

CAPÍTULO 4

Biodiésel

- 4.1. Definición y especificaciones del biodiésel (PÁG. 32)
- 4.2. Materias primas para la producción de biodiésel (PÁG. 35)
- 4.3. Reacciones en la producción de biodiésel (PÁG. 40)
- 4.4. Procesos en la producción industrial de biodiésel (PÁG. 49)
- 4.5. Aplicaciones (PÁG. 55)
- 4.6. Producción de biodiésel (PÁG. 65)

4.1 Definición y especificaciones del biodiésel

El biodiésel es un biocarburante líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales, siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más utilizadas para este fin. Las propiedades del biodiésel son prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción en cuanto a densidad y número de cetano. Además, presenta un punto de inflamación superior. Por todo ello, el biodiésel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente.

La definición de biodiésel propuesta por las especificaciones ASTM (American Society for Testing and Material Standard, asociación internacional de normativa de calidad) lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión. Sin embargo, los ésteres más utilizados, como veremos más adelante, son los de metanol y etanol (obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos) debido a su bajo coste y sus ventajas químicas y físicas.

A diferencia de otros combustibles, los biocarburantes presentan la particularidad de utilizar productos vegetales como materia prima. Esto es la causa de que sea preciso tener en cuenta las características de los mercados agrícolas, junto a la complejidad que ya de por sí presentan los mercados energéticos. En este sentido, hay que destacar que el desarrollo de la industria de los biocarburantes no depende principalmente de la disponibilidad local de materia prima, sino de la existencia de una demanda suficiente. Al asegurar la existencia de una demanda de biocarburantes, el desarrollo de su mercado puede aprovecharse para potenciar otras políticas como la agrícola, favoreciendo la creación de empleo en el sector primario, la fijación de población en el ámbito rural, el desarrollo industrial y de actividades agrícolas, y reduciendo a la vez los efectos de la desertización gracias a la plantación de cultivos energéticos.

En cuanto a la utilización del biodiésel como combustible de automoción, ha de señalarse que las características de los ésteres son más parecidas a las del gasóleo que las del aceite vegetal sin modificar. La viscosidad del éster es dos veces superior a la del gasóleo frente a diez veces ó más de la del aceite crudo; además el índice de cetano de los ésteres es superior, siendo los valores adecuados para su uso como combustible. ASTM ha especificado distintas pruebas que se deben realizar a los combustibles para asegurar su correcto funcionamiento.

En la tabla 6 se enumeran las especificaciones establecidas para el biodiésel y el método de ensayo correspondiente.

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

TABLA 6 *Propiedades del biodiésel.*

Fuente: Wearchekiberica. Boletín Mensual, septiembre 2004

Nota 1 El Índice de Yodo es actualmente 140

Nota 2 La definición de las propiedades reflejadas en esta tabla se encuentra en el Capítulo 11 Glosario

El biodiésel necesita disponer de unas especificaciones que enumere las propiedades y garantice la calidad de producto. Además, el biodiésel debe cumplir los requisitos para los combustibles minerales de automoción y que se encuentran recogidas en la norma

europea EN-590 [ED]. Los requerimientos específicos y los métodos de control para la comercialización y distribución de ésteres metílicos de ácidos grasos –FAME– para su utilización en motores diesel con 100% de concentración se encuentran en la norma EN 14214 transcrita a la legislación española en el RD 398/1996 [RD398, 1996] y el RD 1728/1999 [RD1728, 1999] en concordancia con la Directiva Europea 98/70/CE.

Como se observa en las especificaciones el valor de índice de yodo ha subido de 120 a 140. El índice de yodo mide el número de insaturaciones, y una mayor proporción de dobles enlaces supone una mayor tendencia a la oxidación. La especificación de 120 podría excluir a los ésteres de girasol, algo más insaturados y con el índice de yodo más alto, pero en España al haberse fijado el índice de yodo en 140 ya no existe este problema con lo que sí que entrarían dentro de las especificaciones productos como el girasol, materia prima habitualmente utilizada para producir biodiésel en nuestro país.

Por ello, en España se están desarrollando trabajos en los últimos años para la utilización de biodiésel de girasol en distintas proporciones. En este sentido se han realizado una serie de ensayos en laboratorios y en banco de motores con biodiésel de girasol puro y en mezclas al 30% en el marco de un proyecto financiado por el programa Altener de la UE en el que participaron la Universidad de Zaragoza y el IDAE. En esta línea Repsol también realizó ensayos en banco de motores con mezclas de ésteres de girasol al 30%; en este proyecto se han realizado ensayos de la mezcla en flotas cautivas de autobuses urbanos en Valencia, Valladolid y Madrid.

De los resultados de estos proyectos se deduce que no tiene por qué excluirse a los ésteres de girasol de la especificación ya que su comportamiento es similar a los de colza. Actualmente se está discutiendo la posibilidad de establecer un índice de yodo para el producto final (para la mezcla empleada) con lo que el índice de yodo en la mezcla del éster metílico de girasol y diesel mineral estaría dentro de las especificaciones.

4.2 Materias primas para la producción de biodiésel

Las materias primas más comunes utilizadas en España para la fabricación de biodiésel son los aceites de fritura usados y el aceite de girasol (el contenido medio del girasol en aceite es de 44% por lo que en España será la mejor opción en cuanto a agricultura energética). También se están realizando pruebas con aceite de colza y con Brassica carinata.

Tanto en España como a nivel internacional, se puede decir que la producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas, especialmente girasol (en España e Italia) y colza (en países de Centroeuroa). Las oleaginosas se importan a Europa para obtener la proteína y luego los aceites son reexportados fuera de la UE. La utilización de los mismos en la fabricación de biodiésel daría salida interior a dicho producto, evitando la reexportación. Cualquier materia que contenga triglicéridos puede utilizarse para la producción de biodiésel (girasol, colza, soja, aceites de fritura usado, sebo de vaca,...). Por otra parte, en España, la utilización de aceites usados es todavía significativa.

A continuación se detallan las principales materias primas para la elaboración de biodiésel [Vicente 1998, 2001]:

- Aceites vegetales convencionales
 - Aceite de girasol
 - Aceite de colza
 - Aceite de soja
 - Aceite de coco
 - Aceite de palma
- Aceites vegetales alternativos
 - Aceite de Brassica carinata
 - Aceite de Cynara cardunculus
 - Aceite de Camelina sativa
 - Aceite de Crambe abyssinica
 - Aceite de Pongamia
 - Aceite de Jatropha curcas
- Aceites de semillas modificadas genéticamente
 - Aceite de girasol de alto oleico

- Grasas animales
 - Sebo de vaca
 - Sebo de búfalo
- Aceites de fritura usados
- Aceites de otras fuentes
 - Aceites de producciones microbianas
 - Aceites de microalgas

Aceites vegetales convencionales

Las materias primas utilizadas convencionalmente en la producción de biodiésel han sido los aceites de semillas oleaginosas como el girasol y la colza (Europa), la soja (Estados Unidos) y el coco (Filipinas); y los aceites de frutos oleaginosos como la palma (Malasia e Indonesia). Por razones climatológicas, la colza (*Brassica napus*) se produce principalmente en el norte de Europa y el girasol (*Helianthus annuus*) en los países mediterráneos del sur, como España o Italia [Vicente, 2001]. La utilización de estos aceites para producir biodiésel en Europa ha estado asociada a las regulaciones de retirada obligatoria de tierras de la Política Agraria Común (PAC) que permite el cultivo de semillas oleaginosas a precios razonables. Sin embargo, la dedicación de sólo las tierras de retirada para la producción de materias primas energéticas supone un riesgo por cuanto estas superficies varían en el tiempo, ya que el régimen de retirada de tierras depende de la oferta y la demanda de cereales alimentarios, lo que implica que este índice está sujeto a alteraciones. En nuestro país, el uso de cultivos tradicionales como energéticos está condicionado además por la producción del aceite, ya que la producción media por hectárea de aceite de girasol resulta poco atractivo, desde el punto de vista del agricultor, para elegir este cultivo como fuente de obtención de biocarburantes.

Aceites vegetales alternativos

Además de los aceites vegetales convencionales, existen otras especies más adaptadas a las condiciones del país donde se desarrollan y mejor posicionadas en el ámbito de los cultivos energéticos. En este sentido, destacan la utilización, como materias primas de la producción de biodiésel, de los aceites de *Camelina sativa*, *Crambe abyssinica* y *Jatropha curcas*. Existen otros cultivos que se adaptan mejor a las condiciones de nuestro país y que presentan rendimientos de producción mayores. En concreto, se trata de los cultivos de *Brassica carinata* y *Cynara cardunculus*. La *Brassica carinata* es una alternativa real al secano y regadío extensivo. La *Cynara cardunculus* es un cultivo plurianual y permanente, de unos diez años de ocupación del terreno, y orientado fundamentalmente a la producción de biomasa, aunque también pueden aprovecharse sus semillas para la obtención de aceite. Se obtienen de 2.000 a 3.000 kilogramos de semillas, cuyo aceite sirve de materia prima para la fabricación de biodiésel [Vicente, 1998, 2001].

Aceites vegetales modificados genéticamente

Los aceites y las grasas se diferencian principalmente en su contenido en ácidos grasos. Los aceites con proporciones altas de ácidos grasos insaturados, como el aceite de girasol o de *Camelina sativa*, mejoran la operatividad del biodiésel a bajas temperaturas, pero disminuyen su estabilidad a la oxidación, que se traduce en un índice de yodo elevado. Por este motivo, se pueden tener en consideración, como materias primas para producir biodiésel, los aceites con elevado contenido en insaturaciones, que han sido modificados genéticamente para reducir esta proporción, como el aceite de girasol de alto oleico [Vicente 1998, 2001].

Aceites de fritura usados

El aceite de fritura usado es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiésel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitan los costes de tratamiento como residuo. España es un gran consumidor de aceites vegetales, centrándose el consumo en aceite de oliva y girasol. Por su parte, los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible. La producción de los aceites usados en España se sitúa en torno a las 750.000 toneladas/año, según cifras del 2004. Además, como valor añadido, la utilización de aceites usados significa la buena gestión y uso del residuo.

El informe sobre el marco regulatorio de los carburantes propone reciclar aceite de fritura en biodiésel. Esta alternativa es la que más ventajas tiene porque además de producir combustible elimina un residuo contaminante como es el aceite usado. Este aceite da problemas al depurar el agua; sin embargo, su recogida es problemática. La Comisión Europea propone que el Ministerio de Medio Ambiente y los Ayuntamientos creen un sistema de recogida de aceite frito, oleinas y grasas en tres etapas: industrial, hostelería y doméstica.

La utilización de aceites usados presenta dificultades logísticas, no sólo por su recogida, como se ha dicho, sino también por su control y trazabilidad debido a su carácter de residuo. En el caso español, dicha recogida no está siendo promovida enérgicamente por la Administración pese a que la Ley 10/98 de Residuos establece la prohibición de verter aceites usados, lo cual es un incentivo más para su utilización en la fabricación de biodiésel.

Grasas animales

Además de los aceites vegetales y los aceites de fritura usados, las grasas animales, y más concretamente el sebo de vaca, pueden utilizarse como materia prima de la transesterificación para obtener biodiésel. El sebo tiene diferentes grados de calidad respecto a su utilización en la alimentación, empleándose los de peor calidad en la formulación de los alimentos de animales. La aplicación de grasas animales surgió a

raíz de la prohibición de su utilización en la producción de piensos, como salida para los mismos como subproducto. Sin embargo, actualmente no existe un nivel de aplicación industrial en España.

Aceites de otras fuentes

Por otra parte, es interesante señalar la producción de lípidos de composiciones similares a los aceites vegetales, mediante procesos microbianos, a partir de algas, bacterias y hongos, así como a partir de microalgas.

Otras fuentes

Por último, cabe destacar que está en estudio la utilización de bioetanol y biometanol en el proceso de esterificación de dichos aceites para la producción de biodiésel, al igual que el desarrollo de cultivos específicos para fines energéticos, no alimentarios.

Por tanto, los biocarburantes presentan la particularidad de utilizar productos vegetales como materia prima y, por tanto hay que tener en cuenta las características de los mercados agrícolas, junto a la complejidad que ya de por sí presentan los mercados energéticos. En este sentido, tal como se comentó anteriormente, hay que destacar que el desarrollo de la industria de los biocarburantes no depende principalmente de la disponibilidad local de materia prima, sino de la existencia de una demanda suficiente, que puede servir para potenciar otras políticas como la agrícola.

Para la producción de estos aceites existe la posibilidad de cultivar estas especies (girasol o colza) en las tierras de retirada obligatoria reguladas por la Política Agraria Común (PAC). El problema de este planteamiento es que la retirada de tierras está sujeta a variaciones anuales y ello puede crear incertidumbre en cuanto al suministro. Esencialmente la reforma de la PAC implica una serie de elementos de simplificación. En el sector de los cultivos herbáceos, se trata principalmente de la supresión de la retirada extraordinaria de tierras, del abandono de las superficies de base individuales y de la simplificación de los pagos compensatorios para las semillas oleaginosas. Además, existirá un único comité de gestión que será responsable de todos los cultivos herbáceos.

Los cultivos de girasol cuentan con el problema de su baja rentabilidad para el agricultor. Para asegurar un volumen continuo de suministro, las materias primas para usos energéticos deberían proceder de las mismas tierras que las destinadas a usos alimentarios, recibir las mismas ayudas y comercializarse de forma no diferenciada.

La Unión Europea prepara un Plan de Acción en Biomasa con medidas y acciones para impulsar la generación de electricidad y calor, incluyendo también los biocombustibles

para el transporte, que permita alcanzar los objetivos fijados. Por otro lado, las últimas reformas desarrolladas en el marco de la Política Agraria Común (PAC) incluyen la introducción de una ayuda específica para cultivos destinados bajo contrato a la producción de biocombustibles o energía térmica eléctrica a partir de biomasa, medida que entrará en vigor en nuestro país en el 2006.

En España, asimismo, se constituyó en octubre de 2004 la Comisión Interministerial de la Biomasa con el objetivo de analizar la situación del sector y proponer distintas actuaciones. Se incluyen la adaptación de la normativa y la propuesta de actividades de investigación en relación con cultivos energéticos, desarrollo de tecnologías de cultivos y recogida, así como valorización energética de los estiércoles [Cabrera, 2006].

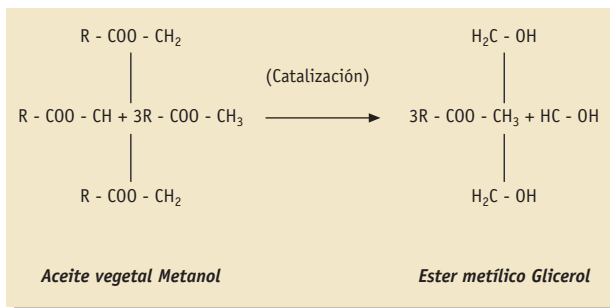
4.3 Reacciones en la producción de biodiésel

4.3.1 Reacciones de transesterificación de triglicéridos

Aunque la esterificación es un proceso posible, sin embargo el método utilizado comercialmente para la obtención de biodiésel es la transesterificación (también llamada alcoholólisis).

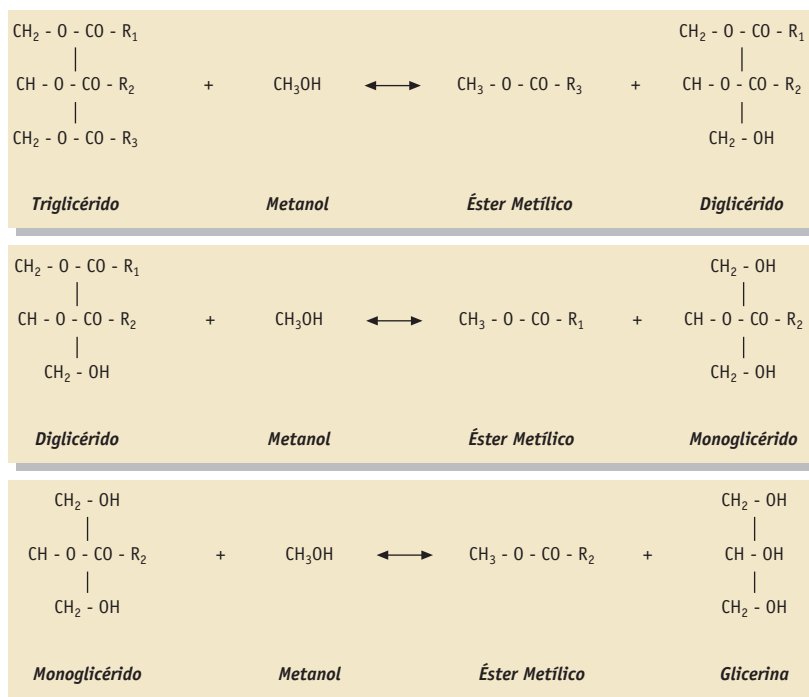
Se basa en la reacción de moléculas de triglicéridos (el número de átomos de las cadenas está comprendido entre 15 y 23, siendo el más habitual de 18) con alcoholes de bajo peso molecular (metanol, etanol, propanol, butanol) para producir ésteres y glicerina (que puede ser utilizada en cosmética, alimentación, farmacia, etc.).

La reacción de transesterificación, que se presenta en la gráfica 2, se desarrolla en una proporción molar de alcohol a triglicérido de 3 a 1, reaccionando en la metanólisis 1 mol de triglicérido con 3 moles de alcohol (aunque se añade una cantidad adicional de alcohol para desplazar la reacción hacia la formación del éster metílico). El triglicérido es el principal componente del aceite vegetal o la grasa animal. Además, la formación de la base de la glicerina, inmiscible con los ésteres metílicos, juega un papel importante en el desplazamiento de la reacción hacia la derecha, alcanzándose conversiones cercanas al 100%.



GRÁFICA 2 *Reacción de transesterificación.*

En la grafica 3 se presentan las diferentes reacciones que tienen lugar en la transesterificación, la cual consiste químicamente en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado.



GRÁFICA 3 *Reacciones implicadas en la transesterificación.*

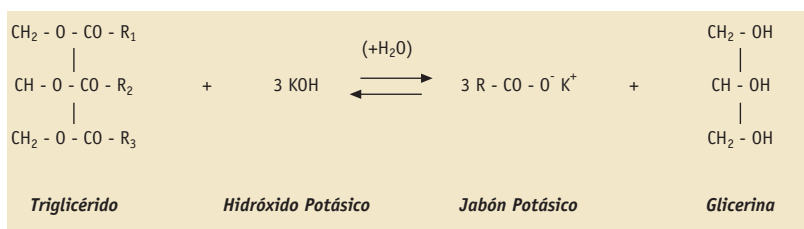
En la reacción de transesterificación se utiliza un catalizador para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento final, amen que sin él no sería posible esta reacción. Los catalizadores pueden ser ácidos homogéneos (H₂SO₄, HCl, H₃PO₄, R-SO₃), ácidos heterogéneos (Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO₄/ZrO₂, WO₃/ZrO₂), básicos heterogéneos (MgO, CaO, Na/NaOH/Al₂O₃), básicos homogéneos (KOH, NaOH) o enzimáticos (Lipasas: Candida, Penicillium, Pseudomonas); de todos ellos, los catalizadores que se suelen utilizar a escala comercial son los catalizadores homogéneos básicos ya que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones moderadas. En el caso de la reacción de transesterificación, cuando se utiliza un catalizador ácido se requieren condiciones de temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos, por ello es frecuente la utilización de derivados de ácidos más activos.

Sin embargo, la utilización de álcalis, que como se ha comentado es la opción más utilizada a escala industrial, implica que los glicéridos y el alcohol deben ser anhidros (<0,06 % v/v) para evitar que se produzca la saponificación. Además, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen también jabones.

De esta manera las reacciones secundarias que se pueden dar son las siguientes:

- Reacción de saponificación
- Reacción de neutralización de Ácidos grasos libres

El triglicérido reacciona con el catalizador básico, consumiendo éste, en presencia de agua dando lugar a la formación de jabones (reacción de saponificación), tal y como se puede ver en la gráfica 4.



GRÁFICA 4 *Reacción de saponificación*

La saponificación está favorecida cuando se utiliza el hidróxido potásico o sódico, ya que sus moléculas contienen los grupos OH responsables de esta reacción. Así, cuando se utilizan estos catalizadores, se debe tener especial precaución con las condiciones de reacción, especialmente la temperatura y la cantidad de catalizador básico, para reducir al máximo la saponificación. Sin embargo, los metóxidos sólo contienen el grupo OH como impureza, por lo que su utilización no produce prácticamente jabones por saponificación. En cualquier caso, se deben utilizar aceites y alcoholes esencialmente anhidros, ya que el agua favorece la formación de jabones por saponificación. Por este motivo, se debe eliminar el agua, mediante evaporación, en los aceites con altos contenidos en humedad antes de llevar a cabo la transesterificación.

Por otra parte, hay dos maneras de eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite. Así, se puede proceder a su neutralización, ya que los ácidos grasos presentes en el aceite vegetal pueden reaccionar con el catalizador básico (fundamentalmente NaOH) en presencia de agua, ocurriendo asimismo una reacción indeseable, produciendo como en el caso anterior jabón, tal y como se puede ver en la gráfica 5. Otra manera de eliminar los ácidos grasos libres es mediante una reacción de esterificación con un catalizador ácido con lo que se formaría el éster metílico.

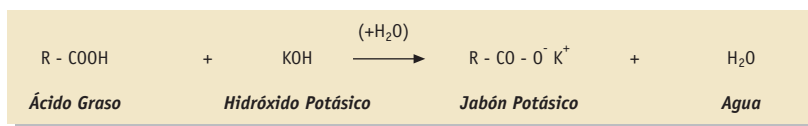


GRÁFICO 5 *Reacción de neutralización de ácidos grasos libres.*

4.3.2 Reacciones de esterificación de ácidos grasos

El proceso que se utiliza para la producción de biodiésel es la transesterificación, sin embargo la esterificación se viene aplicando combinándolo con la transesterificación de cara a aprovechar el subproducto de ácidos grasos y producir asimismo biodiésel.

Dada la importancia de los ésteres se han desarrollado numerosos procesos para obtenerlos. El más común es el calentamiento de una mezcla del alcohol y del ácido correspondiente con ácido sulfúrico, utilizando el reactivo más económico en exceso para aumentar el rendimiento y desplazar el equilibrio hacia la derecha (esterificación de Fischer). El ácido sulfúrico sirve en este caso tanto de catalizador como de sustancia higroscópica que absorbe el agua formada en la reacción. A veces es sustituido por ácido fosfórico concentrado.

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.

De la reacción de esterificación aparece desarrollada en la gráfica 6.

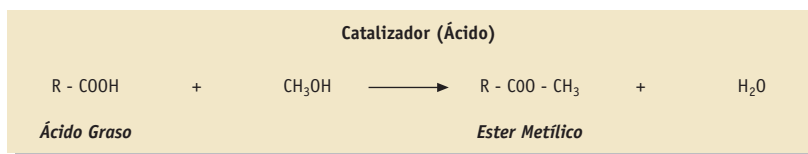


GRÁFICO 6 *Reacción de Esterificación.*

Los catalizadores que se utilizan en este tipo de reacción, al contrario que en el proceso de transesterificación que habitualmente son hidróxidos, son ácidos o enzimáticos. En el caso de la esterificación, al contrario que en la reacción de transesterificación, al utilizar catalizadores ácidos no es necesario recurrir a trabajar con temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos.

4.3.3 Catalizadores

Tal y como se comentó anteriormente es necesario contar con catalizadores para que ocurra la reacción y sea posible desde un punto de vista cinético. Estos catalizadores, en el caso de la transterificación, pueden ser ácidos homogéneos, ácidos heterogéneos, básicos homogéneos o enzimáticos, siendo los catalizadores básicos los que se utilizan a nivel industrial en la transesterificación ya que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones moderadas. El único problema de estos catalizadores es que deben ser anhidros para evitar que se produzcan reacciones secundarias, como la de saponificación, que reducirían el rendimiento del proceso. Por otra parte, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralice con el catalizador y se formen también jabones.

Se ha observado que la reacción es más rápida cuando se cataliza con un alquilo [Freedman, 1986]. En el primer paso de la reacción, un ion óxido alquilo ataca al grupo carbonilo de la molécula del triglicérido. La reacción de este producto intermedio con un alcohol produce un ion del grupo alcóxido en el segundo paso. En la última etapa la redistribución del compuesto tetraedro intermedio da lugar a un éster y a diglicerina.

Asimismo, se pueden utilizar catalizadores ácidos de Bronsted, preferiblemente sulfúricos y sulfónicos. Estos catalizadores producen rendimientos muy altos en ésteres alquílicos pero las reacciones son lentas, necesitando temperaturas superiores a los 100 °C y más de 3 horas para completar la conversión. La acidificación del grupo carbonil del éster conduce a la carbonatación, y posteriormente, el ataque nucleófilo del alcohol produce el compuesto tetraédrico intermedio. Esto elimina el glicerol para formar un nuevo éster y regenerar el catalizador.

Se ha probado la metanólisis del aceite de soja en presencia del 1% de H_2SO_4 con una relación molar alcohol/aceite de 30:1 [Freedman, 1986]. A una temperatura de reacción de 65 °C se completó la conversión en 20 horas, mientras la butanólisis a 177 °C y la etanólisis a 78 °C usando las mismas cantidades de alcohol, necesitaron 3 y 18 horas, respectivamente.

En la tabla 7 se resumen las ventajas y desventajas de utilización de los distintos catalizadores para el proceso de transesterificación:

Catálisis Básica (homogénea) VENTAJAS • Esterifica ácidos grasos • No se forman jabones • Purificación más simple INCONVENIENTES • Velocidad de reacción baja • Exceso de alcohol elevado • Condiciones enérgicas: P, T • Neutralización del catalizador	Catálisis Ácida (homogénea) VENTAJAS • Esterifica ácidos grasos • No se forman jabones • Purificación más simple INCONVENIENTES • Velocidad de reacción baja • Exceso de alcohol elevado • Condiciones enérgicas: P, T • Neutralización del catalizador
Catálisis Enzimática VENTAJAS • Esterifica ácidos grasos • No se forman jabones • Purificación más simple INCONVENIENTES • Velocidad de reacción baja • Exceso de alcohol elevado • Condiciones enérgicas: P, T • Neutralización del catalizador	Catálisis Heterogénea VENTAJAS • Reutilización del catalizador • Facilidad de procesos continuos • No se forman jabones • Purificación más sencilla INCONVENIENTES • Transferencia de materia

TABLA 7 *Ventajas e inconvenientes de los catalizadores utilizados en la transesterificación.*

Fuente: Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA) de la Universidad Rey Juan Carlos

4.3.4 Variables que afectan a la reacción de transesterificación

Entre las variables más importantes que afectan a la reacción de transesterificación se cuentan las siguientes:

Acidez y humedad

Los contenidos de ácidos grasos y de humedad son los parámetros determinantes de la viabilidad del proceso de transesterificación del aceite vegetal. Para que se realice la reacción completa se necesita un valor de ácidos grasos libres, del inglés Free Fatty Acid (FFA), menor al 3%. Cuanto más alta es la acidez del aceite, menor es la conversión. Además, tanto el exceso como la deficiencia de catalizador pueden producir la formación de jabón. [Dorado, 2002], amén, que como se ha comentado, la presencia de humedad disminuye el rendimiento de la reacción, pues el agua reacciona con los catalizadores formando jabones.

Se ha estudiado la transesterificación del sebo de animales catalizado con NaOH en presencia de FFA y agua. Sin añadir ninguno de los dos componentes, FFA y agua, el

rendimiento de los esteres metílicos era alto. Cuando se añadía un 0.6% de FFA el rendimiento de la reacción disminuía a valores inferiores al 5%, para cualquier nivel de agua añadida. Cuando se incrementaba un 0.9% de agua, sin añadir FFA, el rendimiento se situaba en el 17%. Si las grasas animales o los aceites vegetales, con valores altos de FFA, se quieren utilizar para producir biodiésel, es necesario refinarlos con una neutralización, utilizando una solución de NaOH para eliminar los ácidos grasos libres. Igualmente, el proceso de catálisis ácida también se puede usar para la esterificación de estos ácidos grasos [Ma, 1998].

Las materias primas usadas como base para el proceso de alcoholisis deben cumplir ciertas especificaciones. Los triglicéridos deben tener un valor ácido bajo y los materiales deben contener baja humedad. La adición de catalizadores de hidróxido de sodio compensa la alta acidez, pero el jabón resultante provoca un aumento de viscosidad o de formación de geles que interfieren en la reacción y en la separación del glicerol. Cuando no se dan estas condiciones los rendimientos de la reacción se reducen sustancialmente. El hidróxido y metóxido de sodio o de potasio deben mantener un grado de humedad bajo. Su contacto con el aire disminuye la efectividad del catalizador por su interacción con el dióxido de carbono y la humedad.

Actualmente, la mayor parte del biodiésel producido, procede de aceites vegetales al que se le añade metanol y un catalizador alcalino. Sin embargo hay muchos aceites de bajo costo y grasas animales que pueden ser utilizados. Su problema radica en que suelen contener gran cantidad de ácidos grasos que no se pueden convertir en biodiésel usando catalizadores alcalinos. En estos casos es necesario hacer la esterificación en dos etapas: inicialmente debe realizarse un pretratamiento para convertir los FFA en esteres metílicos con un catalizador ácido, y en un segundo paso se realiza la transesterificación con un catalizador alcalino, para completar la reacción.

Tipo de catalizador y concentración

Los catalizadores empleados para la transesterificación de los triglicéridos se pueden clasificar en alcalinos, ácidos, enzimáticos o catalizadores heterogéneos, siendo los básicos y en particular los hidróxidos los más utilizados. Si el aceite usado tiene un alto grado de ácidos grasos y elevada humedad los catalizadores ácidos son los más adecuados. Estos ácidos pueden ser sulfúrico, fosfórico o ácido sulfónico orgánico. La metanólisis del sebo de animal se ha estudiado con NaOH y NaOMe. Comparando los dos catalizadores, el NaOH ha producido mejores resultados que el NaOMe [Ma, 1998]. El metóxido de sodio provoca la formación de muchos subproductos, principalmente sales de sodio, que deben eliminarse posteriormente.

En los procesos de metanólisis alcalina los principales catalizadores usados han sido el hidróxido potásico y el hidróxido sódico, ambos en concentraciones de 0.4 a 2% v/v de aceite. Aceites, tanto refinados como crudos, con un 1% de catalizador (tanto

hidróxido sódico o potásico) han tenido muy buenos resultados. La metanólisis del aceite de soja ha producido sus mejores resultados de rendimiento y viscosidad con una concentración de 1% de hidróxido potásico [Tomasevic, 2003].

Se han probado catalizadores de metales alcalino-térreos en la transesterificación de aceites de colza. El proceso se lleva a cabo si aparecen iones de metóxido en la reacción intermedia. Los hidróxidos alcalino-térreos, alcóxidos y óxidos catalizan la reacción más lentamente [Gryglewicz, 1999].

La actividad catalítica del óxido de magnesio, hidróxido de calcio, óxido de calcio, metóxido de calcio, hidróxido de bario y, por comparación, hidróxido de sodio se ha evaluado en la transesterificación del aceite de colza. De ellos, el hidróxido sódico ha producido la mayor actividad catalítica. El grado de substratos que reaccionaron fue del 85% en 30 minutos y de 95% después de 1.5 horas, lo que representa un valor cercano al equilibrio. El hidróxido de bario tuvo un rendimiento ligeramente inferior con una valor del 75% después de 30 minutos, mientras que el metóxido de calcio reaccionó sólo en un 55%, en este mismo tiempo. Rendimientos menores se obtuvieron con CaO , mientras que el óxido de magnesio y el hidróxido cálcico no presentaron actividad catalítica.

La actividad catalítica ácida se ha estudiado también con aceites vegetales reutilizados. Se han utilizado cuatro concentraciones 0,5, 1, 1,5 y 2,25 M de HCl y los resultados se han comparado con una concentración de 2,25 M H_2SO_4 , obteniendo una mejor actividad catalítica con el ácido sulfúrico en un rango de 1,5-2,25 M de concentración [Mohamad, 2002].

Aunque el proceso de transesterificación, con catalizadores alcalinos, para transformar los triglicéridos en sus correspondientes esteres metílicos tiene una conversión muy alta en un periodo más corto de tiempo, tiene algunos inconvenientes: el catalizador debe ser separado del producto final, la recuperación del glicerol puede resultar difícil, el agua alcalina resultante del proceso debe ser tratada y los ácidos grasos y el agua afectan a la reacción.

Los catalizadores enzimáticos pueden obtener resultados relevantes en sistemas tanto acuosos como no acuosos, lo que resuelve alguno de los problemas anteriores [Fuduka, 2001]. En particular el glicerol se puede separar fácilmente y, también, los ácidos grasos contenidos en el aceite reutilizado se pueden convertir completamente en esteres alquílicos. En cambio el uso de estos catalizadores enzimáticos tiene un coste superior que el de los alcalinos.

Relación molar de alcohol / aceite y tipo de alcohol

Una de las variables más importantes que afectan al rendimiento del proceso es la relación molar del alcohol y los triglicéridos. La relación estequiométrica requiere tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de esteres y un mol

de glicerol. La transesterificación es una reacción de equilibrio que necesita un exceso de alcohol para conducir la reacción al lado derecho. Para una conversión máxima se debe utilizar una relación molar de 6:1. En cambio un valor alto de relación molar de alcohol afecta a la separación de glicerina debido al incremento de solubilidad. Cuando la glicerina se mantiene en la solución hace que la reacción revierta hacia la izquierda, disminuyendo el rendimiento de los ésteres.

La formación de éster etílico comparativamente es más difícil que la de éster metílico, especialmente la formación de una emulsión estable durante la etanolisis es un problema. El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser agitada mecánicamente para que haya transferencia de masa. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, en la metanolisis esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerol quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. En cambio en la etanolisis esta emulsión no es estable y complica mucho la separación y purificación de los esteres etílicos. La emulsión está causada en parte por la formación de monoglicéricos y diglicéricos intermedios, que contienen tanto grupos hidróxidos polares como cadenas de hidrocarburos no polares.

Efecto del tiempo de reacción y temperatura

La conversión aumenta con el tiempo de reacción. Así, Feedman y otros investigadores [FREEDMAN, 1984] transesterificaron aceite de cacahuete, semilla de algodón, girasol y soja con una relación molar de 6:1 de metanol, con un catalizador de metóxido sódico al 0.5% a 60°C según el autor. Después de 1 minuto se observó un rendimiento de aproximadamente el 80% para la soja y el girasol, después de una hora la conversión era la misma para los cuatro, con un valor aproximado del 93%.

La transesterificación se puede producir a diferentes temperaturas, dependiendo del tipo de aceite. En el caso de aceite refinado con metanol (6:1) al 1% NaOH, la reacción se estudió a tres temperaturas diferentes. Después de 6 minutos los rendimientos fueron 94%, 87% y 64% para temperaturas de 60, 45 y 32°C, respectivamente. Después de una hora la formación del éster era idéntica para 60 y 45°C y ligeramente menor para 32°C.

4.4 Procesos en la producción industrial de biodiésel

Tal y como se ha comentado en el apartado de reacciones dedicado a la producción de biodiésel, químicamente, la transesterificación –proceso industrial utilizado en su producción– consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina. En cada reacción un mol de éster metílico es liberado. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen las reacciones y en posteriores fases de separación, purificación y estabilización.

En este punto se describirán los diferentes procesos para la producción de biodiésel entre los que se incluyen el proceso general de transesterificación y el proceso general de esterificación, aunque habitualmente en este último el proceso se utiliza en combinación con el de transesterificación a partir de los ácidos grasos, subproductos de este proceso, para la producción de biodiésel. Además también se comentarán estos procesos en discontinuo y en continuo, para finalizar con el proceso en condiciones supercríticas donde no es necesario añadir catalizadores.

4.4.1 Proceso general de transesterificación

Aunque todas ellas tienen en común los aspectos mencionados en el punto anterior de producción de biodiésel mediante el proceso de transesterificación, sin embargo existen múltiples opciones de operación viables para la fabricación de biodiésel. 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.

En general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación suelen utilizar procesos Batch o discontinuos. Los procesos continuos, sin embargo, son más idóneos para plantas de mayor capacidad que justifique el mayor número de personal y requieren una alimentación más uniforme.

4.4.1.1 Proceso Discontinuo

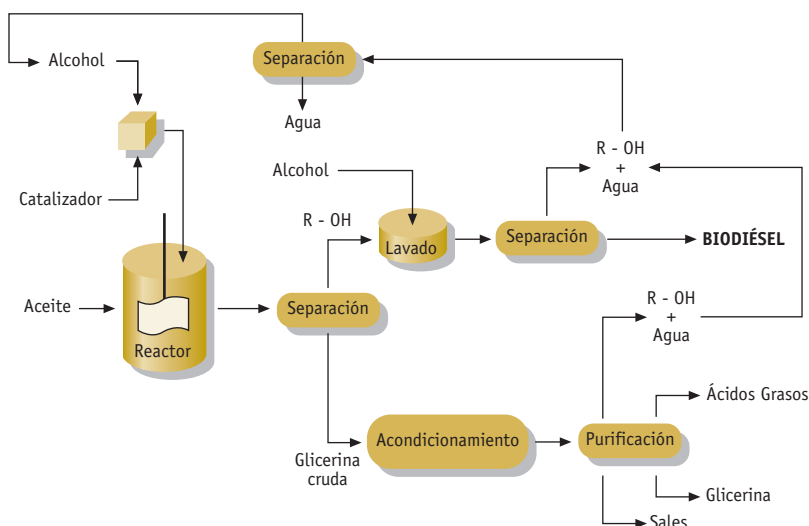
Es el método más simple para la producción de biodiésel donde se han reportado ratios 4:1 (alcohol:triglicérido). Se trata de reactores con agitación, donde el reactor puede estar sellado o equipado con un condensador de reflujo. Las condiciones de

operación más habituales son a temperaturas de 65°C, aunque rangos de temperaturas desde 25°C a 85°C también han sido publicadas.

El catalizador más común es el NaOH, aunque también se utiliza el KOH, en rangos del 0,3% al 1,5% (dependiendo que el catalizador utilizado sea KOH o NaOH). Es necesaria una agitación rápida para una correcta mezcla en el reactor del aceite, el catalizador y el alcohol. Hacia el fin de la reacción, la agitación debe ser menor para permitir al glicerol separarse de la fase ester. Se han publicado en la bibliografía resultados entre el 85% y el 94%. En la transesterificación, tal y como se comentó anteriormente, cuando se utilizan catalizadores ácidos se requiere temperaturas elevadas y tiempos largos de reacción.

Algunas plantas en operación utilizan reacciones en dos etapas, con la eliminación del glicerol entre ellas, para aumentar el rendimiento final hasta porcentajes superiores al 95%. Temperaturas mayores y ratios superiores de alcohol:aceite pueden asimismo aumentar el rendimiento de la reacción. El tiempo de reacción suele ser entre 20 minutos y una hora.

En la gráfica 7 se reproduce un diagrama de bloques de un proceso de transesterificación en discontinuo.



GRÁFICA 7 *Proceso de Transesterificación.*

Fuente: Adaptación del gráfico del Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA) de la Universidad Rey Juan Carlos.

4.4.1.2 Proceso Continuo

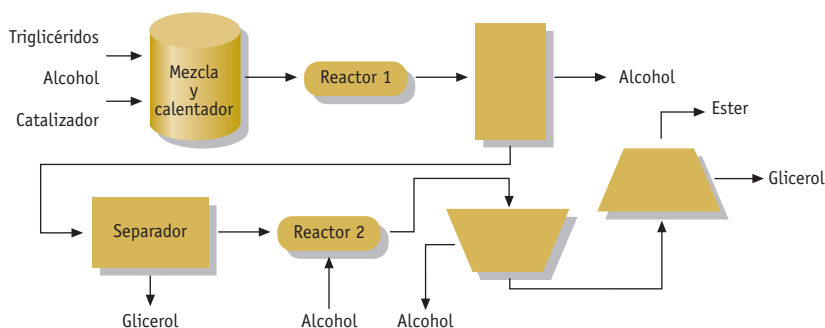
Una variación del proceso discontinuo es la utilización de reactores continuos del tipo tanque agitado, los llamados CSTR del inglés, Continuous Stirred Tank Reactor. Este tipo de reactores puede ser variado en volumen para permitir mayores tiempos de residencia y lograr aumentar los resultados de la reacción. Así, tras la decantación de glicerol en el decantador la reacción en un segundo CSTR es mucho más rápida, con un porcentaje del 98% de producto de reacción.

Un elemento esencial en el diseño de los reactores CSTR es asegurarse que la mezcla se realiza convenientemente para que la composición en el reactor sea prácticamente constante. Esto tiene el efecto de aumentar la dispersión del glicerol en la fase éster. El resultado es que el tiempo requerido para la separación de fases se incrementa.

Existen diversos procesos que utilizan la mezcla intensa para favorecer la reacción de esterificación. El reactor que se utiliza en este caso es de tipo tubular. La mezcla de reacción se mueve longitudinalmente por este tipo de reactores, con poca mezcla en la dirección axial. Este tipo de reactor de flujo pistón, Plug Flow Reactor (PFR), se comporta como si fueran pequeños reactores CSTR en serie.

El resultado es un sistema en continuo que requiere tiempos de residencia menores (del orden de 6 a 10 minutos) –con el consiguiente ahorro, al ser los reactores menores– para la realización de la reacción. Este tipo de reactor puede operar a elevada temperatura y presión para aumentar el porcentaje de conversión.

En la gráfica 8 se presenta un diagrama de bloques de un proceso de transesterificación mediante reactores de flujo pistón. En este proceso, se introducen los triglicéridos con el alcohol y el catalizador y se somete a diferentes operaciones (se utilizan dos reactores) para dar lugar al éster y la glicerina.



GRÁFICA 8 Proceso de producción de biodiésel mediante reactores de flujo pistón.

Fuente: NREL

Dentro de la catálisis heterogénea los catalizadores básicos se desactivan fácilmente por la presencia de ácidos grasos libres (FFA) y de agua que favorece la formación de los mismos. Para tratar alimentaciones con cierto grado de acidez, se prefiere la esterificación de los ácidos grasos libres con superácidos [Granados, 2005] que a su vez presenten una elevada velocidad de reacción de transesterificación si bien se necesitan dos reactores con una fase intermedia de eliminación de agua. De este modo, alimentaciones con hasta un 30% en FFA se pueden esterificar con metanol, reduciendo la presencia de FFA por debajo del 1%. Esta etapa previa de esterificación se puede llevar a cabo con alcoholes superiores o glicerina que resulta atractiva en la producción de biodiésel puesto que es un subproducto del proceso.

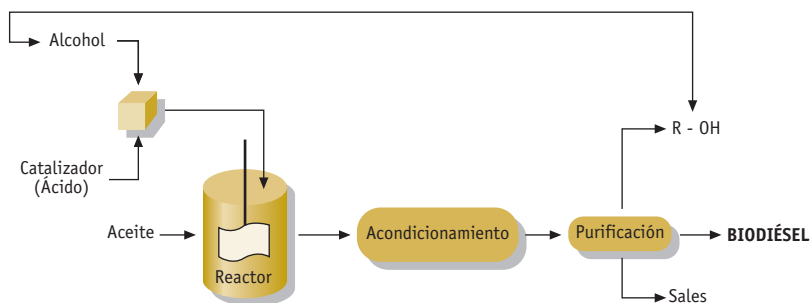
4.4.1.3 Proceso de Esterificación

El más común consiste en el calentamiento de una mezcla del alcohol y del ácido correspondiente -en los procesos de esterificación se suelen utilizar catalizadores ácidos- con ácido sulfúrico, utilizando el reactivo más económico en exceso para aumentar el rendimiento y desplazar el equilibrio hacia la derecha (esterificación de Fischer).

El ácido sulfúrico sirve en este caso tanto de catalizador como de sustancia higroscópica que absorbe el agua formada en la reacción. A veces es sustituido por ácido fosfórico concentrado.

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.

En la gráfica 9 se observa el diagrama de una planta con proceso de esterificación.



GRÁFICA 9 *Proceso de esterificación.*

Fuente: Adaptación gráfico del Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA) de la Universidad Rey Juan Carlos.

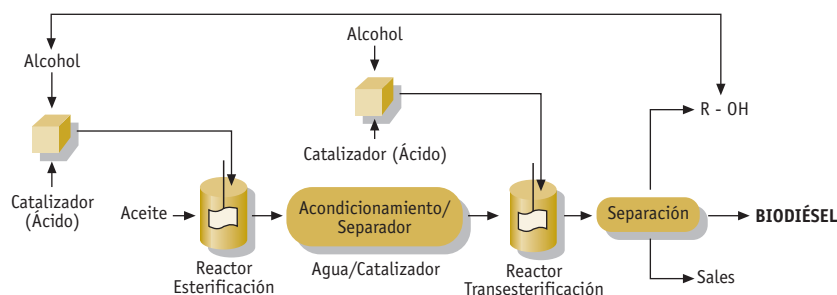
4.4.1.4 Proceso Combinado Esterificación-Transesterificación

Este tipo de procesos refina los ácidos grasos aparte del sistema de alimentación o mediante un tratamiento diferenciado en la unidad de esterificación. Se añaden los catalizadores cáusticos y el producto de reacción se separa mediante centrifugación (proceso llamado Caustic Stripping).

Los aceites refinados son secados y enviados a la unidad de transesterificación para un proceso posterior. De esta manera, los ácidos grasos pueden ser transformados en ésteres metílicos mediante un proceso ácido de esterificación.

Los procesos de catálisis ácida pueden ser usados para la esterificación directa de los ácidos libres (FFA). Una alternativa a esto sería utilizar un catalizador básico para formar deliberadamente jabón en el FFA. El jabón es recuperado, el aceite secado y posteriormente utilizado en un sistema convencional mediante catalizadores básicos.

El diagrama de proceso de esterificación/transesterificación se reproduce en la figura 10.



GRÁFICA 10 Proceso de producción de biodiésel mediante esterificación/transesterificación. Proceso de catálisis ácida. Elaboración propia.

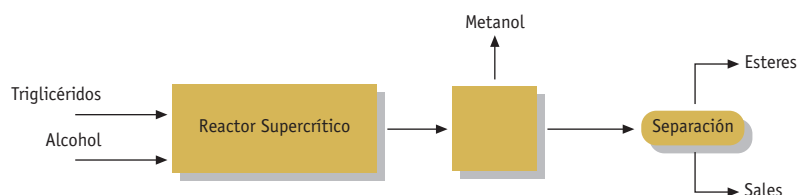
En la reacción de transesterificación-esterificación, por su parte, se puede aprovechar los ácidos grasos subproductos de la reacción de la gráfica 7 para alimentar posteriormente un reactor de esterificación.

4.4.1.5 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.

Un ejemplo de sistema sin catalizadores es el que utiliza un elevado ratio de alcohol:aceite (42:1). Bajo condiciones supercríticas (350 a 400°C y P>80 atm) la reacción se completa en 4 minutos. Los costes de instalación y los costes de operación son más altos y la energía consumida mayor, por lo que aunque los resultados mediante este proceso son muy interesantes, el escalado de estas instalaciones a nivel industrial puede ser difícil.

En la gráfica 11 se representa el diagrama de bloques de un proceso en el que se utiliza un reactor supercrítico, sin necesidad de añadir catalizadores.



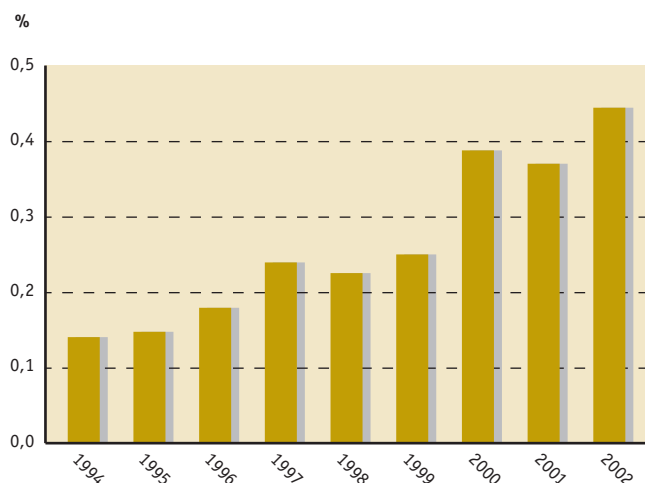
GRÁFICA 11 *Proceso de producción de biodiésel mediante proceso supercrítico.*

Fuente: NREL

4.5 Aplicaciones

Los carburantes obtenidos a partir de cultivos y de otras materias orgánicas, los llamados biocarburantes, presentan una serie de ventajas para el sector del transporte. En primer lugar, los biocarburantes pueden contribuir a reducir el crecimiento en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) haciendo posible así que la Unión Europea cumpla los compromisos adquiridos en virtud del Protocolo de Kyoto. Por otra parte, reduciendo la dependencia que el sector del transporte tiene del petróleo (actualmente del 98 %), también pueden contribuir a diversificar y mejorar la seguridad en el suministro de carburante. Asimismo, estos carburantes pueden ser fuentes alternativas de ingresos para las áreas rurales de la Unión Europea.

El porcentaje en España de biocarburantes utilizados en el sector transporte desde 1994 ha ido aumentando constantemente de un año a otro, tal y como se representa en la gráfica 12.



GRÁFICA 12 *Porcentaje de biocarburantes en el consumo total de carburantes en el sector del transporte, 1994-2002.*

Fuente: Asociación Española de Productores de Energía Renovable (APPA).

El biodiésel es una mezcla de ésteres metílicos derivados de los ácidos grasos presentes en los aceites vegetales obtenidos de manera mayoritaria por reacción de transesterificación de los mismos con metanol. Se trata, por tanto, de un combustible renovable con un balance de emisión de CO_2 bajo, que ayudaría a cumplir los compromisos firmados en el protocolo de Kyoto por España. La reducción de emisiones de CO_2 al usar biocarburantes no es del 100% puesto que hay que tener en cuenta la energía consumida en el proceso de producción de los mismos, debido a lo cual el balance no es nulo y se emite CO_2 .

Los ésteres metílicos derivados de los aceites vegetales poseen unas características físicas y fisicoquímicas parecidas al gasóleo, lo que permite mezclarlos en cualquier

proporción y usarlos en los vehículos diésel convencionales, sin realizar importantes modificaciones en el diseño básico del motor. Sin embargo, en proporciones superiores al 5% es necesario reemplazar el material empleado en el circuito de alimentación de combustible por otro más resistente, ya que se puede deteriorar por el mayor poder disolvente del biodiésel.

Para evitar introducir las modificaciones en los motores que se requieren para la utilización de aceites vegetales sin modificar, y mejorar sustancialmente sus características como carburantes, se recurre a transformarlos en sus derivados **ésteres metílicos** o etílicos.

Los aceites procedentes de plantas generalmente contienen ácidos grasos, fosfolípidos y otras impurezas, lo que dificulta la utilización de los aceites como combustible directamente. Pero su gran inconveniente es la elevada viscosidad que tienen, como se puede ver en la tabla 6. Para superar este problema el aceite necesita modificarse químicamente, principalmente por transesterificación, pirólisis o emulsificación. De todos ellos, como ya se ha mencionado, la **transesterificación** es el proceso que produce combustibles de forma más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

<i>Propiedad</i>	<i>Gasóleo</i>	<i>Aceite de Girasol</i>	<i>Metil Ester de Girasol</i>	<i>Aceite de Colza</i>	<i>Metil Ester de Colza</i>
Densidad (15°C)(Kg/l)	0,84	0,92	0,89	0,9	0,883
Punto de ignición (°C)	63	215	183	200	153
Viscosidad cinemática (37,8°C)(mm²/s)	3,2	35	4,2	39	4,8
Número de cetano	45-50	33	47-51	35-40	52
Calor bruto de combustión (mj/Kg)	44	39,5	40	-	40
Punto de enturbamiento (°C)	0-(+3)	-6,6	3	-	-3
Azufre (% peso)	0,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Residuo de carbón (% peso)	0,2	0,42	0,05	-	-

TABLA 8 *Diferencias entre las propiedades del gasóleo, aceites vegetales y biodiésel.*

Fuente: Panoramaenergético.com.

Las formas de utilización de los aceites vegetales o de los ésteres metílicos en los motores diésel (motores de compresión MEC) pueden variar dependiendo de distintos factores. Así, las diferentes maneras de utilización para conseguir un óptimo rendimiento en el motor, pueden ser:

- Adaptación del motor diésel para uso de aceites
- Motores específicos para uso de aceites (Motor Elsbett)
- Mezclas de gasóleo con aceite
- Mezclas de gasóleo con ésteres metílicos
- Mezclas de gasóleo con alcohol

Tanto la adaptación de motores diésel como la mezcla del biodiésel con aceite vegetal, así como la utilización de Motores Elsbett no tienen el grado de implantación y desarrollo que las mezclas de gasóleo con ésteres (sobre todo metílicos) y con alcohol, que se presentan como las opciones más viables comercialmente.

El biodiésel se utiliza además de en automoción, para sustituir al gasóleo C de calefacción. Por otra parte, el biodiésel disuelve los hidrocarburos por lo que también se ha utilizado para limpiar vertidos de hidrocarburos (por ejemplo en el accidente del Erika en la costa francesa). Los ésteres metílicos son también intermedios en la síntesis de muchos productos utilizados en la química fina.

Previamente a describir las aplicaciones, hay que tener en consideración las obligaciones normativas. En ese sentido, de acuerdo con lo expresado por los productores de estos combustibles [Appa], algunas normas no son apropiadas para los biocarburantes y frenan su desarrollo. Dos de ellas son, a su juicio, especialmente nocivas: la obligación de mantener existencias mínimas de seguridad y las especificaciones técnicas.

La obligación de mantener unas reservas estratégicas no tiene en cuenta la naturaleza y el volumen del producto gestionado, y, así, no está definido si los stocks de materia prima, como el aceite usado, contabilizan dentro de ellas o afectan a los suministros a largo plazo. Puesto que la obligación recae sobre el operador que introduce el carburante en el mercado de consumo –que normalmente es el último mayorista de la cadena o el importador–, la situación dificulta la expansión de las redes de distribución.

Respecto a las especificaciones técnicas, la aplicación de los requisitos del carburante fósil al biocarburante conlleva la imposibilidad de comercializar mezclas con más de un determinado porcentaje. En el caso del biodiésel, pasado el 15% o el 20% es necesario comercializarlo puro. La solución, en este caso, puede pasar por elaborar especificaciones concretas para determinados porcentajes de mezcla de carburante o por aplicar las especificaciones que le son propias a cada uno de los componentes de la mezcla por separado.

La aprobación de unas especificaciones técnicas adaptadas a los biocarburantes –al igual que la finalización de los estudios en curso sobre emisiones y rendimientos– es un punto importantísimo para potenciar su utilización por parte de los fabricantes de vehículos y para adaptar la logística del suministro.

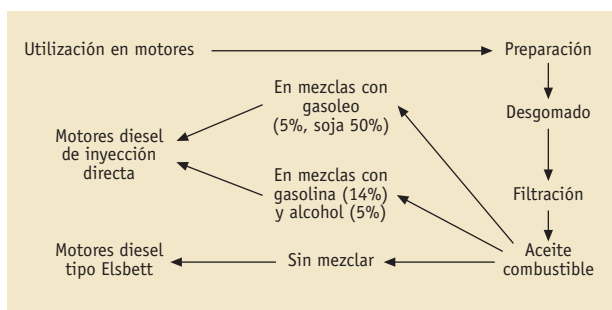
4.5.1 Utilización de biodiésel como combustible

Para la utilización de biocombustibles en motores diésel puede utilizarse bien aceites vegetales (cuya implantación es prácticamente testimonial a nivel industrial), o bien producir ésteres metílicos de aceites vegetales para su utilización como combustible (biodiésel). El biodiésel se puede emplear a su vez puro (como se hace en Brasil y en EE.UU.) o en mezclas de biodiésel/gasóleo, que es la manera de utilización más extendida.

4.5.1.1 Utilización directa de aceites vegetales

La naturaleza de los aceites vegetales plantea una serie de inconvenientes para su utilización directa en motores, puesto que estos precisan de una preparación consistente en un desgomado y filtración previos. Las semillas son prensadas separándose el aceite de la torta, sometiendo normalmente a las semillas a un calentamiento previo y a la acción de un disolvente de cara a conseguir rendimientos de extracción de aceite cercanos al 100%. La torta que se obtiene como subproducto, tiene un alto contenido en proteína por lo cual es posible su comercialización para alimentación animal, con lo que se consigue abaratar los costes del proceso de extracción.

En la gráfica 13 se representa un esquema de las posibilidades de utilización de aceites vegetales como combustibles de automoción.



GRÁFICA 13 *Aceites vegetales como combustible de automoción.*

Fuente: CIEMAT

La naturaleza de los aceites vegetales plantea una serie de inconvenientes para su utilización directa en motores. Así, la utilización de aceites sin transformar requiere, bien realizar una serie de transformaciones en los motores, o bien utilizar motores Elsbett. Ello es fundamentalmente debido a los problemas de viscosidad del biodiésel.

Los ácidos grasos de los aceites vegetales varían en su longitud y en el número de dobles enlaces contenidos en la cadena (reflejado por el índice de yodo). La presencia

de dobles enlaces les confiere que sean aptos para el consumo siendo su funcionamiento mejor a bajas temperaturas, si bien los hace fácilmente susceptibles de oxidación. Por otra parte, largas moléculas con dobles enlaces confiere a los aceites un carácter viscoso que implica una mayor dificultad de bombeo y atomización del combustible en los inyectores, traducido en un menor rendimiento. Los ácidos grasos poliinsaturados tienen una elevada reactividad que los hace susceptibles a la polimerización y formación de gomas, que se forman por oxidación durante el almacenamiento o por una deficiente polimerización térmica y oxidativa.

Por otra parte, cuanto mayor es el grado de insaturación de un aceite, mejor es su funcionamiento como combustible en condiciones de baja temperatura, lo cual es fundamental para un combustible diésel.

Cuando se pretende utilizar aceites vegetales en motores de inyección directa hay que recurrir a mezclas del aceite vegetal con gasóleo, lo que permite, modificando la proporción de los componentes, mantener las características del combustible. En cualquier caso, estas mezclas de aceite vegetal y diésel siguen presentando parte de los problemas asociados a los aceites vegetales, que son:

- Los ácidos grasos polinsaturados tienen una elevada reactividad que los hace muy susceptibles a la polimerización y formación de gomas.
- No se queman completamente dando por resultado depósitos carbonosos.
- Espesamiento del aceite lubricante.
- Elevada viscosidad. Dificultad para el bombeo y la formación de gotas.
- Bajo número de cetano. Combustión deficiente en motores rápidos.
- Comportamiento deficiente en frío. Problemas de bombeo y filtrabilidad.
- Ensuciamiento de inyectores. Déterioro de las prestaciones del motor.

Una solución a estos problemas sería a través de la modificación del motor diésel:

- Precalentamiento del combustible.
- Inyección en precámara. Inyectores autolimpiantes.
- Motores más adiabáticos: cámara de combustión labrada, menor refrigeración.
- Sistema de arranque con gasóleo.

Si bien se ha demostrado que se pueden utilizar en motores diésel sin modificar mezclas de hasta 1:2 (biodiésel:gasóleo), en el caso del aceite de soja [Ma, 1998].

Otra alternativa, es emplear mezclas de aceites vegetales brutos con gasolinas (14%) y alcohol (5%), que se puede utilizar como carburante de los motores diésel de manera directa.

Motores Elsbett

Como se mencionó anteriormente, la utilización de aceites sin transformar requiere, bien realizar una serie de transformaciones en los motores, o bien utilizar motores

Elsbett diseñados por la empresa alemana Elsbett Konstruktion aplicables tanto en motores monocilíndricos como en motores de hasta doce cilindros.

Se trata de un motor adiabático, es decir, que intercambia muy poco calor con el medio y evita entre el 25 y el 50 % de las pérdidas de energía a través del sistema de refrigeración. No dispone del convencional sistema de enfriamiento y esto le permite trabajar a una temperatura más alta y, por tanto, con un rendimiento termodinámico más grande. Por otra parte, tiene la característica de quemar la totalidad del combustible y por esto se puede considerar un motor prácticamente limpio. Además, el hecho de quemar aceite vegetal no libera dióxido de azufre. Es un motor preparado para la combustión de aceite vegetal crudo, sin refinar y sin éterificar, que no carboniza ni deja sustancias residuales, que tiene una eficiencia térmica superior al 40 % (recordemos que un motor de gasolina convencional o diésel no supera el 30 %). Esto quiere decir que este rendimiento más grande le permite proporcionar más energía mecánica útil.

Los elementos mecánicos que le distinguen de un motor diésel convencional son:

- Un pistón articulado con la parte superior aislada térmica y acústicamente situado dentro de una cámara de combustión de forma esferoidal.
- Uno o dos inyectores por cilindro, de un solo agujero y autolimpiables, que inyectan el aceite vegetal a la cámara de combustión tangencialmente y esto permite una perfecta nebulización, es decir, que la mezcla aire combustible es muy fina y esto evita que se hagan depósitos carbonosos.
- La tapa de los cilindros dispone de una pequeña cámara anular por la cual circula el aceite lubricante que se emplea como refrigerante. Ya que el sistema de refrigeración no es con agua, la tapa del cilindro no lleva junta. Un pequeño radiador de aceite permite cerrar el circuito del aceite lubricante refrigerante.

El hecho de que no necesite agua para la refrigeración ahorra piezas, peso y volumen al motor. Otro aspecto importante a destacar es la cámara de combustión esferoidal, la cual permite que haya un exceso de aire en la combustión del aceite vegetal y que se estratifique la temperatura del motor. Así, mientras el núcleo de la combustión puede llegar a los 1.300 °C, en cambio, la zona del contacto del pistón no supera los 650 °C normales de cualquier motor. La temperatura final de los gases de escape solamente es un poco superior a la de los motores diésel convencionales. Asimismo, la combustión se hace con menos cantidad de aire y, por tanto, se reduce la emisión de óxidos de nitrógeno. Las modificaciones del motor Elsbett permiten a los vehículos diésel funcionar tanto con gasóleo como con aceite vegetal con un buen rendimiento termodinámico y sin que se den problemas que afecten al buen funcionamiento del motor.

El motor Elsbett no es el único de los motores conocidos como policarburantes y semiadiabáticos. Sin embargo, sí es el único sistema que se puede aplicar en cualquier motor diésel con una mínima intervención y por un coste razonable de unos 2.500 a 3.200 euros. La intervención consiste, básicamente, en anular la cámara de agua del bloque,

cambiar la tapa de los cilindros y los pistones y añadir un pequeño radiador para el aceite refrigerante. La única condición es que el motor no disponga de elementos cerámicos.

4.5.1.2 Utilización de biodiésel

Para evitar introducir las modificaciones en motores que se requieren para la utilización de aceites vegetales sin modificar y mejorar sus características como carburantes, se recurre a transformarlos en sus derivados ésteres metílicos o etílicos. De esta manera se consigue que las largas cadenas ramificadas iniciales, de elevada viscosidad y alta proporción de carbono se transformen en otras de cadena lineal, de menor viscosidad y porcentaje de carbono y de características físico-químicas y energéticas más similares al gasóleo de automoción. Este biodiésel se puede utilizar bien puro, bien mezclado en distintas proporciones junto con el gasóleo de automoción, que es la forma más habitual de utilización.

En cuanto a sus propiedades como combustible de automoción, las características de los ésteres son más parecidas a las del gasóleo que las del aceite vegetal sin modificar. Así, la viscosidad del éster es ligeramente mayor que la del gasóleo, frente a las 10-20 veces superior de la del aceite vegetal crudo.

El biodiésel necesita contar con una especificación que incluya estas propiedades y garantizar la calidad del producto. La especificación vigente para estos combustibles se basa en la norma europea EN-590 transcrita a la legislación española en el Real Decreto RD398/1996.

El uso de biodiésel en automoción está totalmente extendido en Europa desde los últimos 10-12 años. En países como Alemania y Austria hay más de 1.800 gasolineras que incorporan un surtidor de biodiésel (ya sea 100% o mediante una mezcla del 2% al 30% de biodiésel y el resto de gasóleo).

La razón de realizar una mezcla con gasóleo convencional (EN590), radica en que los aceites vegetales tienen, entre otras cosas, la particularidad de disolver la goma y el caucho. Debido a que estos aceites vegetales son la materia prima para la fabricación del biodiésel, dicho producto también disuelve la goma y el caucho, materiales empleados en la fabricación de los conductos y las juntas del sistema de alimentación de los vehículos (latiguillos o manguitos) por lo que con el uso prolongado de biodiésel 100%, se podrían llegar a degradar dichos conductos, produciendo algún poro o pérdida de combustible (el biodiésel es biodegradable en un 98,3% en 21 días).

Desde mediados de los años 90, casi todos los fabricantes de vehículos (principalmente marcas alemanas), ya han substituido dichos conductos por conductos fabricados con materiales plásticos o derivados, con lo que el biodiésel no los disuelve.

En España, ante la imposibilidad de controlar si los vehículos que repostan en las estaciones de servicio están o no preparados para la utilización de biodiésel 100%, se emplea la mezcla BDP-10 (10% biodiésel + 90% gasóleo), y así cualquier vehículo lo puede utilizar sin ningún tipo de problema.

Otros productores de la Unión Europea, y debido a su política comercial, venden toda su producción a una empresa petrolera, la cual opta por la mezcla del biodiésel en un 5% máximo en todos sus gasóleos. De esta forma se considera al biocombustible como un aditivo porque no altera las características técnicas del gasóleo mineral según la norma EN 590.

Si se incorpora más de un 5%, la mezcla final no cumple la norma EN590, por lo que tendrían que informar y “etiquetar” dicho producto con un nombre diferente al de “Gasóleo ó Diésel” (fuente EBB -European Biodiésel Board)

En los motores de los automóviles, los problemas asociados por utilizar biodiésel como combustible de motores de inyección directa, son los que a continuación se presentan:

- La potencia del motor disminuye, porque el poder calorífico inferior (P.C.I.). del biodiésel es menor
- El consumo de combustible aumenta, ya que el biodiésel contiene menos poder calorífico que el gasóleo.
- Las emisiones de óxidos de nitrógeno generalmente aumentan, consecuencia de las mayores presiones y temperaturas que se alcanzan en la cámara de combustión, que a su vez se deben a un tiempo de retraso de la misma.
- Cuando se utiliza 100% de biodiésel, el aceite lubricante se contamina, debido a la menor viscosidad del éster en comparación a éste.
- Algunos materiales se deterioran con el biodiésel: pinturas, plásticos, gomas, etc. cuando se utiliza 100% de biodiésel.

Pros y contras

El uso de BDP 10 –mezcla de Biodiésel utilizada en España- ofrece las siguientes ventajas e inconvenientes en comparación con el gasóleo convencional.

Ventajas medioambientales frente al gasóleo, al reducirse las emisiones de:

- Monóxido de carbono
- Partículas
- Hidrocarburos
- Dióxido de carbono
- Óxidos de azufre
- Es biodegradable (98,3% en 21 días)
- No es tóxico

Ventajas técnicas frente al gasóleo:

- Mayor lubricidad, con lo cual se alarga la vida del motor y reduce su ruido.
- Mayor poder disolvente, que hace que no se produzca carbonilla ni se obstruyan los conductos y mantiene limpio el motor.

Inconvenientes técnicos:

- El Biodiésel tiene un punto de congelación (equivalente al CFPP del Gasóleo) entre 0° y -5°.
- Con la mezcla BDP10, la temperatura de congelación baja y se ajusta a la normativa española del CFPP para el período de invierno.
- La primera vez que se empieza a consumir Biodiésel BDP 10, y debido a su poder disolvente, puede que se deba realizar el primer cambio de filtros antes de lo normal, dependiendo del nivel de “suciedad” que haya en el motor y en el depósito de combustible del usuario.

El biodiésel más experimentado en motores ha sido el éster metílico obtenido a partir de aceite de colza (EMC) habiéndose realizado estudios en bancos de pruebas y en operaciones de demostración de vehículos con la finalidad de valorar el comportamiento energético y medioambiental del mismo.

En España, **CIDAUT** ha realizado importantes trabajos de caracterización del éster metílico de girasol, que incluyen las determinaciones de las propiedades como combustible, la caracterización en banco motor (potencias, consumos, emisiones), ensayos de ensuciamiento de inyectores, emisiones en Ciclo Europa y ensayo de duración. Analizando el comportamiento del biodiésel en vehículos, se desprende lo siguiente:

- Prestaciones: Leve incremento del consumo y ligera disminución de potencia con mezclas de hasta el 30%. Variaciones mayores con éster al 100% (-7% en potencia y +16% en consumo).
- Emisiones: Disminución importante de CO y hidrocarburos con 100% de éster. En el resto de los casos, similares al gasóleo. Eliminación de SOx e importante disminución de CO2 (gracias al proceso de fotosíntesis).
- Comportamiento en frío: problemas con porcentajes de mezcla superiores al 30%.
- Ensuciamiento de inyectores: mejor comportamiento que el gasóleo. A mayor proporción de éster mejores resultados.

De este modo, como conclusiones a las pruebas realizadas por CIDAUT se puede decir que:

- Las mezclas gasóleo-éster metílico de girasol, y en especial las inferiores al 20% de éster, presentan unas propiedades perfectamente válidas para su utilización en motores diésel.
- Excelente comportamiento en los inyectores de las mezclas gasóleo-éster: el éster actúa como un aditivo antiensuciamiento.
- No se ha detectado ningún tipo de anomalía relevante en ensayos de duración con mezclas entre 10% y 30% de éster con gasóleo.

4.5.2 Aplicaciones de la glicerina y su problemática

En la síntesis del biodiésel, se forman entre el aceite y el alcohol, normalmente metílico, ésteres en una proporción aproximada del 90% más un 10% de glicerina. La glicerina representa un subproducto muy valioso que de ser refinada a grado farmacológico puede llegar a cubrir los costos operativos de una planta productora.

La glicerina es eliminada en el proceso cuando se procede al lavado con agua. Sin embargo, la glicerina puede encontrarse en el biodiésel como consecuencia de un proceso inapropiado, como puede ser una insuficiente separación de la fase de glicerina o un insuficiente lavado con agua.

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

Así, como coproducto de la producción de biodiésel se obtiene por tanto glicerina, de calidades farmacéutica e industrial. Estas glicerinas tienen un valor económico positivo y su comercialización forma parte de la rentabilidad del biodiésel. Sin embargo, la creciente oferta de glicerina está provocando ya una disminución de sus precios de venta con la consiguiente problemática de merma de rentabilidad que ello supone para el sector del biodiésel. Al nivel actual de producción, las glicerinas tienen suficientes salidas comerciales actualmente, pero conseguir una producción de biodiésel de la magnitud del objetivo fijado para el 2010 podría tener problemas en la saturación del mercado de glicerina, por lo que es especialmente relevante asegurar los canales de comercialización de este producto. El aumento de la producción de biodiésel no hará más que agravar esta tendencia. A nivel mundial la situación es similar, tratándose de un mercado relativamente pequeño, con una producción mundial en torno a 0,8 millones de Tm según datos del *Institut Français du Pétrole* (IFP), de las cuales unas 100.000 Tm provienen de la producción de biodiésel.

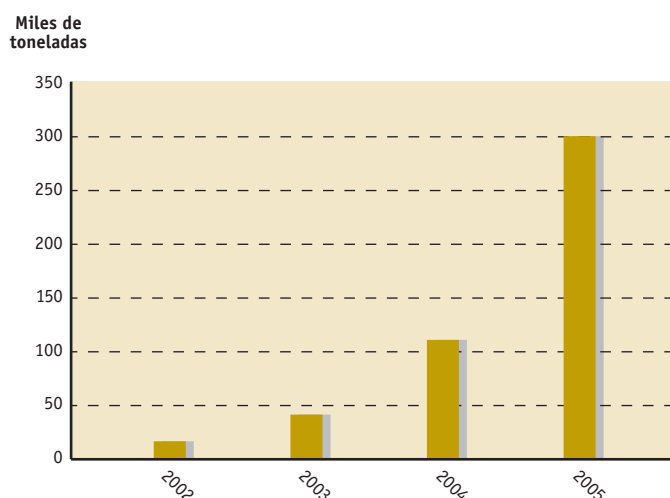
Como conclusión, la glicerina se enfrenta a un reto de investigación y desarrollo de cara a tener una salida para la misma en caso que como es previsible su producción (como subproducto de la reacción de transesterificación) aumente significativamente en los próximos años. Por ello, se deben buscar nuevas salidas y aplicaciones al producto final o bien encontrar nuevas aplicaciones en las que ésta actúe como materia prima química.

4.6 Producción de biodiésel

4.6.1 Producción de biodiésel en España

Actualmente en España existen 10 plantas que producen biodiésel y decenas se encuentran en proyecto. Sin embargo, sólo 128 [RGB] de las más de 8.500 gasolineras que hay en España ofrecen biodiésel [RER, 2005]; por el contrario en Alemania y Austria este producto se comercializa ya en 1.800 gasolineras.

España experimenta un crecimiento en producción de biodiésel proporcional a la tendencia europea alcanzando, a finales de 2004, casi el 50% del objetivo inicial del PER. En la gráfica 14 se puede observar el crecimiento exponencial experimentado en la producción de Biodiésel en España. Es especialmente significativo el crecimiento conseguido entre el año 2004 y 2005.

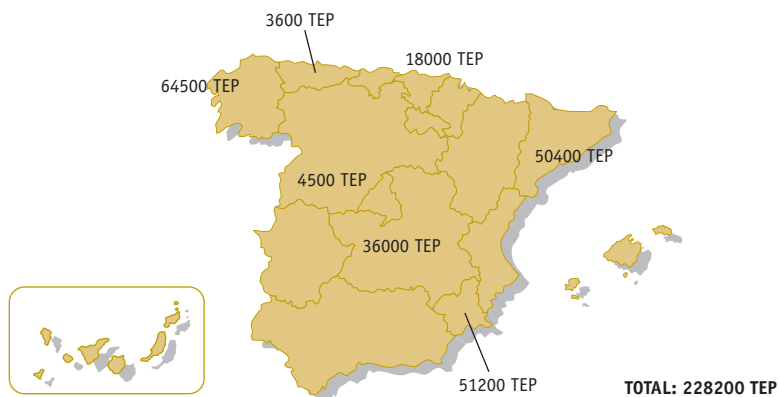


GRÁFICA 14 *Producción de biodiésel en España.*

Fuente: Asociación de Productores de Energía Renovable (APPA).

Aunque a finales de 2005 la capacidad instalada en España, de acuerdo con la gráfica 14, es de 300.000 Tm, si se tiene en cuenta que algunas de las plantas no estarán en servicio hasta finales de año y que, por tanto, su actividad será testimonial, la producción de biodiésel en España efectiva para 2005 fue del orden de las 150.000 Tm.

En la gráfica 15 se representa la producción de biocarburantes en España por Comunidades Autónomas para el año 2004.



GRÁFICA 15 *Producción biocarburantes a finales de 2004.*

Fuente: IDEA.

En la tabla 9 se adjuntan las instalaciones de producción de biodiésel existentes en España que se encuentran en producción.

Promotor	Emplazamiento	Capacidad (Tm/a)	Tecnología	Observaciones
Stocks del Vallès	Montmeló (B)	6.000	B.D.I. (A)	En producción (12/02)
Bionor Transformación	Berantevilla (A)	30.000	Nopek (EE.UU)	En producción (05/03)
Bionet Europa	Reus (T)	50.000	AT Agrar (D)	En producción (10/03)
UCM / IDAE	Alcalá de Henares (M)	5.000	UCM	En producción (04/04)
Bionorte	San Martín (As)	4.000	-	En producción (03/05)
Biodiésel Castilla la Mancha	Santa Olalla (To)	10.000	B.D.I. (A)	En producción (05/05)
E.H.N.	Caparroso (Na)	35.000	Lurgi (D)	En producción (05/05)
Biocarburantes Almadén	Almadén (CR)	20.000	Enegea (A)	En construcción (11/05)
General de Bicarburos	Pontejos (S)	150.000	AT Agrar (D)	En construcción (12/05)
Grupo Ecológico Natural	Palma de Mallorca (IB)	6.000	-En proyecto	
EMTs de Cataluña/ IDAE/Sammet on Plus	Martorell (B)	100.000	-En proyecto	

TABLA 9 *Instalaciones de biodiésel en España.*

Fuente: Grupo de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Rey Juan Carlos.

A continuación se describen de manera breve algunas de las características de las plantas en funcionamiento:

- La empresa **Bionet Europa S.L.** tiene una planta de nivel precomercial, que utiliza como materia prima aceites vegetales fritos y oleínas. La planta está situada en Reus (Tarragona) y puede producir 50.000 toneladas/año de biodiésel para uso en flotas cautivas de autobuses.
- En el año 2003 se inauguró en Tárrega (Lérida) el primer surtidor en toda España que suministra al por menor biodiésel. El combustible se comercializa con el nombre de BDP 30, proviene de la planta de **Stocks del Vallés** (empresa participada por el Institut Català de Energia) en Montmeló (Barcelona) cuya planta produce 6.000 toneladas/año (ampliable a 18.000) a partir de aceites usados. Esta empresa catalana, que cuenta con 5.700 clientes y ha producido hasta la fecha 4.000 toneladas, distribuye en 21 gasolineras que cuentan con surtidores de este carburante, la mayoría concentradas en Cataluña. El objetivo es producir 6.000 toneladas anuales, aunque la planta tiene capacidad para producir y almacenar tres veces más. La puesta en marcha de Stocks al Vallés supuso un montante cercano a los cinco millones de euros.

Las primeras pruebas que ha realizado Stocks del Vallés utilizaron los autobuses públicos de Mataró (Barcelona). Se utilizó biodiésel puro, aunque también es posible mezclándolo con gasóleo (hasta un 70%). El consistorio de Madrid también tiene previsto que el 40% de los autobuses de transporte público funcione con este combustible.

- En la **Comunidad de Madrid** existe una planta, cuya construcción se ha desarrollado en los años 2002 y 2003, para la producción de biodiésel de 1.000 – 1.500 toneladas/año y que utiliza aceites vegetales usados que se recogen para su reciclado de restaurantes y establecimientos similares. A partir de esta materia prima, y mediante un proceso desarrollado por el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Complutense de Madrid, se produce un biodiésel que se utiliza, mezclado con gasóleo, como combustible en autobuses públicos de transporte de pasajeros de Alcalá de Henares y Madrid.

La construcción y desarrollo de la planta ha sido liderada por el IDAE, con el apoyo financiero de la Comunidad de Madrid y la colaboración del Ayuntamiento de Alcalá de Henares, que ha cedido la parcela correspondiente. La Universidad Complutense ha aportado la tecnología y el personal técnico y de operación durante la etapa de optimización de la planta.

El proyecto tiene por objeto demostrar la viabilidad técnica del proceso desarrollado a escala de laboratorio por la Universidad Complutense y, una vez acreditada su viabilidad, optimizar el proceso productivo y, así, desarrollar una tecnología comercial española que permita la valorización energética de estos residuos.

La utilización de este biodiésel en vehículos tiene varias ventajas medioambientales. Por un lado, se reciclan aceites vegetales usados, que de otro modo se desecharían directamente. Por otro lado, se reducen las emisiones de contaminantes de los vehículos. La Comunidad de Madrid ha subvencionado esta planta por un importe total de 300.000 €.

- La empresa **Biocombustibles Cuenca S.A.** y la empresa de ingeniería **Técnicas Reunidas, S.A.** comenzó a construir en febrero de 2006 (siendo el plazo de ejecución de 14 meses) la planta de biocombustibles que va a poner en marcha en esta ciudad y que será la mayor de España de sus características y una de las mayores de Europa, con una capacidad de producción mínima de 40.000 Tm de biodiésel al año. Además, será la segunda factoría que procese aceites vegetales vírgenes en España tras la que ha entrado en funcionamiento en Navarra, mientras que ya existen cuatro plantas que procesan aceites reciclados procedentes del uso en la cocina, concretamente, dos ubicadas en Cataluña, una en Alcalá de Henares y la restante en el País Vasco. La factoría se dedicará a procesar aceites vegetales vírgenes para la obtención de biocombustible, fundamentalmente de girasol, aunque también de otros aceites como colza, soja, palma o algodón, ya que se trata de una planta “multiproducto”.
- En Andalucía se creó la empresa **Albabio S.L.**, sociedad de capital mixto integrada por la Empresa pública de Gestión Medioambiental S.A, (**EGMASA**) y Albaida Recursos Naturales y Medioambientales S.A., esta última participada en un 75% por Cajamar, que se dedicará a gestionar aceites usados y grasas animales para su transformación en biodiésel, combustible alternativo al gasóleo procedente del petróleo. Está previsto que en las instalaciones de esta empresa en Níjar (Almería), la primera planta de biodiésel en Andalucía, se produzcan anualmente unas 6.000 toneladas de biodiésel. Para su puesta en marcha se han invertido 7.200.000 euros, el 40% aportado por la empresa dependiente de la Consejería de Medio Ambiente, **EGMASA**.
- En Catarroso (Navarra) se ha inaugurado por parte de la empresa **Acciona Energía** una planta de producción de biodiésel con capacidad de 30.000 toneladas/año. Las plantas (una de biodiésel y otra de bioetanol) se situarán frente a la antigua estación del ferrocarril de Catarroso.
Según la empresa Acciona Energía la planta de biodiésel ha costado alrededor de 30 millones de Euros, mientras que la de bioetanol alcanzaría los 90 millones.
- La empresa **Repsol-YPF** ha anunciado que piensa construir una planta de biodiésel en León. La planta de obtención de biodiésel que Repsol y UcoGal van a desarrollar en la provincia leonesa logrará una producción final de combustible refinado de 100.000 toneladas. La cifra es casi tres veces superior a la capacidad de las plantas que actualmente extraen combustible biológico a partir de aceites vegetales. Para llegar a esa producción se precisarán hasta 300.000 toneladas de semillas de oleaginosas (colza, soja, nabina o girasol).
- Por otra parte, está en estudio la construcción de una planta de biodiésel en Ferrol por el Instituto Enerxético de Galicia (**INEGA**) y la sociedad **Biodiésel Production, S.A.**
- Asimismo, existen también iniciativas en Asturias y Valencia para la construcción de plantas de biodiésel.

Por último, se presenta en la tabla 10 una relación de las plantas de biodiésel que se encuentran en estudio y proyección. Existen otras más, pero por su importancia y por lo avanzado del estado del proyecto enumeramos las siguientes:

Promotor	Localidad	Provincia	Capacidad (Tm/año)
Grup Ecologic Natural	Llucmajor	Mallorca	16.000
ACOR	Olmedo	Valladolid	66.000
Biodiésel Castilla La Mancha	Ocaña	Toledo	80.000
Biocombustibles Andaluces	Arahal	Sevilla	60.000
Biodiésel Productions	Escombreras	Murcia	250.000
Bioenergética Extremeña 2020 S.L.	Valdetorres	Badajoz	60.000
General de Biocarburantes S.A. (Geobiosa)	Pontejos	Cantabria	150.000

TABLA 10 *Plantas de biodiésel en España en estudio.*

Fuente: CO2-Solutions.

4.6.2 Producción de biodiésel en Europa

Según publica el European Biodiésel Board, la producción de biodiésel, en el año 2004, fue de casi dos mil millones de toneladas, destacando Alemania como primer productor, tal y como se puede ver en la tabla 11, con algo más de la mitad de todo el combustible producido. Esto supone un aumento del 35% respecto a los datos del 2003. En el European Biodiésel Board [RFEB] se detallan las plantas de producción que hay en los diferentes países europeos miembros.

PAIS	Producción en Toneladas
Alemania	1.035.000
Francia	348.000
Italia	320.000
Dinamarca	70.000
Republica Checa	60.000
Austria	57.000
Eslovaquia	15.000
España	13.000
Reino Unido	9.000
Lituania	5.000
TOTAL 2004	1.932.000

TABLA 11 *Producción de Biodiésel en Europa en 2004.*

Fuente: www.ebb-eu.org

Muchas acciones de sensibilización se están llevando a cabo por parte de gobiernos y organismos oficiales para la promoción de las energías renovables y, en particular, del biodiésel.

A título ilustrativo y demostrando el interés que tiene para la UE el fomento de estas tecnologías, se señala que en julio del año 2005 todos los vehículos que transportaban a los líderes mundiales, ministros y técnicos que asistieron a la reunión del G8 en Gleneagles (Escocia), estaban propulsados por biodiésel. Este combustible, fabricado por la empresa Argent Energy, consistía en una mezcla al 5% de diésel mineral de bajo contenido en azufre y biodiésel producido a partir de aceites reusados y grasas vegetales.

Esta proporción, 5% biodiésel y 95% carburante convencional, es la más usada en Europa pero no por ello supone el límite máximo que puede ser utilizado. Varias flotas cautivas Americanas y Canadienses funcionan con mezclas al 20%. En California se distribuye biodiésel sin mezclar, al que se le añaden aditivos para que pueda funcionar hasta -20°C. Esta misma fórmula se está probando en Alemania y Austria.

Un reciente estudio del Departamento de Agricultura de Estados Unidos ha revelado que la capacidad de producción de biodiésel de la Unión Europea podría exceder los cuatro millones de toneladas a mediados de 2006. De acuerdo con el Consejo Europeo de Biodiésel (EBB), la producción de biodiésel de la UE se estima que pasó de 1,45 millones de toneladas en 2003 a 1,85 millones de toneladas en 2004.

Cerca del 80% del biodiésel de la Unión Europea es elaborado con aceite de semilla de colza, y aproximadamente una tercera parte de la cosecha de esta semilla de 2004 fue utilizada en la producción de biocarburantes. Durante el último año, la demanda de aceite de semilla de colza para la fabricación de combustible ha repuntado en la medida que la Unión Europea está haciendo un esfuerzo por disminuir su dependencia en las importaciones de combustibles fósiles, así como de cortar la emisión de gases invernaderos.

Tal y como se puede comprobar en la tabla 11, Alemania es el principal productor de biodiésel de la Unión Europea. En 2004, Alemania produjo un millón de toneladas de biodiésel, que equivalen al 56% de la producción total de la UE. Se estima que a mediados de 2006, la producción de biodiésel de Alemania oscilará entre 1,9 y 2,1 millones de toneladas. Para esa misma fecha, la producción de biodiésel de Francia podría alcanzar las 700.000 toneladas, la de Italia 525.000 toneladas, en tanto que en Reino Unido podría ubicarse en 250.000 toneladas. De otra parte, se estima que los países con menor capacidad de producción de biodiésel en 2006 serían Dinamarca (35.000 toneladas); Suecia (9.000 toneladas) e Irlanda (5.000 toneladas).

Biodiésel en Alemania

Alemania es con diferencia el país de la Unión Europea con mayor producción de biodiésel, por lo que se refleja en este apartado las características de la producción en este país.

La capacidad de producción alemana de biodiésel en 2004 ascendió a 1,1 millones de toneladas en 2004, y se espera que en 2005 se superen los 1,4 millones de toneladas de Biodiésel [APPA].

Las ventas de biodiésel en 2004 a través de estaciones de servicio en Alemania ascendieron a 376.6 millones de litros, desde los 360.2 millones de litros en 2003 y 189.6 millones de litros en 2002. En 2003, Alemania presentó como dato 800.000 Tm de biodiésel consumidas, lo que significa el 1,4% del consumo total de combustibles. Alemania importa toda la producción danesa de biodiésel (41.000 ton en 2003). Además, tuvo un consumo de 5.000 Tm de aceite puro de colza (0,88% del consumo total).

Para comprender la evolución alemana es interesante destacar el hecho de que hasta el comienzo del 2004, la mezcla de biocombustible no gozaba de exención fiscal, por lo que la producción alemana de biocombustible (biodiésel) ha ido dirigida en exclusiva a la utilización pura del mismo. A partir de enero de 2004, el gobierno alemán eximió a los biocombustibles mezclados con combustibles con el objetivo de dar un mayor impulso al biodiésel y bioetanol en el país. Actualmente, se permiten mezclas de hasta el 5% para el biodiésel, aunque no se descarta que en un futuro se alcancen mezclas de hasta el 40%.

CAPÍTULO 5

Bioetanol

- 5.1. Producción de bioetanol (PÁG. 76)
- 5.2. Bioetanol como combustible (PÁG. 85)
- 5.3. El bioetanol como aditivo de las gasolinas: ETBE (PÁG. 87)
- 5.4. Aditivo de mejora de la ignición en motores diesel (PÁG. 88)
- 5.5. Pilas de combustible (PÁG. 89)
- 5.6. Barreras en el uso del bioetanol (PÁG. 90)
- 5.7. Producción de bioetanol (PÁG. 91)

El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar o biomasa. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. Las plantas crecen gracias al proceso de fotosíntesis, en el que la luz del sol, el dióxido de carbono de la atmósfera, el agua y los nutrientes de la tierra forman moléculas orgánicas complejas como el azúcar, los hidratos de carbono y la celulosa, que se concentra en la parte fibrosa la planta.

Actualmente, el bioetanol es el biocombustible con mayor producción mundial, del que se elaboraron más de 40.000 millones de litros durante el año 2004 en todo el mundo. Para su fabricación se pueden utilizar una gran cantidad de materias primas. Brasil produjo 15.066 millones de litros, principalmente de caña de azúcar, EE.UU. 13.351 millones de litros, procedentes del almidón del maíz, por resaltar los dos mayores productores, pero también se utiliza remolacha, cereal o residuos forestales. Se está estudiando la posibilidad de cultivar árboles, con alto contenido de celulosa, con el único fin de producir etanol, como pueden ser el chopo o el sauce. Igualmente el cultivo específico de algunas plantas con el fin de producir combustible podría ser una alternativa a las tierras sin cultivo, en el marco de la Política Agraria Común (PAC).

Otra alternativa a las cosechas dedicadas a fines energéticos, es el uso de residuos de procesos agrícolas, forestales o industriales, con alto contenido en biomasa. Estos residuos pueden ir desde la paja de cereal a las “limpias” forestales, pasando por los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o las cáscaras de cereal o de arroz. Los residuos tienen la ventaja de su bajo coste, ya que son la parte no necesaria de otros productos o procesos, salvo cuando son utilizados en la alimentación del ganado. Los RSU tienen un alto contenido en materia orgánica, como papel o madera, que los hace una potencial fuente de materia prima, aunque debido a su diversa procedencia pueden contener otros materiales cuyo preproceso de separación incrementa mucho el precio de la obtención del bioalcohol.

La utilización del etanol como combustible ha pasado por varias etapas a través de los años. En los orígenes de la industria automovilística fue el principal combustible: los motores de ciclo Otto se diseñaron en principio para utilizarlo, pero posteriormente con el desarrollo de la industria basada en el petróleo los fabricantes de motores se decantaron por esta segunda opción. Cuando se temió por la estabilidad de estos mercados en los años 20 y el posterior embargo petrolífero del año 1973 se volvió a invertir en el desarrollo de bioetanol. El primer país que asumió este reto fue Brasil que a partir de ese año comenzó a mezclar etanol y gasolina en la proporción de 22:78. En 1979 Brasil produjo los primeros automóviles que podían funcionar con alcohol hidratado (95% de etanol y 5% de agua), más tarde, en 1980 la mayor parte de los coches fabricados estaban diseñados para funcionar exclusivamente con etanol.

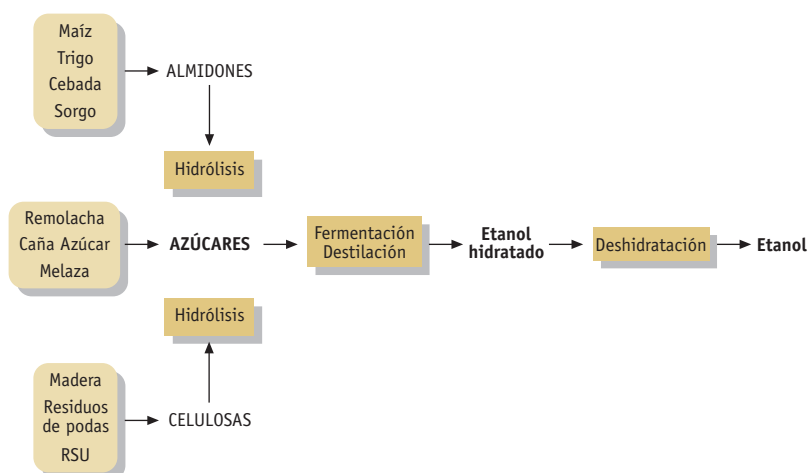
Hasta los años 80 la principal motivación para la producción de etanol fue su uso como combustible alternativo para la automoción, y así disminuir la dependencia de las importaciones de crudo y minimizar el impacto que las fluctuaciones del mercado ocasionan en los precios. A partir de mediados de los 80, a esta motivación se ha unido las políticas de mejoras medioambientales, principalmente en lo relativo a emisiones gaseosas. El creciente interés que han generado en los últimos años los problemas derivados del cambio climático, producido por las emisiones de gases de “efecto invernadero”, ha hecho que se busquen combustibles más respetuosos con el medio ambiente. Al igual que en el caso del biodiésel, la combustión del bioetanol produce el mismo CO_2 que absorbió la planta durante su crecimiento, si se exceptúa el emitido debido a la actividad energética necesaria en el proceso de su producción, por lo que algunos autores dicen que el balance es cero, en cuanto a las emisiones de CO_2 .

El etanol se usa en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 o el 10%, E5 y E10 respectivamente, que no requieren modificaciones en los motores actuales. Un obstáculo importante es la legislación europea sobre la volatilidad de las gasolinas que fija la proporción de etanol en mezclas E5. Concentraciones más elevadas, autorizadas en Suecia y Estados Unidos, permitirían disponer de un vehículo flexible, con un depósito, motor y sistema de combustible único capaz de funcionar con gasolina y etanol, solos o mezclados en cualquier proporción [Cabrera, J. A., 2006]. La otra alternativa para su uso es en forma de aditivo de la gasolina como etil-tercbutil éter (ETBE).

5.1 Producción bioetanol

El bioetanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible.

En la gráfica 16 se puede ver, de forma esquemática, el proceso completo de obtención del alcohol, a partir de las principales materias primas que se utilizan para su producción.



GRÁFICA 16 *Proceso de producción de bioetanol. Producción propia.*

Principalmente se utilizan tres familias de productos para la obtención del alcohol:

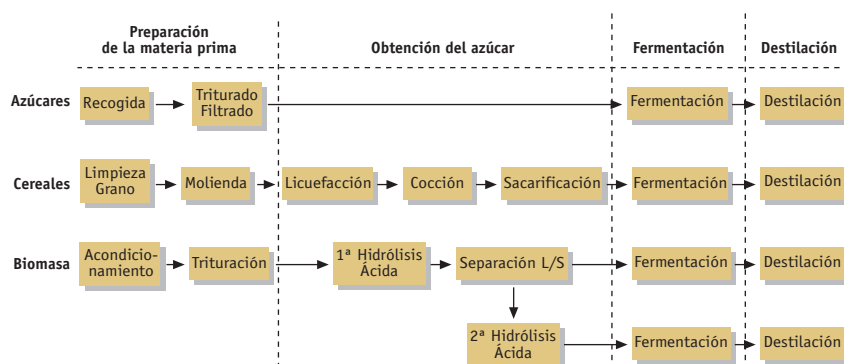
- Azúcares, procedentes de la caña o la remolacha, por ejemplo.
- Cereales, mediante la fermentación de los azúcares del almidón.
- Biomasa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa.

Los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol. Una gran parte de los materiales con alto contenido en celulosa, susceptibles de ser utilizados para estos fines, se generan como residuos en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial. Los residuos agrícolas proceden de cultivos leñosos y herbáceos y, entre otros, hay que destacar los producidos en los cultivos de cereal. Por su parte, los residuos de origen forestal proceden de los tratamientos silvícola y de mejora o mantenimiento de los montes y masas forestales. También pueden utilizarse residuos generados en algunas industrias, como la papelera, la hortofrutícola o la fracción orgánica de residuos sólidos industriales. Muchos de estos residuos no sólo tienen valor económico en el

contexto donde se generan sino que pueden ser causa de problemas ambientales durante su eliminación [Cabrera, J. A., 2006].

Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. Para obtener los azúcares de la biomasa, esta es tratada con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que es entonces fermentada. Tres son los principales métodos para extraer estos azúcares: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática.

En la gráfica 17 se pueden ver las diferentes formas de procesar las materias primas, en función de su origen, para la obtención de sus azúcares.



GRÁFICA 17 *Diferenciación de procesos de producción de bioetanol.*

Fuente: Abengoa.

A continuación se describen los pasos implicados en los procesos más relevantes de cada una de estas alternativas para la elaboración del alcohol.

5.1.1 Acondicionamiento de las materias primas

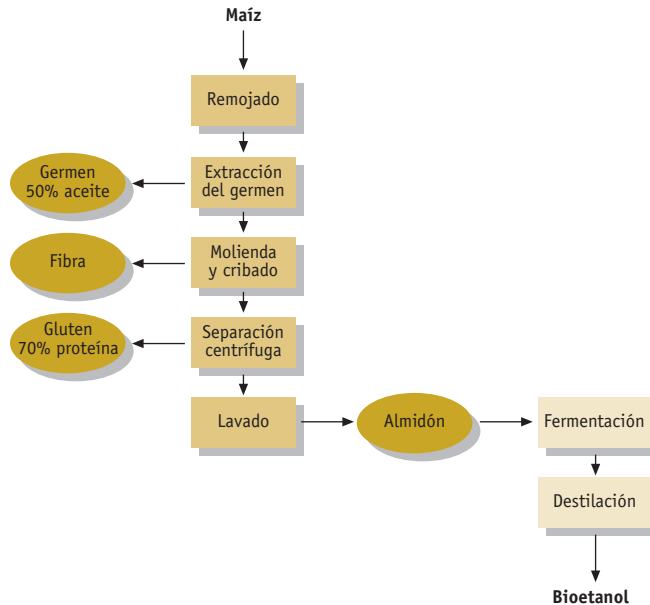
Los cereales son la principal fuente para la producción de bioetanol, destacando el uso del maíz en EE.UU. y la cebada y el trigo en las plantas instaladas en España. Se trata de plantas pertenecientes a Abengoa, primer productor europeo de bioetanol. En el caso de los cereales, para los procesos de preparación de la materia prima y la obtención de los azúcares que contienen, se utilizan principalmente dos tecnologías: Wet milling y Dry milling.

Proceso de molido húmedo (Wet Milling Processes)

Esta tecnología se aplica normalmente en plantas con grandes producciones de alcohol y es utilizada por aproximadamente dos tercios de los productores en

EE.UU. Este sistema es elegido cuando se quieren obtener otros subproductos, tales como el sirope, fructosa, dextrosa, etc. además de la producción del alcohol. Es un proceso complejo, dado el elevado número de pasos a seguir en el pretatamiento del maíz y su separación en sus diferentes componentes.

En este proceso, el maíz es “escaldado” en agua caliente, lo que ayuda a romper las proteínas, liberar el almidón presente en el maíz y ablandar el grano para el proceso de molido. El maíz es molido para obtener el germen, la fibra y la fécula. Con el germen se obtiene aceite y la fécula se centrifuga y sacarifica para producir una pasta de gluten húmeda. En la gráfica 18 se puede ver la secuencia sintetizada del proceso.



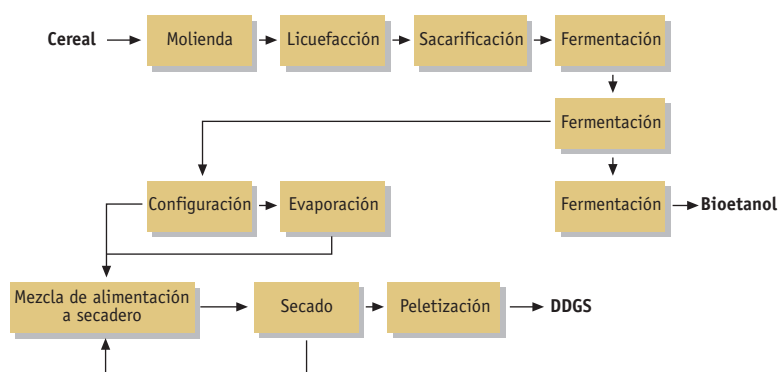
GRÁFICA 18 *Proceso de molido húmedo.*

Fuente: Abengoa.

El proceso comienza con el secado de los granos, posteriormente se inspeccionan automáticamente y se limpian de piedras, trozos de caña o paja y cualquier otra impureza. El maíz se remoja en grandes tanques en una solución que contiene pequeñas cantidades de dióxido de azufre y ácido láctico. Estos dos productos químicos, en agua a una temperatura de unos 50 °C, ayudan a ablandar los granos, en un proceso que puede durar entre uno y dos días. Durante este tiempo el maíz se hincha, luego se ablanda y debido a las condiciones ligeramente ácidas de la disolución se libera el almidón. La siguiente parte del proceso es pasarlo a través de un separador que, principalmente, hace que el germen de los granos flote en la parte superior de la mezcla y sea posible recogerlos fácilmente (debido al contenido de aceite de estos). A partir de ahí primeramente se obtiene la parte fibrosa y posteriormente se separa el almidón de las proteínas por un proceso de centrifugación.

Proceso de molido en seco (Dry Milling Process)

Este proceso consiste en limpiar y moler los granos de cereal hasta reducirlos a finas partículas por un sistema mecánico. Se produce una harina con el germen, la fibra y la fécula del maíz. Para producir una solución ‘azucarada’ la harina es hidrolizada o convertida en sacarosa usando enzimas o una disolución ácida. La mezcla es enfriada y se le añade la levadura para que comience a fermentar. En la gráfica 19 se puede ver el proceso detallado.



GRÁFICA 19 *Proceso de molido seco.*

Fuente: Abengoa.

De la masa resultante, una vez obtenido el alcohol, se obtiene un subproducto (DDGS, en inglés Dried Distiller Grains of Solubles, granos secos, solubles, de destilería, que se distribuyen en forma de pellets) que se puede utilizar como alimentación para ganado. Esta tecnología es usada en plantas de pequeño y medio tamaño.

5.1.2 Hidrólisis

Las celulosas no pueden ser fermentadas directamente, es necesario convertirla en azúcares más sencillos para su conversión en alcohol. La hidrólisis es un proceso químico que divide la molécula de celulosa por la acción de la molécula de agua. Las complejas estructuras de la celulosa (celulosa, hemicelulosa y lignina) son divididas en diferentes procesos para conseguir una solución azucarada, y eliminar productos de descomposición de los azúcares que pueden inhibir o, al menos, dificultar el proceso de fermentación. Principalmente se realizan procesos de hidrólisis de ácidos concentrados y bajas temperaturas, de ácidos diluidos y altas temperaturas y enzimáticos.

Hidrólisis con ácidos concentrados

En este proceso se añade entre 70-77% de ácido sulfúrico a la biomasa, que ha sido secada previamente hasta obtener una humedad menor del 10%. La proporción de ácido es de 1:25 por cada parte de biomasa y se mantiene a una temperatura controlada de 50°C.

Entonces se añade agua, para diluir el ácido a un 20-30% de la mezcla, aumentando su temperatura hasta los 100°C. El gel producido en este proceso es prensado para obtener la mezcla de ácido y azúcar, que finalmente son separados. Este es un proceso del que se obtiene rendimientos muy elevados pero a un coste igualmente muy elevado, por lo que industrialmente no se realiza.

Hidrólisis con ácidos diluidos.

Es uno de los procesos de hidrólisis más antiguos, simples y eficientes para la producción del alcohol. El primer paso es mezclar una proporción de 0,7% de ácido sulfúrico con la hemicelulosa presente en la biomasa, para que se hidrolice a 190°C. La segunda parte consiste en optimizar el rendimiento de la reacción con la parte de la celulosa más resistente, para ello se usa un 0,4% de ácido sulfúrico a 215°C. Finalmente los líquidos hidrolizados son neutralizados y recuperados, normalmente mediante percolación.

Hidrólisis enzimática

Consiste en “romper” (hidrolizar) la celulosa por la adición de determinadas enzimas. La celulosa es degradada por las celulasas a azúcares, que pueden ser fermentados por levaduras o bacterias para producir etanol.

En síntesis, el proceso consiste en descomponer la celulosa y la hemicelulosa del residuo en azúcares sencillos y transformarlos en etanol por fermentación. En primer lugar se lleva a cabo un pretratamiento del residuo cuyo objetivo es alcanzar los mejores resultados en las etapas siguientes (hidrólisis y fermentación). Desde el punto de vista económico, esta etapa es crítica, puesto que gran parte del coste total del proceso estaría en esta primera etapa.

Como resultado del pretratamiento se obtiene una disolución de azúcares provenientes de la ruptura de la hemicelulosa y un residuo sólido (constituido principalmente por la celulosa del residuo original).

La hidrólisis enzimática presenta ventajas frente a la hidrólisis química, como menores costes de equipamiento (debido a que se realiza a presión atmosférica y a temperatura próxima a la ambiental), mayores rendimientos y no necesita utilizar agentes químicos.

5.1.3 Fermentación del azúcar

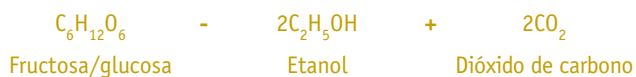
La última etapa del proceso consiste en la fermentación por levaduras de la glucosa liberada a partir de la celulosa, así como la de los azúcares procedentes de la hemicelulosa que se han liberado durante los pretratamientos anteriores.

La levadura contiene una enzima llamada invertasa, que actúa como catalizador ayudando a convertir los azúcares en glucosa y fructosa (ambos $C_6H_{12}O_6$).

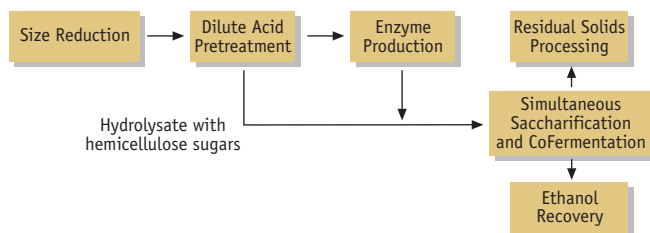
La reacción química es la siguiente:



La fructosa y la glucosa reaccionan con otra enzima llamada zimasa, que también está presente en la levadura para producir el etanol y dióxido de carbono.



Un avance muy importante sobre este proceso fue la introducción simultánea del tratamiento de sacarificación y el de fermentación, patentado por la Gula Oil Company y la Universidad de Arkansas. Este proceso reduce el número de reactores necesarios durante la producción, ya que elimina el reactor separado de hidrólisis, y, más importante aún, evita el problema de la producción de agentes inhibidores asociados a las enzimas [PDE]. A la vez que el azúcar es producido por las enzimas, la fermentación lo convierte en alcohol. Posteriormente este proceso se ha mejorado incluyendo la fermentación de múltiples sustratos de azúcar. A continuación se muestra el proceso de forma esquemática en la gráfica 20.



GRÁFICA 20 *Proceso simultáneo de sacarificación y fermentación de la empresa Gula Oil Company.*

Fuente: D.O.E.

5.1.4 Destilación

El alcohol producido por destilación contiene una parte significativa de agua, que debe ser eliminada para su uso como combustible. Para ello se utiliza un proceso de destilación. Dado que el etanol tiene un punto de ebullición menor (78,3°C) que el agua (100°C), la mezcla se calienta hasta que el alcohol se evapore y se pueda separar por condensación de éste.

5.1.5 Plantas de producción de bioetanol

En España existen actualmente dos plantas productoras de bioetanol, Ecocarburantes Españoles y Bioetanol Galicia, situadas en Cartagena y A Coruña, respectivamente, que son propiedad de la compañía Abengoa. Esta misma empresa junto con Ebro Puleva prevé inaugurar durante el 2006, una tercera planta, Biocarburantes de Castilla y León, en Babilafuente (Salamanca) [Cabrera, J. A., 2006]. A continuación se detallan brevemente estas plantas junto con los principales proyectos en desarrollo.

Ecocarburantes Españoles

La planta está situada en el Puerto de Escombreras en la ciudad de Cartagena en la región de Murcia. Fue construida en 1999, y tiene una capacidad de producción de 118.000 toneladas anuales de bioetanol con 130.000 toneladas de pienso animal seco (DDGS). En el año 2000, se ha añadido una planta de destilación de alcohol vínico con una capacidad anual de 50 millones de litros. La planta de Ecocarburantes emplea a más de 80 personas en diversas áreas como el mantenimiento, operaciones, el manejo de material, ingeniería, logística y marketing y comercialización, también incluye la parte de la administración del grupo de negocio de Abengoa Bioenergía.

Bioetanol Galicia

Esta planta está situada al noroeste de España, en Texeira cerca de A Coruña, Galicia. Fue construida en 2001, con una capacidad de producción de 139.000 Tm/año de bioetanol, 96.000 toneladas de pienso animal seco (DDGS). En el año 2003, se añadió una planta de destilación de alcohol vínico con una capacidad anual de 50 millones de litros. Bioetanol Galicia emplea a 65 personas en diversas áreas como el mantenimiento, operaciones, el manejo de material, la ingeniería, la logística y el marketing y comercialización.

Además estas dos plantas tienen una capacidad de producción que permite exportar a países de la Unión Europea, accediendo a los mercados europeos más rápidamente y de forma más económica.

Biocarburantes de Castilla y León

Esta planta empezará a producir bioetanol a mediados del año 2006 con una producción estimada de 200 millones de litros de alcohol al año. Ha sido concebida para producir etanol usando como materias primas cereal (trigo, cebada, maíz) y paja de cereal. Cabe destacar que esta instalación industrial no solo utilizará como materia prima para la producción del etanol el grano de cereal sino que también utilizará la paja del cereal, aunque es un proceso laborioso y que empezará a funcionar de forma experimental hasta finales de ese año. Más adelante se pretende

obtener alcohol carburante de productos aún más baratos: residuos forestales y desechos de árboles frutales. Por lo tanto, esta planta será pionera en la utilización de biomasa como materia prima, propiciando paralelamente la eliminación de residuos forestales y vegetales y mejorando la calidad del entorno. Esto sitúa aún más a España en la vanguardia en investigación de sustitutos para los combustibles fósiles. Además, la planta de Biocarburantes de Castilla y León tendrá una capacidad de producción anual de 220.000 Tm de pienso de alto contenido en proteína para la alimentación animal.

Actualmente, los proyectos para construir nuevas plantas se están incrementando, así junto a estas instalaciones en España existen otras en fase de ejecución como las que se citan a continuación.

- En la Comunidad de Castilla-La Mancha **ACCIONA Energía** construye en la actualidad una planta de bioetanol, con capacidad de producir anualmente 33 millones de litros. La planta ubicada en Alcázar de San Juan (Ciudad Real), supone una inversión de 7 millones de Euros y se espera que esté operativa en 2006. La materia prima utilizada serán alcoholes brutos procedentes de la subasta de origen vínico que los Organismos de la Intervención de la UE realizan con objeto de regular el sector. El bioetanol se producirá previa limpieza y deshidratación de estos alcoholes para elevar su pureza del 92% al 99%.
- **Sniece** anunció en Julio de 2005 la construcción de la primera planta de bioetanol en Torrelavega. El coste total de la inversión se ha situado en torno a los 62 millones de euros. La futura planta, cuya construcción está previsto que de comienzo dentro del primer trimestre del 2006 y que previsiblemente se espera que este operativa en el primer trimestre de 2007, utilizará como principal fuente de materia prima el cereal, trigo o cebada y fabricará en torno a las 100.000 toneladas al año (unos 125.000 millones de litros).
- En Septiembre de 2005 se acordó la construcción en la provincia de Zamora, en Barcial del Barco, de una planta de bioetanol. Se espera que dicha planta entre a funcionar en Abril de 2007. La sociedad que construirá esta planta de bioetanol, se llamará **Ecobarcial**. La inversión ascenderá a unos 100 millones de euros y se repartirá entre las entidades participantes en el proyecto lideradas por **Energía de Castilla y León, ENCALSA**, sociedad formada en un 90% por **Biovent** y en un 10% por el **Ente Regional de la Energía de Castilla y León, EREN**. Esta planta tendrá asociada una central de cogeneración con una potencia de 25 megavatios. La futura planta producirá cerca de 100.000 toneladas de bioetanol al año y consumirá alrededor de 325.000 toneladas al año de cereal, principalmente trigo, cebada o maíz.
- A finales del 2005 la Comunidad de Castilla y León anunció su intención de construir una planta experimental de bioproductos, promovida por la Administración Regional, en Villarejo de Órbigo (León), a través del Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León. Es previsible que empiece a funcionar a mediados de 2007. Esta

infraestructura, que supondrá una inversión para el Ejecutivo Regional de 6,7 millones de euros, se dedicará a la investigación de cultivos para el aprovechamiento como materia prima para producir biocarburantes. La Junta de Castilla y León, por otro lado, ya ha puesto en marcha los primeros cultivos de remolacha alcoholera y achicoria en las comarcas del Páramo y el Órbigo en la provincia leonesa para dar inicio a las primeras investigaciones de este centro. Con éstas se llevarán a cabo, entre otras aportaciones, estudios de rentabilidad y posibles aplicaciones del bioetanol.

5.2 Bioetanol como combustible

5.2.1 Etanol como combustible único

Históricamente, el primer vehículo que se diseñó para el uso de etanol fue una variante del Modelo T de Henry Ford, que estaba pensado para ser utilizado en las granjas, de forma que sus propios dueños pudieran producir el alcohol a partir de la fermentación del maíz. Posteriormente se desarrolló el Modelo A, que también podía usar tanto etanol como gasolina. Actualmente, para que los vehículos de explosión puedan funcionar con etanol es necesaria una serie de modificaciones, que incluyen el depósito, las conducciones de combustible, los inyectores, el sistema informático de gestión del motor y el sistema anti-sifón. En los últimos años se han desarrollado una serie de vehículos capaces de funcionar tanto con gasolina como con etanol o una mezcla de ambos. Se denominan *Flexible Fuel Vehicles* (FFV). Estos automóviles disponen de un sensor que detecta la relación etanol/gasolina y en función de la mezcla ajustan la carburación del motor. La utilización del etanol modifica la mezcla de aire y combustible tratando de mantener la potencia y el consumo del automóvil en un valor óptimo.

El etanol, como combustible único, es utilizado principalmente en Brasil y Argentina. Su uso con temperaturas inferiores a 15°C puede dar lugar a problemas de encendido, para que esto no ocurra el método más común de solucionarlo es añadirle una pequeña parte de gasolina. La mezcla que se usa más ampliamente es el E85 que está compuesto de un 85% de etanol y un 15% de gasolina.

Desafortunadamente el etanol contiene menos energía por litro que las gasolinas, con lo que su rendimiento es menor, pudiendo llegar hasta un 30% menos, principalmente en modelos antiguos, cuando se utiliza el E85. Saab [SAAB] produce el modelo 95 turboalimentado que asegura una mayor economía que los motores de gasolina, utilizando una mayor relación de compresión, ofreciendo rendimientos semejantes a sus equivalentes con combustibles convencionales.

El etanol tiene un octanaje mucho mayor que la gasolina –entorno a 110– lo que hace que no se queme de forma tan eficiente en los motores convencionales. El uso continuado de combustibles con una alta proporción de etanol, como el E85, produce corrosiones en el metal y en las piezas de goma.

5.2.2 Mezcla directa de etanol y gasolina

Los motores de encendido pueden funcionar con mezclas de hasta el 25% de alcohol deshidratado sin que sean necesarias modificaciones en el motor. No obstante su

rendimiento varía respecto al combustible convencional. Estas son algunas de las diferencias [Ballesteros I., 2002]:

- Reducción de la potencia y el par motor (aproximadamente un 2% para mezclas al 15%)
- Aumento del consumo (4% para mezclas del 15%)
- Aumento de la corrosión de las partes metálicas y componentes de caucho.

Sin embargo, si se ajusta el motor aumentando la relación de compresión, y adaptando la carburación a la nueva relación estequiométrica, se consigue una mayor potencia y par motor (9% con una mezcla del 20% de alcohol), mejora el rendimiento térmico y reduce el consumo (7% con respecto a lo que se obtendría solo con gasolina) y una combustión más perfecta, con menor índice de carbonización y emisión de gases contaminantes (reducción de CO y HC a medida que aumenta el porcentaje de alcohol en la mezcla) [Ballesteros I., 2002]

Brasil es el país que más ha experimentado con la mezcla de alcohol y gasolina, aumentado su proporción hasta un valor del 25%, como se ve en la siguiente progresión:

- 1977 4.5%
- 1979 15%
- 1981 20%
- 1985 22%
- 1998 25%
- Desde el año 2002 entre el 20 y el 25%

Otros países que utilizan estas mezclas son Nicaragua, EEUU, Colombia, Argentina, Australia e India, por poner algunos ejemplos.

Sin embargo, el límite máximo de etanol en Europa está limitado por la especificación del contenido en oxígeno de 2.7%, que supone limitar el uso del etanol al 7.8%. No se proporciona ninguna excepción para la mezcla de etanol por encima del 7.8%. En algunos países europeos se utiliza normalmente una mezcla del 5% de etanol [Abengoa, 2006].

5.3 El bioetanol como aditivo de las gasolinas: ETBE

Otra alternativa para el uso del bioetanol como combustibles es transformarlo para su utilización en aditivo de la gasolina, en lugar de cómo su sustituto. Con la introducción de las gasolinas sin plomo, necesarias por el uso de catalizadores para la disminución de las emisiones nocivas, se vio afectado el *número de octano* de la gasolina. Para recuperar el octanaje y reducir las emisiones contaminantes se añadieron aditivos oxigenantes tales como el metanol, etanol, tercbutil alcohol (TBA) o el metil-tercbutil éter (MTBE).

En los últimos años el etil-tercbutil éter (ETBE) se está imponiendo sobre los otros aditivos por ser sus emisiones de hidrocarburos menos tóxicas, debido a que el acetaldehído es mucho menos tóxico que el formaldehído, además de poderse obtener a partir de recursos renovables en lugar del petróleo, como el MTBE. Además, el ETBE es mucho menos soluble en agua que el MTBE, lo que disminuye la posibilidad de contaminar las aguas.

El ETBE presenta dos grandes ventajas sobre el bioetanol, como son su menor afinidad con el agua y una presión de vapor más adecuada que el alcohol, además de no requerir modificaciones en los motores actuales. Por estas razones su uso se está imponiendo en Europa, prevaleciendo sobre la mezcla con la gasolina. En España todo el etanol dedicado a la automoción es convertido a ETBE.

El ETBE se obtiene por reacción catalítica de isobuteno y etanol, en una proporción de 1:0,8, resultando un compuesto con unas cualidades superiores al MTBE y los alcoholes. A continuación se relacionan algunas de sus ventajas [BAUR]:

- Baja solubilidad en el agua, menor que el MTBE.
- Menor contenido de oxígeno (15,7%) que el MTBE (18,2%), por lo que no se necesita modificar el carburador.
- Menor RVP (Reid vapor pressure) (0,27 bar) que el MTBE (0,54 bar) y el etanol (1,22 bar).
- Reducción en la emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos inquemados.
- Menor poder corrosivo que los alcoholes.
- Mayor poder calorífico.
- Mayor resistencia a la “separación de fase” que el MTBE.
- Mayor rendimiento de fabricación que el MTBE, a partir de isobuteno.

El ETBE es un buen sustituto del MTBE, que se puede producir en las plantas donde actualmente se produce el MTBE. En España se fabrica en cinco refinerías de las compañías Repsol YPF y Cepsa [SAF, 2003]. En España y en Francia se está usando en mezclas de hasta un 15% del volumen de gasolina (ETBE15) [TOTAL, 2003]. Además el MTBE es un producto nocivo y que está comenzando a prohibirse en algunas zonas, como puede ser el caso del Estado de California, en EE.UU.

5.4 Aditivo de mejora de la ignición en motores diésel

La mezcla etanol-diesel, mejor conocido como E-diesel, contiene hasta un 15% de etanol. Comparado con el diesel normal, el E-Diesel (nombre comercial utilizado por Abengoa para este producto) reduce perceptiblemente las emisiones de partículas y otros contaminantes y mejora las características del arranque en frío. Se encuentra actualmente en la etapa de desarrollo y no se comercializa actualmente. ABRD (Abengoa Bioenergy R&D) está trabajando para eliminar las principales barreras técnicas y reguladoras para su comercialización. Estas barreras incluyen:

- Bajo punto de Inflamación y volatilidad en el tanque.
- Posible inestabilidad de la micro-emulsión que evite que el etanol y el diesel se separen a bajas temperaturas.
- Carencia de los datos de pruebas reales para obtener la garantía del fabricantes (OEM).
- Un proceso costoso y largo para conseguir su registro, de acuerdo con las normas sobre emisiones y la salud.

El uso de E-diesel amplía aún más el mercado para las aplicaciones del etanol [Abengoa, 2006].

5.5 Pilas de combustible

Los vehículos eléctricos propulsados por pilas de combustible se consideran por muchos especialistas como la tecnología más prometedora para el transporte rodado a medio plazo [Macleay, 2003]. Cuando esta tecnología esté desarrollada, estos vehículos tendrán una alta eficiencia energética y su única emisión a la atmósfera será de vapor de agua. En una pila de combustible la energía química, que proviene de la combinación de hidrógeno y oxígeno, se convierte directamente en energía eléctrica sin pasar por un proceso de combustión.

Las pilas de combustible para automoción necesitan operar bajo ciertas limitaciones de peso, tamaño y temperatura. Actualmente las *pilas de membrana de intercambio de protones* (PEMFC) se adaptan adecuadamente a estas limitaciones:

- Bajas temperaturas de trabajo, entre 80°C y 100°C
- Alta densidad de corriente
- Rápida respuesta
- Bajo mantenimiento
- Rápido encendido y apagado

El hidrógeno es el combustible óptimo para estos dispositivos, sin embargo las medidas de seguridad y el coste de instalación asociado a la producción del hidrógeno, su almacenamiento, transporte, adaptación de las estaciones de servicio y depósitos de los vehículos abre la puerta al uso de combustibles alternativos al hidrógeno para este tipo de dispositivos. En este sentido el etanol puede ser una alternativa muy válida, al ser más sencillo de manejar que el hidrógeno y poder obtenerse más fácilmente a partir de fuentes renovables.

Actualmente, la investigación trabaja fundamentalmente en dos vías. Por una parte, el reformado de etanol –obtención del hidrógeno– tanto en el vehículo como en la estación de servicio y, por otra parte, el uso de pilas de combustible que funcionen directamente con este alcohol.

5.6 Barreras en el uso de bioetanol

Las dos principales barreras para su uso son las siguientes:

Afinidad con el agua

Los sistemas de transporte y almacenamiento deben estar totalmente libres de agua. Incluso pequeñas cantidades de agua en las mezclas etanol-gasolina pueden producir su separación en dos fases, lo que reduce el rendimiento del motor. El etanol puede actuar como un disolvente que facilita la incorporación de agua a las mezclas de etanol-gasolina. El agua se puede almacenar en pequeñas cavidades de los sistemas con hidrocarburos, tales como cañerías, depósitos o sistemas de alimentación. Este agua, a menudo, contiene impurezas que normalmente no ocasionan problemas debido a que no se mezcla con los combustibles y se pueden drenar periódicamente. La mezcla de gasolina con etanol puede arrastrar este agua e incorporarlo al combustible.

Debido a los problemas con el agua, se prefiere no transportar estas mezclas por tuberías, usando en su lugar camiones para llevar el bioetanol hasta los puntos de distribución, principalmente en EE.UU.

Presión de vapor

Aunque el etanol tiene una relativamente baja presión de vapor, cuando se utiliza como aditivo de la gasolina su presión de vapor efectiva es muy alta, llegando a un valor RVP (Reid Vapor Pressure) de 18 psi (124 KPa), lo cual representa una desventaja para su uso. Cuando el etanol se añade a una gasolina formulada adecuadamente, los hidrocarburos con bajo punto de ebullición, como butanos o incluso pentanos, deben ser reducidos para cumplir con las especificaciones de presión de vapor.

Valores bajos de presión de vapor reducen las emisiones debidas a la evaporación, en los procesos de llenado de los tanques y almacenamiento del combustible. Debido a estos beneficios ambientales es de esperar que las especificaciones de este parámetro sigan manteniéndose bajas. En algunos casos, para cumplir especificaciones, es necesario eliminar también el pentano. Esto supone un encarecimiento del proceso de producción de mezclas de etanol y gasolina, por lo que las compañías consideran impracticable reducir más la presión de vapor [Monyem, 2001].

5.7 Producción con bioetanol

La tendencia de producción de bioetanol a nivel mundial describe un comportamiento ascendente, lo cual supone una demanda de mercado igualmente positiva. Cabe pensar que dicho comportamiento podría atribuirse a la necesidad internacional de sustituir los combustibles tradicionales debido a las sucesivas crisis que se experimentan en este campo, aunque del mismo modo, el consumo mundial de bebidas alcohólicas está en crecimiento. Todo parece indicar que la demanda de etanol en el mercado mundial tenderá a acrecentarse en los próximos años. En la tabla 12 se recoge la producción de etanol desde el año 2000.

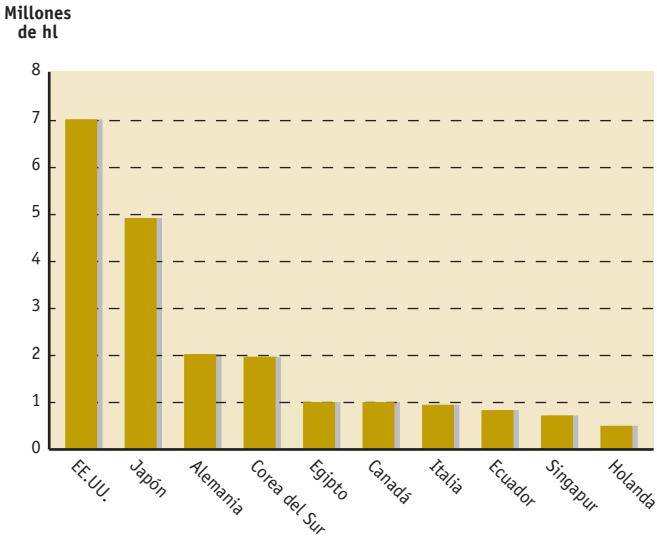
Año	Total	DESTINOS		
		Combustible	Industria	Bebidas
2000	31,8	19,0	9,8	3,0
2001	33,1	20,0	10,0	3,1
2002	34,7	21,0	10,5	3,3
2003	34,8	21,5	10,0	3,3
2004	36,4	22,0	11,0	3,4
2005	37,7	23,0	11,2	3,5

TABLA 12 *Proyección de la producción mundial de alcohol 2001-2005.*

Fuente: Proyecciones F.O. Licht. (Unidad de Medida: millardos de litros).

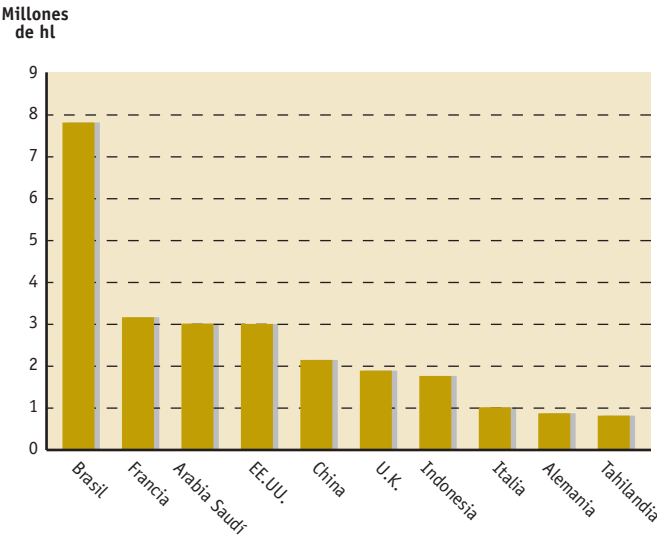
La tabla 12 revela dos características esenciales de la producción mundial de etanol. Lo primero y más importante, se puede observar un crecimiento constante y mantenido durante los últimos 4 años pasando de 31.8 billones de litros en el 2000 a 37,7 billones de litros en el 2005. En segundo lugar, ha de destacarse que el crecimiento en el uso del etanol es más acelerado como combustible que para bebidas o usos industriales. La demanda de etanol para combustible pasa de 19 millardos de litros en el 2000 a 23 millardos de litros en el 2005, y la demanda de etanol industrial pasó de 9.8 millardos de litros en 2000 a 11,2 millardos de litros en el 2005. Estos datos mundiales parecen indicar que la demanda mundial del etanol como carburante está en aumento.

En las gráficas 21 y 22 se muestran los principales exportadores e importadores mundiales de etanol.



GRÁFICA 21 *Los 10 primeros países importadores en 2004.*

Fuente: Imc The World Market for Etanol Challenge and Opportunity.



GRÁFICA 22 *Los 10 primeros países exportadores de etanol en 2004.*

Fuente: Imc The World Market for Etanol Challenge and Opportunity.

De acuerdo a las estadísticas internacionales, Brasil, Estados Unidos e Indonesia, encabezan respectivamente la lista de principales países productores a nivel mundial, acumulando entre ellos un 64.2% de la producción mundial total; la cual ascendió en el año 2003 a 127,87 millones de litros de etanol, como puede verse en la tabla 13.

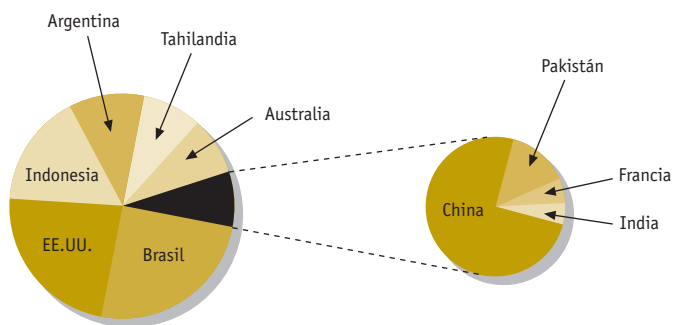
Orden	País / Área	Cantidad (1)	Valor (2)	% (3)	\$ (4)
1	Brasil	33.835.433	11.740.232	25,72	0,344
2	EE.UU.	26.810.473	10.428.040	22,845	0,392
3	Indonesia	21.565.331	7.148.024	15,66	0,328
4	Argentina	14.770.564	4.732.664	10,368	0,32
5	Tailandia	10.984.465	3.647.256	7,99	0,336
6	Australia	10.128.424	3.536.440	7,747	0,352
7	China	7.305.563	3.256.592	7,134	0,448
8	Pakistán	1.806.990	619.136	1,356	0,344
9	Francia	394.812	446.440	0,978	1,128
10	India	269.474	91.616	0,201	0,336
	TOTAL	127.871.529	45.646.440	100	0,36

TABLA 13 *Producción mundial de etanol en 2003.*

Fuente: Jtrade City, en base a datos de la Japan Tariff Association.

- (1) Litros
- (2) Cifras Jtrade son suministradas en Yenes. Los datos aquí consignados han sido convertidos a US\$ empleando el tipo de cambio promedio anual para el año 2002 de 125¥ (Yenes) = 1US\$
- (3) Participación en el total de importaciones
- (4) Precio promedio del año convertido a dólares según el mismo criterio señalado en (2)

Tal y como refleja la tabla 13, el líder indiscutible en la producción de etanol a nivel mundial es Brasil, representante de una de las economías más pujantes y grandes de América Latina. Para poder lograr disminuir esta dependencia de los combustibles no renovables, el gobierno brasileño adoptó varias leyes importantes para promover el uso del etanol como carburante. Del mismo modo, haciendo un análisis por zonas geográficas, tomando en cuenta la firma de los tratados de libre comercio en el continente americano, se puede observar en la gráfica 23 los tres países del continente americano (Brasil, Estados Unidos y Argentina) que están produciendo más del 58% del etanol mundial, lo que coloca a esta zona geográfica en una posición privilegiada en cuanto a experiencia en el tema.



GRÁFICA 23 *Producción mundial de etanol en 2003.*

Fuente: Elaboración Propia

En este sentido vamos a comentar brevemente la política y experiencia de producción de bioetanol de algunos de estos países líderes.

Brasil

Brasil es pionero, primer productor y exportador mundial de alcohol carburante. Esta industria genera 2.5 millones de empleos y ha permitido ahorrar al país casi dos mil millones de dólares destinados a la importación de gasolina.

La experiencia de usar etanol como carburante comenzó en Brasil en los años 30 del siglo XX con una mezcla de 5% en la gasolina. En los años 70, una vez más por el alza de los precios del petróleo, decidieron aumentar el porcentaje de mezcla progresivamente, hasta llegar al 20% a principios de los años 80. En la actualidad, en las calles de Río, Sao Paulo o Bahía, la mayoría de vehículos usan exclusivamente etanol como carburante.

Asimismo, el gobierno brasileño está profundizando la experiencia de usar el etanol. A principios de agosto del 2003, el gobierno aprobó una partida de 855 millones de euros cuyo objetivo es crear un stock de 1.000 millones de litros para asegurar el suministro de etanol durante todo el año; puesto que la caña de azúcar es un cultivo estacionario que no se puede cosechar de forma continua.

Además del plan gubernamental, casi tres cuartas partes de los molineros han firmado un acuerdo comercial con tres sociedades mercantiles internacionales para acumular un stock de 1000 millones de litros para la exportación durante los próximos tres años.

Actualmente, en Brasil, el gobierno no está apostando por los vehículos que utilizan etanol exclusivamente, sino por los de combustión flexible, que les permiten consumir cualquier proporción de alcohol hidratado, dependiendo de los precios relativos en las estaciones de servicio. El motor de combustión flexible ha sido desarrollado por el mayor fabricante de automóviles brasileños.

El gobierno está preparando un paquete de incentivos, instrumentos y medidas para sostener la producción de alcohol si fuera necesario. Han publicado un decreto gubernamental que incluye cinco instrumentos, además de la iniciativa de un stock estratégico: creación de un programa de opciones, aprobación que el gobierno compre y venda stocks de etanol, pago de una prima sobre las compras de etanol al por mayor para incrementar ventas cuando sea necesario y subvenciones para las compras de Pagarés Rurales, una garantía con respaldo gubernamental para ventas futuras que facilite la acumulación de stocks.

Dentro de la experiencia brasileña, se pueden rescatar varias lecciones importantes, entre las cuales se puede mencionar la firme voluntad política del gobierno para promover la producción, comercialización y uso del etanol. Otro factor importante, es el diseño de estrategias de largo alcance para fomentar el crecimiento sostenido del consumo del etanol. Además, hay creación de incentivos claros en todos los eslabones de la cadena para estimular la producción del etanol.

EE.UU.

La industria del etanol estadounidense continúa estableciendo récords mensuales de producción, según los datos publicados por la Administración de Información de la Energía (EIA por sus siglas en Inglés), el récord de junio 2003 fue un 13% más alto que el anterior récord de junio del 2002, el cual era de 530 millones de litros. Las 70 plantas existentes en el 2002 en Estados Unidos tenían una capacidad de producción superior a los 9.650 millones de litros anuales. En este país, el etanol se produce fundamental en base al procesamiento de maíz.

El Senado y el Congreso mantienen conversaciones para consensuar una ley sobre la energía. En un plazo de cuatro años, se prevé la prohibición del MTBE y se implementará un nivel mínimo de combustibles renovables. Con estos nuevos instrumentos legales, se espera un fuerte crecimiento de la demanda del etanol.

Las estimaciones de la demanda de etanol en California para sustituir al metil-tercbutil éter (MTBE) varían entre los 660 y los 950 millones de galones anuales, es decir entre 2.498 y 3.595 millones de litros, representando un incremento en el uso de etanol en el estado de California entre cuatro y seis veces.