, disminución del efecto spray, aumento de carbonilla, combustión deficiente.
- **Contenido de éster metílico poli-insaturado (4 ó más dobles enlaces):** depende de la materia prima. Altos valores favorecen los procesos de polimerización que provocan depósitos y deterioran el aceite lubricante.
- **Contenido de mono y diglicérido:** depende del proceso. Indica reacción incompleta, ya que son restos de aceite que no ha terminado de reaccionar. Valores altos provocan depósitos, en inyectores, cilindros, etc., y cristalización.
- **Contenido de triglicéridos:** depende del proceso. Un alto valor, indica presencia de aceite o grasa sin reaccionar. Ocasionará elevada viscosidad de biodiesel y depósito en cilindros y válvulas.
- **Corrosión a la lámina de cobre:** indica dificultades con componentes de bronce, latón o cobre de los vehículos. Mediante la comprobación del desgaste de una lamina de cobre se puede observar si existen en el sistema compuestos corrosivos y/o presencia de ácidos que pueden atacar al cobre o a aleaciones de cobre como el bronce que forman parte del sistema de combustible. Altos valores provocarían problemas de corrosión durante el almacenaje y en el motor.
- **Densidad:** es la relación que existe entre masa de un líquido y la unidad de volumen, a una temperatura determinada. Da idea del contenido energético del combustible. Es así que a mayor densidad, mayor es la energía térmica y una mejor economía del combustible. La densidad depende del aceite de partida y del proceso de transesterificación. Un valor bajo indica excesivo resto de alcohol.
- **Estabilidad a la oxidación (a 110°C):** determina la vida de almacenamiento y la degradación potencial de un combustible durante su almacenaje. Su valor depende de la materia prima y proceso de producción. Es permitido utilizar aditivos para mejorar este parámetro. La oxidación de un combustible suele venir acompañada de la formación de gomas solubles e insolubles, las cuales pueden provocar la formación de depósitos en la punta del inyector y fallos en las boquillas de los inyectores, y provocar problemas de colmatación de filtros, respectivamente. Un valor bajo indica aceite de partida degradado, o degradación del biodiesel en el proceso. Un tiempo inferior al especificado no aseguraría la estabilidad del biodiesel durante su almacenaje y distribución.

- **Éster metílico –ácido linoléico:** depende de la materia prima (contenido de C18:3). Altos valores provocan bajo valor de POFF, bajo número de cetano y alto índice de yodo.
- **Fósforo:** ayuda a prevenir daños en el convertidor catalítico. El fósforo puede deteriorar los sistemas de control de emisiones y tratamiento de gases de escape, razón por la cual su contenido debe ser bajo. Altos valores indican un mal blanqueado del aceite de partida y presencia de insaponificables.
- **Glicerina libre:** determina el nivel de glicerina no enlazada presente en el biodiesel. Su presencia normalmente se debe a una mala purificación del biodiesel. Niveles altos pueden causar problemas de depósitos en el inyector (colmatación de filtros). También, pueden dañar los sistemas de inyección debido a los compuestos inorgánicos y jabones que se acumulan en la glicerina. Si la cantidad de glicerina es superior al 0,5%, ésta puede afectar al contenido del residuo carbonoso.
- **Glicerina total:** determina el nivel de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajo de glicerina total aseguran una alta conversión del aceite o de la grasa hacia su mono-alquil-ésteres. Altos niveles de mono-, di-, y triglicéridos y de glicerina libre pueden causar depósitos carbonosos en los inyectores, colmatación de los filtros y afectar adversamente la operación en climas fríos causando taponamiento de filtros.
- **Índice de acidez:** es importante conocerlo, ya que es una medida de la acidez inorgánica y total del combustible sin uso e indica una tendencia a corroer metales con los cuales puede entrar en contacto. También se lo relaciona con la degradación del combustible en condiciones de servicio. Se utiliza para determinar el nivel de ácidos grasos libres o ácidos de proceso que puedan estar presentes en el biodiesel.
- **Índice de yodo:** es una medida del grado de insaturaciones del combustible y tiene que ver con el comportamiento del mismo durante su almacenamiento, dado que las insaturaciones pueden producir la formación de depósitos. Depende exclusivamente de la materia prima. Este índice mide la cantidad de yodo necesaria para abrir o romper dobles ligaduras de compuestos orgánicos insaturados. Altos valores indican gran presencia de dobles enlaces que favorecen los procesos de polimerización e hidrólisis, esto también indica mayor inestabilidad del combustible.
- **Metanol:** este punto depende exclusivamente del proceso de producción. Restos de metanol provocan baja temperatura de inflamación, viscosidad y densidad, y corrosión en piezas de aluminio y zinc.

- **Metales alcalinos (Na+K) y del Grupo II (Ca+Mg):** su presencia depende del proceso de producción. Los metales provocan depósitos y catalizan reacciones de polimerización. Valores altos de (Na+K) indican restos de catalizador. Valores altos de (Ca+Mg) indican presencia de jabones insolubles.

- **Número cetano:** es un indicador importante de la calidad de ignición del combustible e influye en las emisiones de humo y en la calidad de la combustión. Los requerimientos de número de cetano dependen del tamaño y diseño del motor, de la naturaleza de las variaciones de velocidad y carga y de las condiciones de arranque y atmosféricas. Un bajo NC conlleva a ruidos en el motor, prolongando el retraso de la ignición y aumentando el peso molecular de las emisiones. Depende de la materia prima y nivel de oxidación del biodiesel. Un bajo valor indica poca tendencia a la auto-ignición y provocaría mayor cantidad de depósitos en el motor y mayor desgaste en los pistones. Relaciona el tiempo de retardo a la ignición con la inyección en la cámara de combustión. Cuanto menor es el tiempo de ignición, mayor es el número de cetano. Además, un alto número de cetano indica un encendido rápido y poco ruidoso.

- **Proceso Fischer-Tropsch** es un proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos (gasolina, keroseno, gasoil y lubricantes) a partir de gas de síntesis (CO y H₂). Fue inventado por los alemanes Franz Fischer y Hans Tropsch en los años 1920. Las reacciones principales de Fischer-Tropsch son en realidad reacciones de polimerización, consistentes en cinco pasos básicos:
 - Absorción de CO sobre la superficie del catalizador
 - Iniciación de la polimerización mediante formación de radical metilo (por disociación del CO e hidrogenación)
 - Polimerización por condensación (adición de CO y H₂ y liberación de agua)
 - Terminación
 - Desorción del producto

- **Punto de enturbiamiento:** es la temperatura a la cual la cera comienza su precipitación. Permite un buen desempeño a bajas temperaturas. Define la temperatura a la cual aparece una nube o nubosidad de cristales en el combustible, bajo condiciones de ensayo prescritas. El valor debe ser definido por el usuario, ya que depende del clima en el cual el motor se utilice.

- **Punto de fluidez:** es una indicación de la temperatura más baja a la cual el combustible puede ser bombeado, es decir, este parámetro da una idea de la temperatura más baja hasta la cual el combustible puede utilizarse.

Cabe destacar que el biodiesel tiene punto de fluidez y enturbiamiento mayores al de los aceites que sirvieron de materias primas y al del diesel. Esto tiene importancia en climas fríos y se soluciona mediante la adición de aditivos.

- **Punto de inflamación:** es la temperatura más baja (corregida a la presión atmosférica normal) a la cual la aplicación de una llama de prueba causa que el vapor de la muestra encienda bajo condiciones específicas del ensayo. Este ítem es importante desde el punto de vista de seguridad contra incendios. Se utiliza como mecanismo para limitar el nivel de alcohol sin reaccionar que permanece en el biodiesel terminado. Normalmente, el punto de inflamación del biodiesel es mayor que el diesel. En condiciones de laboratorio, se dice que la muestra alcanzó el punto de inflamación cuando una llama aparece e instantáneamente se propaga sobre la superficie de la misma. El punto de inflamación mide la respuesta de la muestra, al calor y a la llama bajo condiciones controladas. Cabe destacar, que el punto de inflamación del biodiesel debe ser mayor a 100°C (generalmente se encuentran valores entre 130 y 150°C), mientras que en el caso del diesel debe ser mayor a 50°C. Es por esta razón que el biodiesel presenta una gran ventaja desde el punto de vista de seguridad con respecto al diesel al momento de almacenarlo y transportarlo.

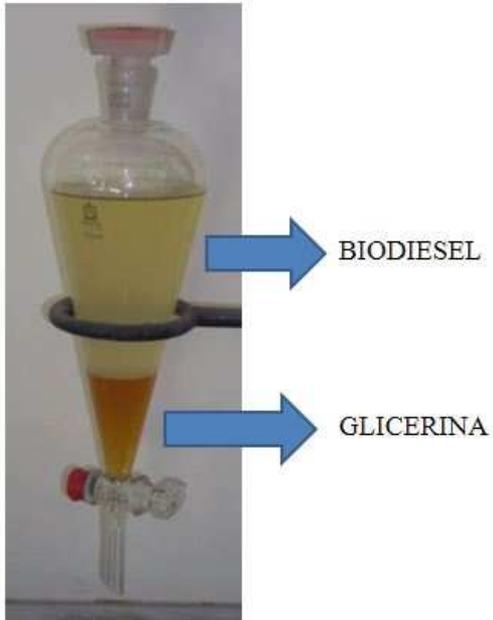
- **Punto de obstrucción de filtro en frío (POFF):** es un indicador de los límites de operabilidad. Este valor depende de la materia prima y del proceso de producción (impurezas mecánicas).

- **Residuo carbonoso:** mide la tendencia del combustible a formar depósitos carbonosos; aunque no tenga una estricta correlación directa con los depósitos en el motor, esta propiedad se considera simplemente como una aproximación al respecto. Depende exclusivamente del proceso de transesterificación. Un alto valor indica alto contenido de glicéridos, presencia de metales (jabones, restos de catalizador) u otras impurezas.

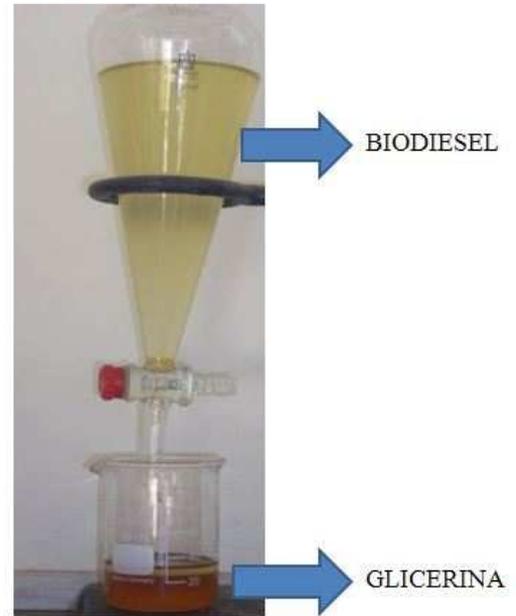
- **Temperatura atmosférica equivalente (90%R):** para asegurar que el biodiesel no ha sido contaminado con materiales de alto punto de ebullición, como aceites lubricantes gastados.

- **Viscosidad:** es una medida de la resistencia a fluir de un líquido bajo efectos de la gravedad. La medición de esta propiedad es importante debido a que afecta el funcionamiento de la bomba y al sistema de inyección. También, ejerce una gran influencia sobre la forma de pulverización. Debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. El valor de la viscosidad deber ser del mismo nivel del diesel convencional. Lo ideal, es evitar valores mayores que el diesel. Sin embargo, una viscosidad tendiendo al valor más bajo del rango de la especificación puede resultar ventajosa para motores que requieran menor potencia en la bomba de inyección y en la salida de los inyectores. Bajos valores indican exceso de metanol. Altos valores indican degradación térmica y oxidativa y presencia de aceite sin reaccionar. Acorta la vida del motor.

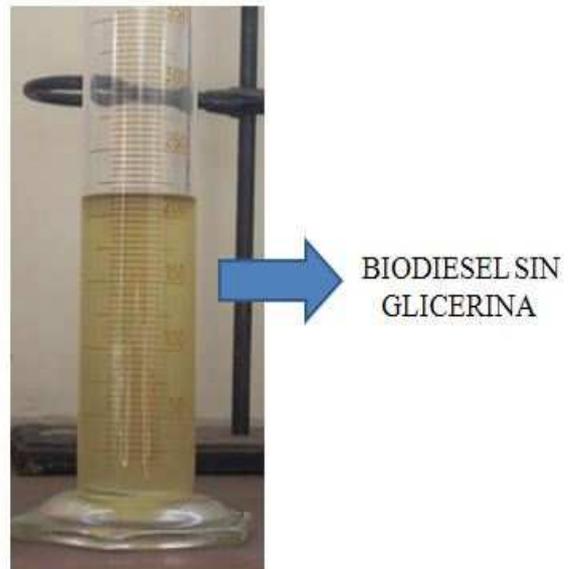
APENDICE III : PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A NIVEL DOMÉSTICO



Separación de las fases para un biodiesel



Después de 24 hrs de decantación





Biodiesel de aceite nuevo y usado, ambos con la glicerina decantada al fondo de los recipientes.



Aceite usado y su respectivo biodiesel con la glicerina decantada al fondo de los recipientes
