



Agencia Andaluza de la Energía
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA, INNOVACIÓN Y CIENCIA

ESTUDIO BÁSICO SOBRE DEL SECTOR DE LOS BIOCARBURANTES

Septiembre 2011



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
2	BIOCARBURANTES: ESTADO Y TENDENCIAS	6
2.1	Biocombustibles	6
	<i>Biocarburentes y BIOLÍQUIDOS</i>	<i>8</i>
2.2	Biocarburentes líquidos	11
	<i>Bioetanol</i>	<i>11</i>
	<i>Bio-ETBE (Etil Ter Butile Etere)</i>	<i>27</i>
	<i>Biodiésel</i>	<i>30</i>
2.3	Biocombustibles de segunda generación	43
	<i>Biohidrógeno</i>	<i>45</i>
	<i>Syngas</i>	<i>46</i>
	<i>Bio-aceite</i>	<i>47</i>
	<i>Biometanol</i>	<i>48</i>
	<i>Biodimetiléter (bio-DME)</i>	<i>49</i>
	<i>Bio-MTBE (Metilo Ter Butil Éter)</i>	<i>49</i>
	<i>Biobutanol</i>	<i>50</i>
	<i>Biocarburentes sintéticos</i>	<i>50</i>
2.4	Biorrefinerías	52
3	PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIOCARBURANTES.....	54
3.1	Brasil	56
	<i>Bioetanol</i>	<i>56</i>
	<i>Biodiésel</i>	<i>56</i>
3.2	Canadá	57
	<i>Bioetanol</i>	<i>57</i>



	<i>Biodiésel</i>	58
3.3	China	58
	<i>Bioetanol</i>	58
	<i>Biodiésel</i>	59
3.4	India	60
	<i>Bioetanol</i>	60
	<i>Biodiésel</i>	60
3.5	Indonesia	60
	<i>Bioetanol</i>	60
	<i>Biodiésel</i>	61
3.6	Malasia	62
	<i>Bioetanol</i>	63
	<i>Biodiésel</i>	63
3.7	Tailandia	63
	<i>Bioetanol</i>	64
	<i>Biodiésel</i>	64
3.8	Estados Unidos	65
	<i>Bioetanol</i>	65
	<i>Biodiésel</i>	67
3.9	Contexto europeo	67
	<i>Bioetanol</i>	68
	<i>Biodiésel</i>	69
4	MERCADO DE MATERIAS PRIMAS PARA PRODUCIR BIOCARBURANTES.....	70
4.1	Trigo	71
4.2	Cereales de grano grueso	73



	<i>Maíz</i>	<i>73</i>
	<i>Cebada</i>	<i>74</i>
4.3	Colza	76
4.4	Soja	78
4.5	Aceite de palma	80
4.6	Caña de azúcar	81
5 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN		
	COMERCIALIZADAS	82
5.1	Biodiésel	82
	<i>TECNOLOGÍAS COMERCIALIZADAS PARA BIODIESEL</i>	<i>93</i>
5.2	Bioetanol	99
6 NUEVAS MATERIAS PRIMAS PARA LA		
	OBTENCIÓN DE BIOCARBURANTES	106
	Aprovechamiento integral de la biomasa de cardo	
	(Cynara cardunculus) para la producción de	
	biocombustibles líquidos y sólidos.....	106
7 CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD PARA		
	BIOCARBURANTES Y BIOLIQUIDOS.....	110
7.1	CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD	111
	Reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)	111
	Protección reservas de carbono	112
A)	Humedales,	112
B)	Zonas arboladas continuas, es decir	
	tierras con una extensión superior a una hectárea, con	
	árboles de una altura superior a cinco metros y una	
	cubierta de copas superior al.....	112



- 30 %.	112
- 10 % y el 30 %, salvo si se aportan pruebas de que las reservas de carbono de la zona en cuestión antes y después de la conversión son tales que cumplen las condiciones establecidas de mantenimiento de reservas de carbono.	112
C) Turberas, a no ser que se aporten pruebas de que el cultivo y la recolección de esta materia prima no implican el drenaje de suelos no drenados con anterioridad.	112
7.2 Verificación de los criterios de sostenibilidad para biocarburantes y biolíquidos	113
7.3 Cálculo del efecto de los biocarburantes y biolíquidos en las emisiones de GEI	114



1 INTRODUCCIÓN

La Unión Europea (y por extensión, España y Andalucía) depende enormemente de recursos de energía importados, especialmente del petróleo, que es uno de los combustibles fósiles que más contribuyen al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

El transporte es uno de los principales sectores consumidores de energía, en España su dependencia de los productos petrolíferos es del 95% y es responsable de aproximadamente el 67% de la demanda final de petróleo de la Unión Europea.

Si no se toman medidas, la dependencia de la UE del petróleo importado podría aumentar hasta el 90% en 2020 y Europa será incapaz de lograr el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero un 20% para 2020. En este contexto, encontrar fuentes de energía alternativas para el transporte se antoja fundamental para desviar la demanda del petróleo hacia otras fuentes endógenas menos contaminantes.

Los biocarburantes líquidos se consideran una alternativa prometedora a corto y medio plazo a los combustibles fósiles de automoción convencionales, porque requieren poca o ninguna modificación de las tecnologías actuales de motores y combustibles. Por tanto, fomentar la utilización de los biocarburantes en el transporte por carretera se ha convertido en una prioridad de las políticas energéticas de la UE para el transporte.

La unión europea lleva a cabo una política de fomento de los biocarburantes que se ve reflejada principalmente en los diferentes objetivos indicativos de su consumo, que comienzan con el 2% en 2005 y alcanzan el 5,75 % en 2010, para terminar en 2020 con el 10% de cuota renovable en el transporte mediante la directiva 28/2009 del Consejo de la Unión Europea para el fomento de las energías renovables.

2 BIOCARBURANTES: ESTADO Y TENDENCIAS

2.1 BIOCOMBUSTIBLES

El término biomasa hace referencia a todas aquellas sustancias de origen biológico no fósil, tales como: material y residuos de origen agrícola o forestal, productos transformados y rechazos de la industria agroalimentaria y residuos urbanos orgánicos. En resumen, todo material orgánico producido con el material de fotosíntesis.

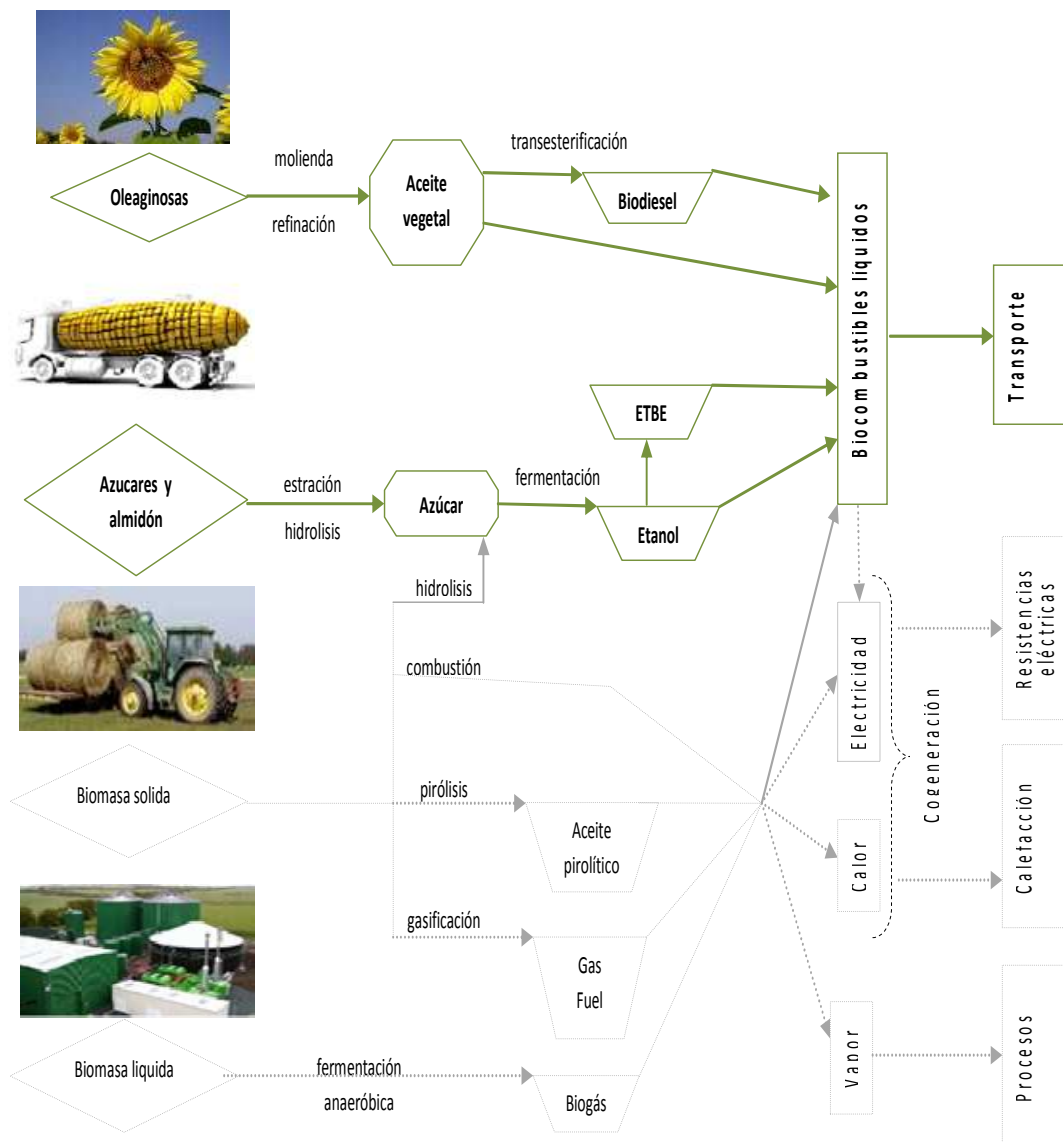
La legislación europea define biomasa como la parte biodegradable de los productos, rechazos y residuos procedentes de la agricultura (sea materia vegetal o animal), la silvicultura e industrias relacionadas, así como la parte biodegradable de los residuos industriales y urbanos. Desde un punto de vista químico, la biomasa está constituida por carbohidratos (azúcar, almidones, celulosa), aceites y grasas, lignina y proteínas. Los almidones y la celulosa son polisacáridos que tienen que ser hidrolizados para poder obtener los azúcares.

Estos materiales pueden ser transformados en combustibles líquidos (biocombustibles) o gaseosos (biogás), o en productos químicos sustitutos de otros productos derivados del petróleo. La biomasa no transformada (biomasa sólida) puede utilizarse como fuente de energía térmica a través de la combustión. Entre los principales recursos de la biomasa encontramos los residuos agrícolas (paja, matorrales, residuos de la poda, etcétera), los residuos forestales y madereros (restos de madera, ramas, etcétera.), residuos agroindustriales



y de la industria de la alimentación (alpechín, orujillo, productos oleosos, etcétera), residuos orgánicos, residuos zootécnicos y cultivos energéticos herbáceos o arbóreos.

El siguiente gráfico introduce de forma esquemática los flujos energéticos y materia prima-uso final, de los diferentes tipos de biomasa. En color verde representa la parte relativa a los biocombustibles.



Fuente: Elaboración propia
Flujo energético de las diferentes biomazas

La biomasa ocupa un lugar de enorme relevancia entre las fuentes renovables, tanto por su contribución a la satisfacción de las necesidades energética mundiales como por su implicación en otros sectores no energéticos. De hecho, la biomasa ofrece una posible solución a los problemas que conlleva el uso de las fuentes fósiles tradicionales. Además, participa en la solución de los problemas relacionados con la agricultura y con la gestión de los residuos sólidos urbanos y de los residuos agrícolas.



BIOCARBURANTES Y BIOLÍQUIDOS

Cuando se habla de **biocombustibles líquidos**, se hace referencia a todos los combustibles líquidos o gaseosos que se obtienen a partir de la biomasa y que pueden ser utilizados para cualquier aplicación energética, ya sea térmica, eléctrica o mecánica, para alimentar calderas y motores de combustión interna (Otto y diesel). No obstante los términos comúnmente empleados para su definición son:

- **Biocarburentes:** biocombustible líquido o gaseoso empleado para el transporte
- **Biolíquidos:** biocombustibles líquidos o gaseosos destinados a usos energéticos distintos del transporte, incluidas la electricidad y la producción de calor y frío.

A continuación se describen los distintos tipos de biocarburentes:

- Bioetanol.- etanol producido a partir de biomasa o de la fracción biodegradable de los residuos, para su uso como biocarburente;
- Biodiésel.- éster metílico producido a partir de aceite vegetal o animal de calidad similar al gasóleo, para su uso como biocarburente;
- Biogás.- combustible gaseoso producido a partir de biomasa y/o a partir de la fracción biodegradable de los residuos y que puede ser purificado hasta alcanzar una calidad similar a la del gas natural, para su uso como biocarburente, o gas de madera;
- Biometanol.- metanol producido a partir de la biomasa, para uso como biocarburente;
- Biodimetiléter.- dimetiléter producido a partir de la biomasa, para su uso como biocarburente;
- Bio-ETBE (etil ter-butil éter).- ETBE producido a partir del bioetanol. La fracción volumétrica de bio-ETBE que se computa como biocarburente es del 47 %;
- Bio-MTBE (metil ter-butil éter).- combustible producido a partir del biometanol. La fracción volumétrica de bio-MTBE que se computa como biocarburente es del 36 %;
- Biocarburentes sintéticos.- hidrocarburos sintéticos o sus mezclas, producidos a partir de la biomasa;
- Hidrobiodiesel: combustible producido por hidrogenación/isomerización de aceite vegetal o animal.
- Bioqueroseno.- Fracción ligera procedente de la destilación de biodiesel obtenido por transesterificación. Uso en mezclas con queroseno hasta el 20% para uso en motores aviación;
- Bio-hidrógeno.- hidrógeno producido a partir de la biomasa y/o a partir de la fracción biodegradable de los residuos para su uso como biocarburente;
- Aceites vegetales puros.- aceites obtenidos a partir de plantas oleaginosas mediante presión, extracción o procedimientos comparables, en crudo o refinado, pero sin modificación química, cuando su uso sea compatible con el tipo de motor y las exigencias correspondientes en materia de emisiones.



2.1.1.1 CADENA DE PRODUCCIÓN

La cadena de los biocarburantes tiene muchos componentes. Diferentes materiales orgánicos pueden ser transformados en carburantes utilizando tecnologías consolidadas u otras en desarrollo. La **Tabla 2-1** resume las principales relaciones entre **materias primas** (biomasa), **procesos productivos** para la obtención de biocarburantes líquidos y gaseosos y **productos** (biocarburantes). Teniendo en cuenta el estado de madurez de las tecnologías de producción y utilización, se ha establecido una categorización entre biocarburantes de de primera y segunda generación:

- **Biocarburantes de primera generación.** El biodiésel, los aceites vegetales, el bioetanol obtenido a partir de los cereales y los azúcares que se encuentran en otros productos vegetales, el bio-etil-tercbutil éter (ETBE) y el biogás, pertenecen a esta categoría. La producción y el uso de estos biocarburantes están ya en **fase de aplicación avanzada**. Los principales márgenes de mejora se deben buscar en la reducción de los costes de producción, la optimización del balance energético, la mejora de los rendimientos energéticos de los motores de combustión y el incremento de los porcentajes de mezcla con los combustibles fósiles.
- **Biocarburantes de segunda generación.** El bioetanol producido a partir de materias primas celulósicas, el bio-hidrógeno, el syngás, los bio-aceites, el biometanol, el biobutanol o el diésel sintético obtenido a través de la reacción de Fischer-Tropsch pertenecen a esta categoría. Su producción **no tiene escala industrial** y se limita a plantas experimentales. Todos los biocarburantes de segunda generación tienen en común el hecho de estar producidos a partir de materias primas con coste nulo o muy reducido: biomasa lignocelulósicas. A pesar de estar aún en fase de mejora, las tecnologías de producción de biocarburantes de segunda generación se consideran muy prometedoras por su potencial para reducir los costes de producción. Estos costes representan en la actualidad una penalización respecto a las fuentes fósiles corrientes y no permiten desvincular la producción de los biocarburantes de las políticas de ayudas económicas y fiscales actualmente existentes. Además, los biocarburantes de segunda generación permiten incrementar el rango de materias primas ya que el uso de material lignocelulósico y residual no compite con el mercado alimentario.
- **Biocombustibles de tercera generación:** Los biocombustibles de tercera generación utilizan métodos de producción similares a los de segunda generación, pero empleando como materia prima cultivos bioenergéticos específicamente diseñados o adaptados (a menudo por medio de técnicas de biología molecular) para mejorar la conversión de biomasa a biocombustible. Un ejemplo es el desarrollo de los árboles “bajos en lignina”, que reducen los costes de pretratamiento y mejoran la producción de etanol, o el maíz con celulasas integradas.
- **Biocombustibles de cuarta generación:** Los biocombustibles de cuarta generación llevan la tercera generación un paso más allá. La clave es la captación y almacenamiento de carbono (CAC), tanto a nivel de la materia prima como de la tecnología de proceso. La materia prima no sólo se adapta para mejorar la eficiencia de proceso, sino que se diseña para captar más dióxido de carbono, a medida que el cultivo crece. Los métodos de proceso (principalmente termoquímicos) también se combinan con tecnologías de captación y almacenamiento de carbono que encauzan el dióxido de carbono generado a las formaciones geológicas (almacenamiento geológico, por ejemplo, en yacimientos petrolíferos agotados) o a través del almacenamiento en minerales (en forma de carbonatos). De esta manera, se cree que los biocombustibles de cuarta generación contribuyen más a reducir las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), porque son



más neutros o incluso negativos en carbono si se comparan con los biocombustibles de las otras generaciones. Los biocombustibles de cuarta generación encarnan el concepto de «bioenergía con almacenamiento de carbono».

PRODUCIDOS EXISTENTES EN LA ACTUALIDAD: Biocarburos de primera generación		
Materia prima	Procesos de fabricación	Biocarburo
Azúcares (Caña, remolacha, otros)	Fermentación Alcohólica	Bioetanol , butanol
Almidones (Cereales)	Sacarificación y Fermentación Alcohólica	ETBE, otros
Lípidos (Aceites vegetales vírgenes o usados, grasas animales)	Transesterificación, hidrogenación	Biodiesel y green diesel
Residuos orgánicos (Aguas residuales residuos sólidos urbanos, residuos de granjas)	Fermentación Anaerobia	Metano (1)
PRODUCTOS EN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO: Biocarburos de segunda generación		
Materia prima	Procesos de fabricación	Biocarburo
Celulosa	Hidrólisis y Fermentación	BIOETANOL
Biomasa genérica (residuos agrícolas, madera, etc.)	Gasificación por oxidación parcial Síntesis específica Reacción de Fischer y Tropsch Desplazamiento del CO Pirólisis	Metano (1), dimetil éster (DME), biodiesel, green diesel, hidrógeno
Biomasa especial	Fermentación selectiva	Hidrógeno, biodiesel, etanol, butanol, líquidos de FT

(1) Los biocarburos gaseosos no son objeto de este estudio y se añaden por dar coherencia a lo dicho en la legislación europea sobre biocarburos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-1. Principales nexos de unión entre biomasa, procesos y productos para la obtención de biocarburos.

Se puede ver que en la actualidad, la práctica totalidad de los biocarburos utilizados se obtienen a partir de recursos agrícolas (excedentes o no). La presencia de residuos industriales o domésticos (por ejemplo, aceite frito usado) es muy reducida.

2.1.1.2 BALANCE ENERGÉTICO

El balance energético es un elemento crítico y, a veces de crítica, en los biocarburos. La **Tabla 2-2** muestra el balance energético de diferentes biocarburos, es decir, la relación entre la energía utilizada en el proceso productivo y la energía producida por el biocarburo. En general, cuanto más grande es esta relación mayor es el beneficio energético asociado al biocarburo en cuestión.



Biocarburante	Balance energético	
	Sin subproductos	Con subproductos*
Biodiesel de girasol	2	3,1
Biodiesel de colza	1,7	3
Aceites vegetales puros del girasol	2,8	4,3
Aceites vegetales puros de la colza	1,8	3,4
Bioetanol de la remolacha	1,1	2,2
Bioetanol del sorgo zucarinao	1,2 - 1,4	12,4
Bioetanol del maíz	1,0 - 1,1	2,2 - 2,5
Bioetanol de las biomasaas lignocelulósica	1,8	5,6
Bio-ETBE de la remolacha	0,8	1,2
Bio-ETBE del sorgo zucarinao	1	1,7
Bio-ETBE del maíz	0,8	1,2
Bio-ETBE de las biomasaas lignocelulósica	1,1	1,5
Biogás	2,5	6,7

*Como subproductos (o productos secundarios) se entienden tanto las biomasaas residuales de la producción agraria, como los residuos orgánicos obtenidos en la preparación industrial de los biocarburantes

*Fuente: USDA, EUBIA, CIEMAT, IICA, Biodiéselspain.com, Universidad de Siena. Elaboración propia
 Tabla 2-2. Balances energéticos de los principales biocarburantes*

2.2 BIOCARBURANTES LÍQUIDOS

Los biocarburantes reconocidos como tales por la legislación española actual (ORDEN ITC/2877/2008, de 9 de octubre, por la que se establece un mecanismo de fomento del uso de biocarburantes y otros combustibles renovables con fines de transporte) son los siguientes: bioetanol; biodiésel; biogás; biometanol; biodimetiléter; bioETBE; bioMTBE; biocarburantes sintéticos; biohidrógeno; aceite vegetal puro; hidrobiodiesel y otros biocarburantes, incluidos otros combustibles para transporte producidos a partir de biomasa, productos producidos por tratamiento en refinería de biomasa y carburantes de biorrefinería.

En los siguientes apartados se tratan los biocarburantes más relevantes en España: bioetanol, biodiésel y ETBE. En una sección aparte se introducirán los biocombustibles de segunda generación, su estado de desarrollo y sus perspectivas futuras.

BIOETANOL

El bioetanol es el alcohol etílico (o etanol) producido por la fermentación de los azúcares presentes en la biomasa. Se caracteriza por su elevado contenido energético (27 MJ/Kg). Tiene un comportamiento muy similar al de la gasolina, lo que unido a su poder antidetonante¹ hace posible su uso en la alimentación de motores de ciclo Otto. Su utilización en motores Diésel en sustitución del gasoil se encuentra en desarrollo a medio plazo.

¹ Expresado en número de octano es superior al de la gasolina y permite ahorrar en el uso de antidetonantes



El bioetanol puede producirse a partir de diferentes materias primas o biomásas vegetales, residuales y/o de cultivos energéticos. Según el tipo de carbohidrato que contengan, las materias primas se dividen en sacaríferas (azúcares simples), amiláceas y celulósicos (celulosa y hemicelulosa). Los cultivos sacaríferos más utilizados son la remolacha (Europa) y la caña de azúcar (Brasil). Entre los cultivos amiláceos, el más común es el maíz (sobre todo en los EEUU).

Se estima que el uso de biomásas lignocelulósica podrá concretarse en 7-10 años, por lo que el bioetanol proveniente de esta fuente se considera un biocarburante de segunda generación. El proceso productivo del bioetanol depende de la materia prima utilizada. Cuando se recurra a las biomásas sacaríferas, se procederá a la extracción de los azúcares de los tejidos vegetales, la fermentación del extracto zucario, la destilación y la deshidratación del bioetanol. Si se emplean materias primas amiláceas, la fase de fermentación será sustituida por la molienda de los granos y por la hidrólisis del almidón.

2.2.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Por sus propiedades físico-químicas, el bioetanol se considera un sustituto de la gasolina en los motores de ciclo Otto. La **Tabla 2-3** indica las características físico-químicas que hacen posible la utilización del bioetanol en los motores de ciclo Otto.

Parámetro	GASOLINA	ETANOL
Fórmula	C _n H _m (n=4/12)	CH ₃ -CH ₂ OH
Peso molecular	100/105	46
Oxígeno (% en peso)	0	34,8
Densidad (kg/m ³)	720/780	794
P.C.I. (kJ/kg)	42.700	26.800
Dosado estequiométrico	14,8	9
Solubilidad en agua (%)	0,1	100
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	330	850
Tª ebullición (°C)	30/215	78
RVP a 38°C (kPa)	48/78	16
Índice RON	95/98	120/135
Índice MON	85/90	100/106

Fuente: *Manual de uso de los biocarburantes. Agencia Andaluza de la Energía. Elaboración propia*
Tabla 2-3. Comparativa de las características físico-químicas del bioetanol y la gasolina

De la Tabla anterior se desprende que algunas de las propiedades del bioetanol son mejores que las de la gasolina:

- El bioetanol presenta un valor más alto en el número de octano, lo que evidencia una capacidad antioxidante mayor que la de la gasolina.
- La volatilidad del bioetanol, expresada por la temperatura de ebullición y por la tensión de vapor, es superior a la de la gasolina. Esto hace que la mezcla con el aire sea más rápida y homogénea en la carburación. También que el proceso de combustión, el arranque en frío del motor y las prestaciones en aceleración sean mejores.

De la Tabla anterior también se desprende que la densidad energética de la gasolina es mejor que la del bioetanol, ya que de los valores de PCI se deduce que para poder sustituir 1 kilogramo de gasolina son necesarios 1,67 kilogramos de bioetanol.



La **Tabla 2-4** compara las características del bioetanol y del gasoil, para ver su posible utilización en los motores de ciclo Diésel.

Características	Bioetanol*	Gasoil*
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	27	42
Contenido en oxígeno (% en peso)	35	Ausente
Número de cetano	27	48
Flash-point (C°)	13	72
Viscosidad (cSt)	0,5 (a 20°)	2,6 (a 20°)
Estado	líquido	líquido
Aspecto	limpio	limpio

*Valor medio

Fuente: <http://www.biomassenergycentre.org.uk/>. Elaboración propia
Tabla 2-4. Comparativa de las características físico-químicas del bioetanol y gasoil

Las características del bioetanol hacen que este biocarburante se comporte generalmente peor que el gasoil en motores diésel:

- La densidad energética del bioetanol expresada en PCI, es inferior a la del gasoil: 1 kilogramo de gasoil es energéticamente equivalente a 1,70 kilogramos bioetanol.
- El bajo valor del número de cetano, evidencia la menor respuesta de arranque del bioetanol respecto al gasoil.
- El menor valor *flash-point* del bioetanol, indica que el bioetanol presenta mayores criticidades en las fases de manipulación, transporte y almacenamiento.

2.2.1.2 TECNOLOGÍAS Y PROCESOS DE PRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta las materias primas que se pueden utilizar en el proceso de fabricación, el proceso productivo del bioetanol se puede dividir en tres secciones: sacarífera, amilácea y lignocelulósica. Las secciones se diferencian en la primera fase del proceso, pero coinciden en las últimas: fermentación, destilación y deshidratación.

Primera fase

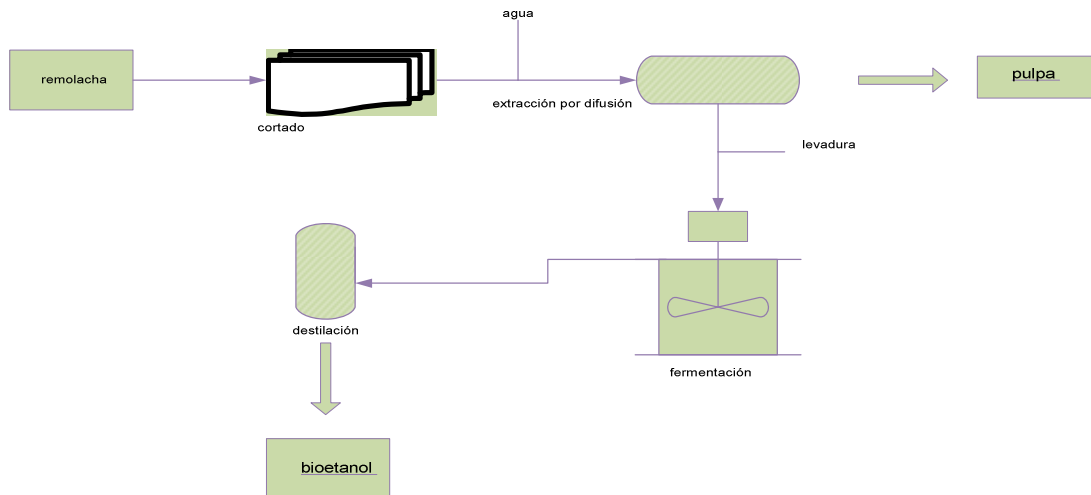
Sección sacarífera

La sección sacarífera para la producción de bioetanol tiene unos procesos de planta más sencillos que los de otras secciones de la cadena de producción, debido a que las materias primas contienen los carbohidratos en forma fermentable (glucosa, fructosa, sacarosa).

En la fase de extracción de los azúcares, es necesario utilizar los cultivos energéticos sacaríferos. Sin embargo, no resulta necesario hacerlo en el caso de la valorización de las biomásas residuales. La extracción se hace de diferentes formas, según el cultivo empleado. Una vez terminada la extracción, el zumo zucario se envía a la fermentación.



En el caso concreto de la remolacha azucarera, los azúcares se acumulan en la raíz en un porcentaje promedio del 18% en peso como sustancia seca y se extraen a una temperatura de 70-80° C por difusión en soluciones acuosas o en el zumo zucarina diluido, previo corte en láminas de las raíces. El subproducto de la extracción es la pulpa. Una vez secada, puede utilizarse en la alimentación zootécnica. El **gráfico 2-2** muestra el proceso.



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-2. Proceso de producción del bioetanol a través de la remolacha azucarera

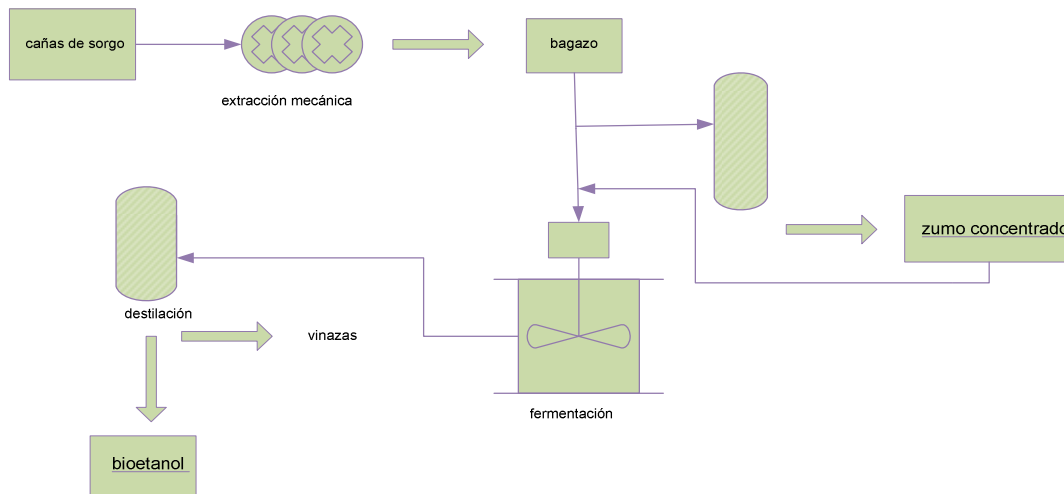
El sorgo azucarero se recoge cuando los distintos tipos de azúcares (ver **Tabla 2-5**) se acumulan en los tejidos de la caña y llegan a un porcentaje del 11% del peso como sustancia seca.

Tipo de azúcar	Contenido medio (% en peso)
Sacarosa	85
Glucosa	9
Fructosa	6

Fuente: FAO
Tabla 2-5. Contenido de azúcares en el sorgo para su conversión en bioetanol

Teniendo en cuenta el elevado poder fermentativo de la biomasa seleccionada, se han desarrollado diferentes estrategias para mejorar su conservación. El **gráfico 2-3** muestra la solución consistente en la extracción inmediata de los azúcares y la conservación del extracto de los 16°Brix iniciales a los 60°Brix. A ese nivel, se inhibe la actividad microbiana.

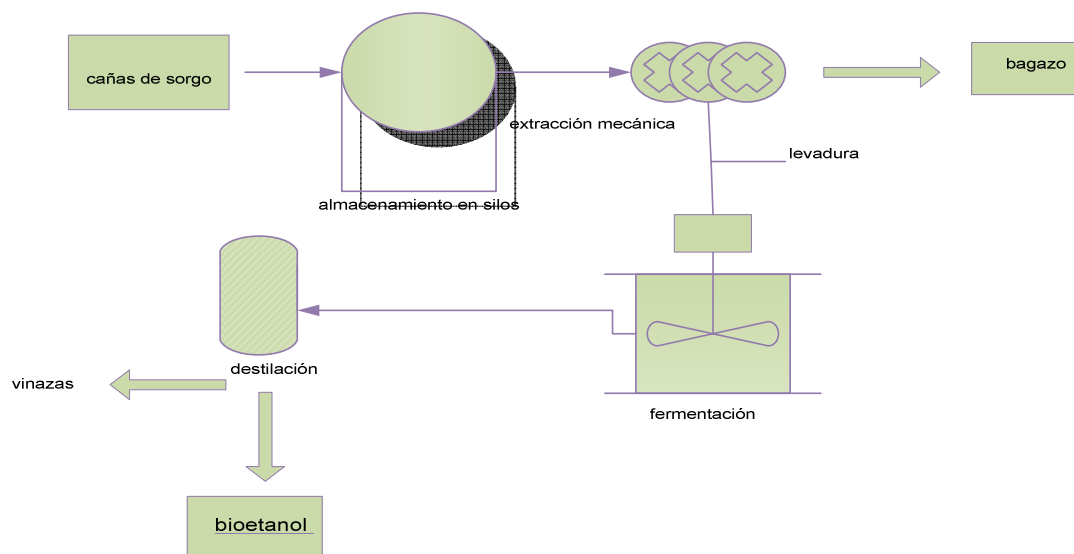




Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2-3. Proceso de producción del bioetanol a través del sorgo, extracción inmediata

El **gráfico 2-4** muestra la estrategia que prevé el almacenamiento en silos de la biomasa recogida, con el fin de favorecer la degradación parcial de todos los componentes polisacáridos (almidón de la granalla eventualmente presente, celulosa y hemicelulosa de las cañas y hojas) presentes junto con los azúcares simples. Terminado el almacenamiento, la biomasa se procesa para la extracción.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2-4. Proceso de producción del bioetanol a través del sorgo, almacenamiento previo

La extracción se puede realizar con diferentes técnicas, que tienen en común su elevado consumo hídrico (indicativamente, 0,4 kg. de agua por Kilogramo de sorgo):

- Extracción **mecánica con molinos**.- emplea una serie de 5-7 molinos consecutivos equipados con cilindros provistos de ranuras que incrementan la superficie de extracción.
- Extracción **mecánica con prensa**.- emplea un tornillo sin fin.



- Extracción **hidráulica por difusión**.- la biomasa es sometida a trituración y a un lavado en agua a una temperatura de 50 °C. Posteriormente, se procede a la inmersión del zumo zucarino en agua o en una disolución menos concentrada. El azúcar contenido en las cañas se disuelve en el agua o en la disolución por osmosis.
- Extracción **por centrifugación**.- la biomasa cortada es empapada con agua a una temperatura de 80°C y homogeneizada con un tornillo . La difusión del azúcar se verifica por acción del agua. Luego, el zumo se separa por centrifugación.

El subproducto del sorgo es el bagazo, que puede ser valorizado como fertilizante o recuperado para la producción de energía térmica previo secado. La **Tabla 2-6** muestra sus características físico-químicas.

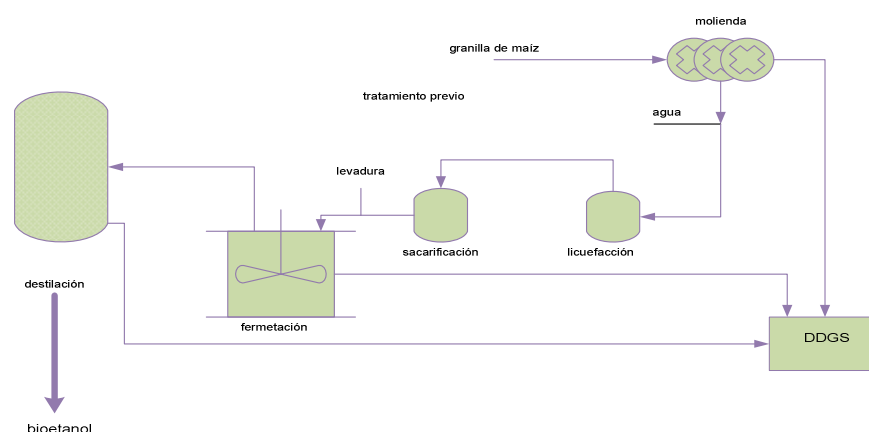
Características	Bagazo
Poder calorífico inferior (PCI) [MJ/kg]	17,3
Contenido en nitrógeno [%]	0,45
Contenido en fósforo (como P ₂ O ₅) [%]	0,22
Contenido en potasio (como K ₂ O) [%]	0,71

Fuente: <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf> y FAO: *Elaboración propia*
Tabla 2-6. Características físico-químicas del bagazo

Sección amilácea

Esta sección de la cadena se caracteriza por la exigencia de transformar el almidón contenido en la granilla, en azúcares fermentables mediante la reacción de hidrólisis. La molienda de la granilla está destinada a reducir la granulometría de la misma para lograr un rendimiento máximo de las sucesivas fases de la hidrólisis. La molienda se puede efectuar de dos formas (ver **gráficos 2-5 y 2-6**):

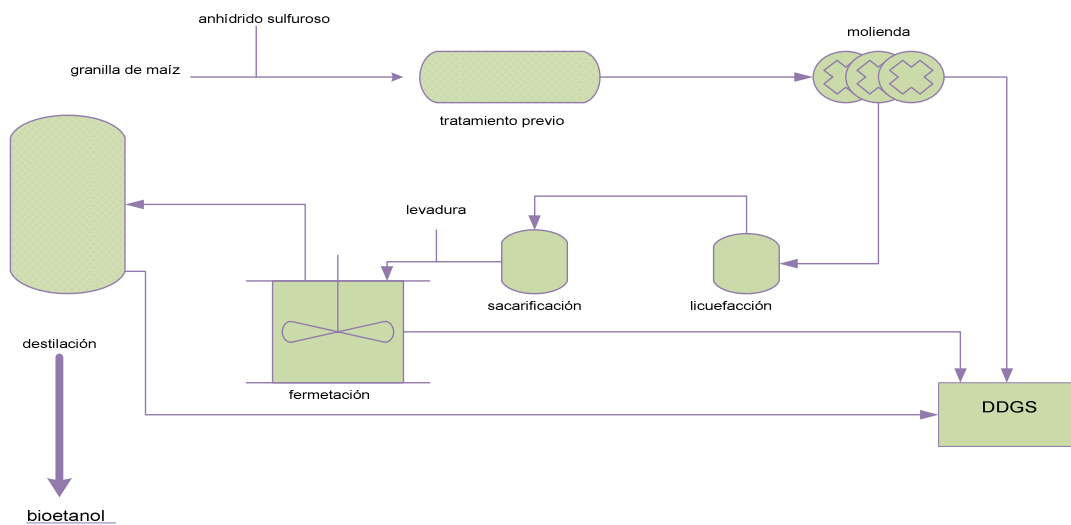
- Molienda **por vía seca**.- la granilla se tritura mecánicamente y sólo sucesivamente se mezcla con el agua.



Fuente: *Elaboración propia* Gráfico 2-5. Sección amilácea, molienda por vía seca

- Molienda **por vía húmeda**.- la granilla se trata previamente con una disolución de anhídrido sulfuroso al 0,1-0,2 % en peso durante 24-48 horas y a una temperatura de 50°C. Terminado el tratamiento previo, el almidón es separado de los otros componentes mediante molienda. Esta opción requiere más energía y es más costosa que la anterior, pero es preferible porque permite obtener un almidón más puro.





Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-6. Sección amilácea, molienda por vía húmeda

El residuo de la molienda está generalmente unido al residuo de la destilación, que contiene levaduras y azúcares. Forma un subproducto homogéneo denominado DDGS (*Distillers Dried Grains with soluble* o Granos Secos de Destilería), que tiene un elevado poder nutricional y un alto contenido de proteínas, fibras y grasas. Se destina a la alimentación de animales. El tratamiento exclusivamente mecánico de la molienda por vía seca garantiza un subproducto cualitativamente mejor.

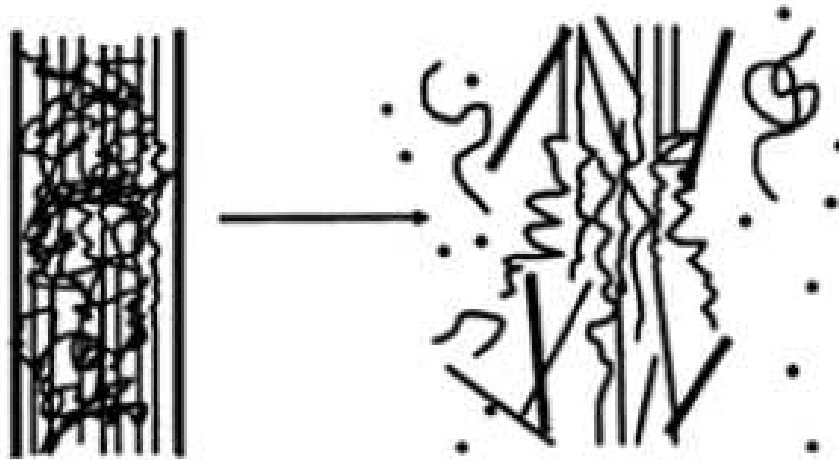
La ruptura de las cadenas de almidones en azúcares fermentables se obtiene mediante el uso de enzimas. Son necesarias dos fases: licuefacción y sacarificación. La primera reduce la longitud de las cadenas del almidón usando la enzima α -amilasa. La segunda fase busca la liberación de los azúcares fermentables (principalmente glucosa). Terminada la hidrólisis, se procede con la fermentación alcohólica.

Sección lignocelulósica

La sección lignocelulósica es más compleja que las dos anteriores, lo que explica la inmadurez de esta tecnología. En la pared celular, tanto la hemicelulosa como la celulosa, ambas convertibles en bioetanol, están atadas estructuralmente con la lignina que no es transformable en bioetanol. Además, algunos azúcares simples, liberados en la degradación de la hemicelulosa (xilosa, arabinosa, manosa) presentan una fermentación muy difícil.

En este contexto, el tratamiento previo de la biomasa trata de desestructurar las paredes celulares y separar la celulosa y la hemicelulosa de la lignina. En el **gráfico 2-7** se muestra el efecto del tratamiento previo sobre la estructura de la pared celular: a la izquierda la biomasa sin tratar y a la derecha la biomasa tratada.





Fuente: CIEMAT

Gráfico 2-7. Efectos del tratamiento previo sobre la estructura de la pared celular

El tratamiento previo puede tener diversas modalidades:

- Tratamiento previo **con sodio hidróxido**.- la sosa se emplea en disolución acuosa del 8-12% en peso; el tratamiento previo se lleva a cabo a una temperatura de 80-120° durante 30-60 minutos. Esta solución técnica tiene un coste elevado, relacionado con el uso de reactivos químicos y con las medidas de seguridad necesarias en las fases de almacenamiento y manipulación.
- Tratamiento previo de '**steam explosion**'.- la biomasa se satura con agua por acción del vapor a una presión (1,5-4,0 Mpa), temperaturas elevadas (180-230°C) y un tiempo de 1-10 minutos; la biomasa viene sucesivamente a un reactor a presión atmosférica, donde sufre una rápida expansión. Las condiciones del proceso desencadenan una hidrólisis parcial de las cadenas de celulosa y hemicelulosa. Este tratamiento previo requiere alta intensidad de energía.
- Tratamiento previo de '**steam explosion**' con **anhídrido sulfuroso**.- utilizado en forma gaseosa, el anhídrido sulfuroso tiene el efecto de acidificar la biomasa antes del tratamiento previo de 'steam explosion'. De este modo, favorece el desenlace de la hidrólisis de la celulosa y de la hemicelulosa; la utilización de reactivos y el gasto energético necesario para el proceso encarecen mucho los costes de este tratamiento previo.
- Tratamiento previo de '**Ammonia Fiber Explosion**' (AFEX).- la biomasa se somete a la acción del amoníaco a una temperatura de 27°C y a una presión de 1,24 MPa; la sucesiva reducción de presión hace que la biomasa tratada se expanda rápidamente; los costes son elevados, pero se pueden reducir sustituyendo el amoníaco con anhídrido carbónico y operando con rangos de presión de 7,6-20,7 MPa.
- Tratamiento previo **biológico**.- usa microorganismos que desagregan la parte celular, degradando la lignina. En particular, se está estudiando el uso de algunos hongos basidiomicetos (p.e.: Phanerochaete chrysosporium). Los resultados alcanzados en los tratamientos previos ponen en evidencia que los de naturaleza química y físico-química son más prometedores, sobre todo por el rendimiento de la sucesiva hidrólisis enzimática.
- Los tratamientos previos se pueden mejorar aumentando la eficiencia de los procesos y reduciendo los costes de producción. Un efecto no deseado del tratamiento previo es la formación de subproductos (compuestos obtenidos por la degradación del furano, ácidos

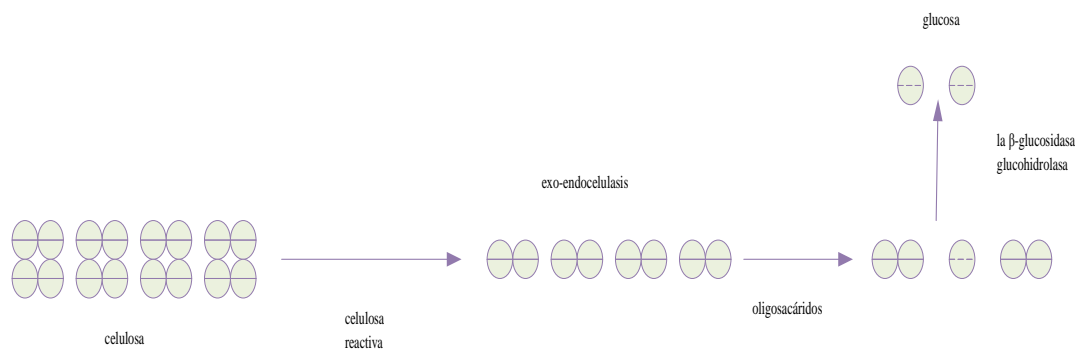


orgánicos de bajo peso molecular, compuestos fenólicos) que inhiben la actividad de los microorganismos. Los inhibidores pueden eliminarse mediante un proceso de dos fases de detoxificación con leche de cal: la primera con valores de pH de 9-11 y a una temperatura de 50-60°C por 30 minutos y la segunda a pH 6 y con temperatura de 30°C. Los inhibidores se separan mediante precipitación y filtraciones sucesivas a 0,2 mm. La biomasa tratada y detoxificada se lleva a la hidrólisis enzimática.

Aunque la hidrólisis se puede llevar a cabo con reactivos químicos (ácido sulfúrico), esta opción no resulta ventajosa a causa de los elevados costes de adquisición y gestión de los reactivos. Esto hace que sea preferible la hidrólisis enzimática.

Para romper las cadenas de celulosa y hemicelulosa se emplean tres tipos de enzimas:

- Las **endocelulasas** (1,4-b-D-4- glucanohidrolasa) rompen interiormente las cadenas en fragmentos más pequeños.
- Las **exocelulasas** (1,4-b-D-glucan glucanohidrolasa) atacan las extremidades de las cadenas, liberando azúcares simples (monómeros y dímeros).
- La **β -glucosidasa glucohidrolasa** se divide en dímeros y monómeros.



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-8. Proceso de hidrólisis

Las actividades de investigación en este segmento productivo están buscando simplificar el proceso, integrando la hidrólisis enzimática con las fases sucesivas de la transformación. Una vez hidrolizada la biomasa, se envía a la fermentación alcohólica.

Fermentación

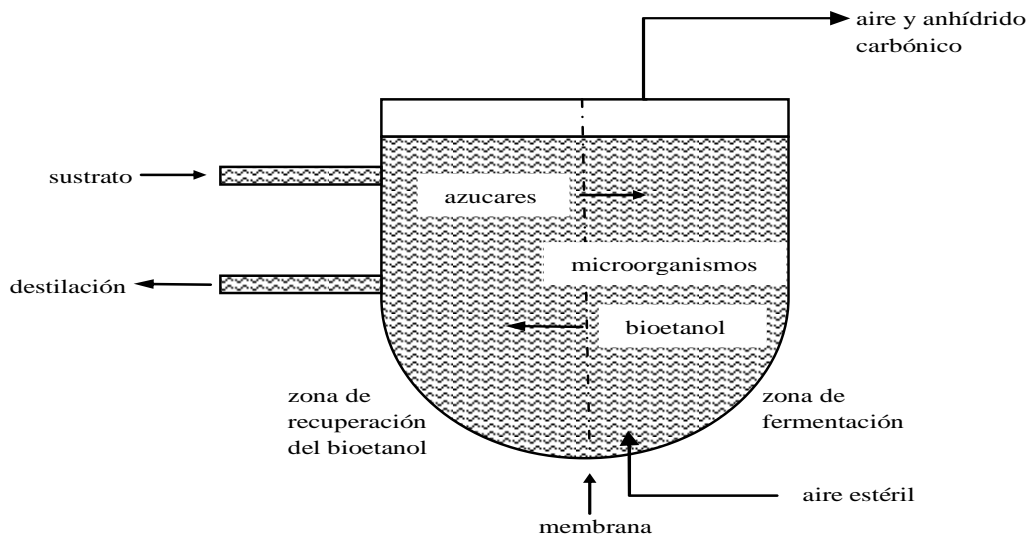
La fermentación es la fase en la cual los azúcares simples son transformados en bioetanol por acción de algunos microorganismos. El microorganismo más comúnmente usado es la levadura natural (*Saccharomyces cerevisiae*), cuya actividad óptima se desarrolla a una temperatura de 33-35°C y pH de 3-5. Esta levadura acumula el bioetanol en su crecimiento, hasta una concentración máxima del 11%.

Para superar este límite fisiológico, se ha desarrollado una forma de fermentación en continuo que usa diferentes soluciones técnicas dirigidas a mantener la concentración del bioetanol en los microorganismos en un rango de valores cercanos a los tolerados.

Existen diferentes técnicas de fermentación. A continuación se detallan algunas (ver **gráficos 2-9 a 2-12**):

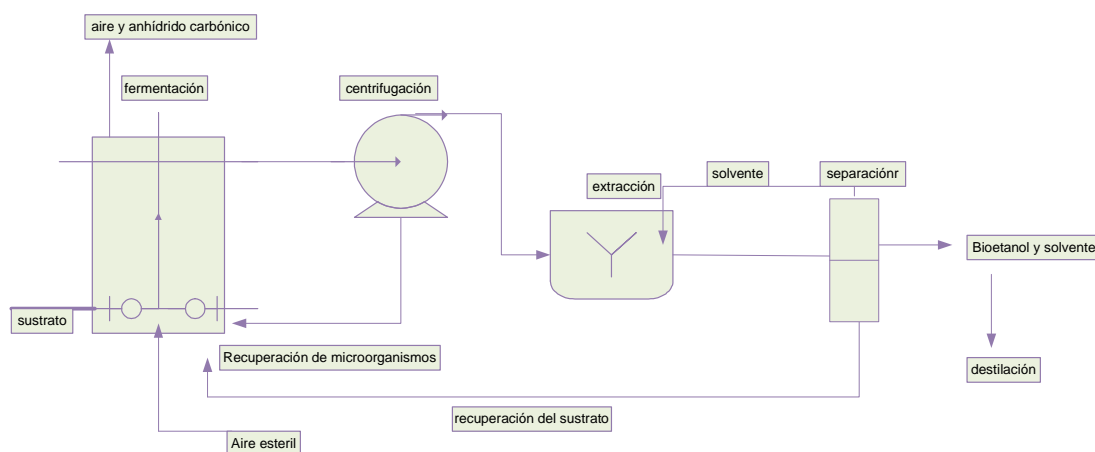


- **Fermentación por diálisis.**- el reactor está dividido en dos cámaras por medio de una membrana impenetrable para las levaduras, pero permeable al sustrato y al bioetanol. El alto coste de la membrana hace que sea poco rentable.



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-9. Fermentación por diálisis

- **Fermentación extractiva.**- se lleva a cabo una extracción en continuo del bioetanol, que puede ser conseguida mediante soluciones técnicas alternativas:
 - extracción **líquido-líquido.**- el medio fermentado es recogido en la cabecera del fermentador y centrifugado; la levadura se recicla y el medio clarificado se mezcla con un solvente de extracción (polipropileno-glicol); siguen las fases de decantación y la recuperación del bioetanol por destilación, mientras que el sustrato se lleva al fermentador.

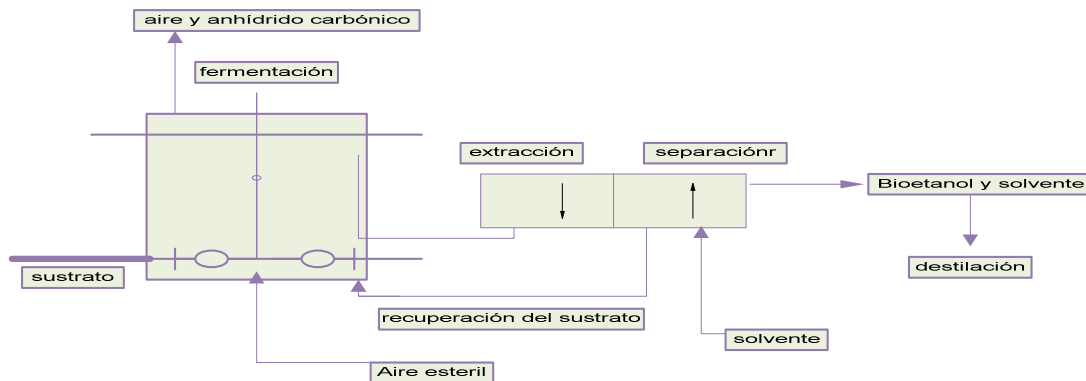


Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-10. Fermentación extractiva, extracción líquido-líquido

- extracción con **membrana:** el medio fermentado, prelavado en la cabecera del fermentador, pasa con un flujo con dirección tangente a lo largo de la membrana permeable al bioetanol y al solvente. Los límites de su utilización se relacionan

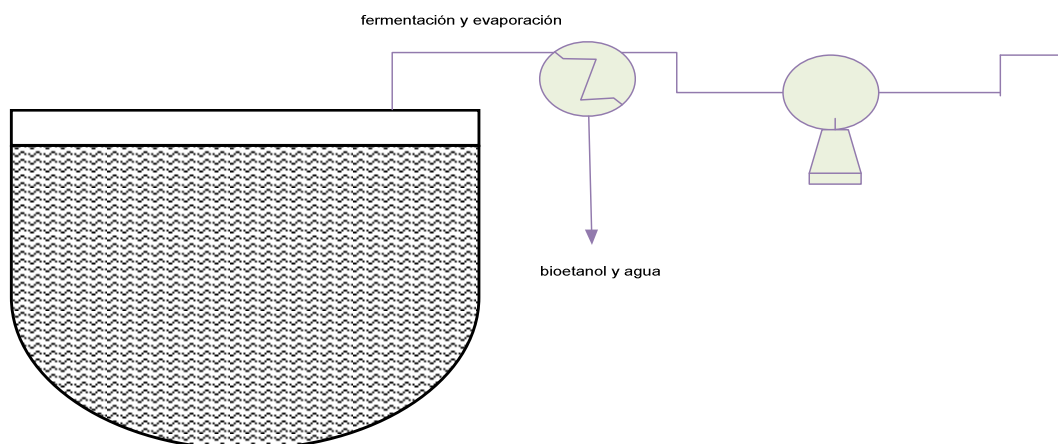


con los elevados costes de las membranas utilizadas. En la actualidad, están disponibles tres tipos de membranas: de ultrafiltración o microfiltración (permeabilidad en función de las dimensiones de las partículas), de destilación (permeabilidad en función del vapor de los compuestos) y de pervaporación (en silicón o polidimetilsiloxano) permeables solamente al bioetanol.



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-11. Fermentación extractiva, extracción con membrana

- extracción mediante **adsorción sobre silicio o carbón activo**;
- extracción mediante **evaporación en continuo** (proceso Vacuferm): la fermentación se efectúa a presiones reducidas (30-50 mmHg) y continúa con la evaporación en continuo del etanol a la temperatura de fermentación. Este método tiene una productividad muy alta, pero nunca se ha aplicado a nivel industrial debido al alto coste energético relacionado con el bombeo de anhídrido carbónico y con la creación del vacío.



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-12. Extracción mediante evaporación en continuo

- Fermentación *fed-batch* y fermentación semi-discontinua.- se trata de soluciones técnicas intermedias entre la fermentación en discontinuo (*in batch*) y en continuo, que permiten mantener los valores de concentración del bioetanol por debajo del límite de inhibición de las levaduras y hace posible trabajar en condiciones de volumen variable. En la fermentación *fed-batch* se realiza la alimentación intermitente con un sustrato nutritivo, que contiene los microorganismos. En la fermentación semi-discontinua se añaden



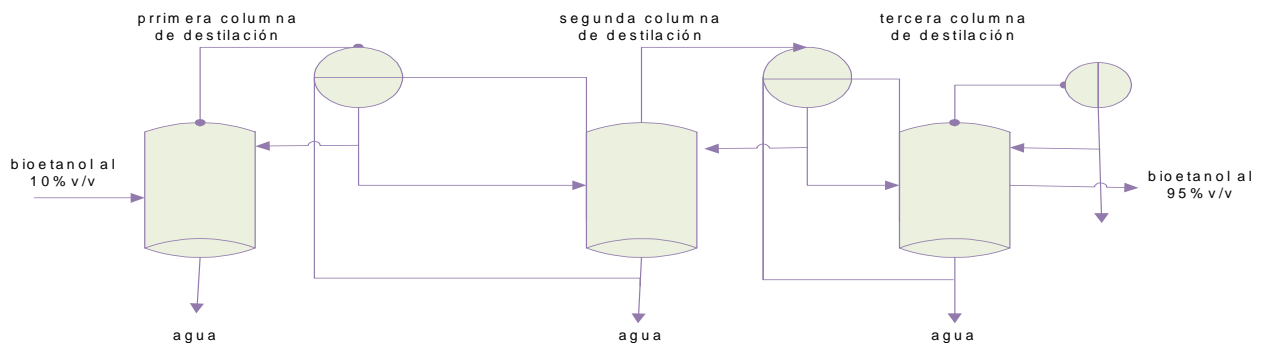
periódicamente los microorganismos. La aplicación de estas técnicas es aún escasa a nivel industrial.

- **Fermentación alcohólica.**- se desarrolla de forma análoga para todas las producciones de la cadena del bioetanol, según la materia prima; sólo la sección lignocelulósica es una excepción por lo que se refiere al microorganismo usado, dado que la levadura natural no resulta eficiente en presencia de azúcares simples de difícil fermentación.

Destilación

La destilación química tradicional ha sido sustituida por soluciones técnicas caracterizadas por un menor consumo energético. Se pueden resumir principalmente en dos:

- **Destilación a efecto múltiple.**- se utilizan más columnas en serie que operan a presiones progresivamente menores, de modo que los vapores de cabecera de la columna se condensan y proporcionan la energía necesaria para hacer hervir el líquido en la columna sucesiva.



Fuente: Elaboración propia. Gráfico 2-13. Destilación a efecto múltiple

- **Compresión mecánica del vapor.**- la compresión de los vapores de la columna de cabecera genera calor que es empleado para generar hervor en la misma.

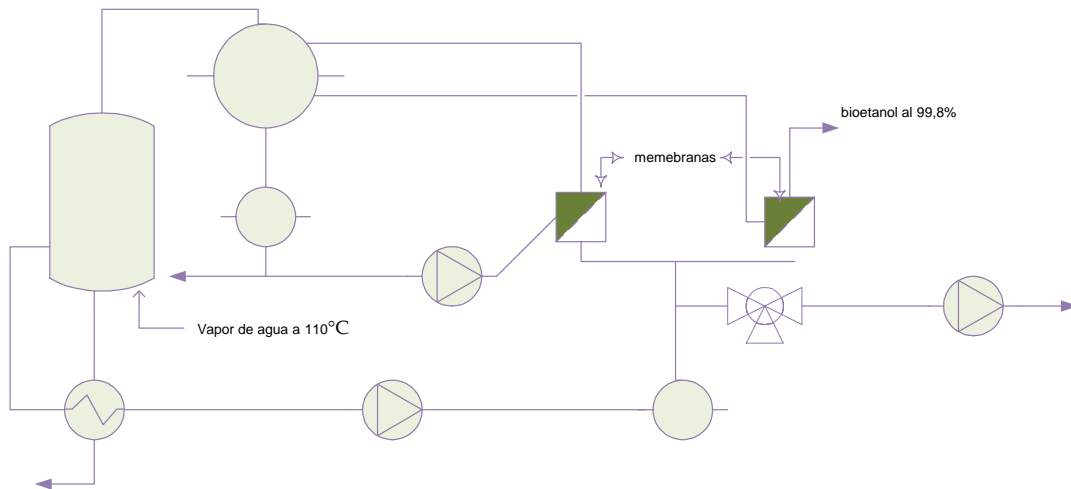
El subproducto de la destilación está formado por el fluido residual de la fermentación y por las vinazas y heces. La destilación química tradicional permite obtener el bioetanol con una concentración del 95% en volumen (bioetanol azeotrópico). El 5% sobrante está formado por agua y sustancias volátiles con una temperatura de ebullición muy cercana a la del bioetanol.

Deshidratación

El bioetanol azeotrópico se puede deshidratar mediante diversas técnicas, que se utilizarán en función de su uso en mezcla con los combustibles fósiles:

- **Destilación azeotrópica.**- consta de dos operaciones: la destilación química propiamente dicha, que permite extraer el bioetanol de otras sustancias volátiles y de una cantidad dada de agua; y la rectificación, que permite la eliminación de las sustancias volátiles y del agua. En esta fase se usan solventes, en general benceno, que separan las diferentes fases líquidas en el interior de un sedimentador.
- **Deshidratación por pervaporación.**- emplea membranas selectivas (la silicona o polidimetilsiloxano) que permiten sustraer del bioetanol, el agua y las sustancias volátiles presentes en forma de vapor.





Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-14. Destilación por evaporación

- Deshidratación por osmosis inversa.- el agua pasa desde una disolución más concentrada de bioetanol a una menos concentrada, por medio de una presión igual o superior a la osmótica.

2.2.1.3 COSTES DE INVERSIÓN Y GESTIÓN DE LA CADENA DE VALOR

La Tabla 2-7 muestra los costes de inversión y gestión de algunas plantas industriales de gran tamaño que producen bioetanol a partir de materias primas sacaríferas y amiláceas.

Materia primas		Capacidad productiva (T/año)	Costes de inversión (€)	Costes de gestión (€/año)
Sacaríferas	Remolacha	55.000 (1)	20.000.000	-
	Sorgo	110.000 (2)	117.000.000	51.000.000
Amiláceas	Maíz	160.000 (3)	117.000.000	53.000.000
Combinadas	Remolacha y maíz	240.000 (4)	245.000.000	-

1) Planta de bioetanol en Renio Unido

2) Planta integrada de bioetanol y valorización energética de los residuos (vinaza, melaza, etc.) en China

3) Planta de secado y producción de bioetanol Italia, con costes de gestiones estimados en los primero 5 años

4) Planta en fase de realización en Bélgica

Fuente: www.britishbioethanol.co.uk y www.biofuelreview.com. Elaboración propia
Tabla 2-7. Costes de inversión y gestión de algunas plantas industriales de producción de bioetanol

Junto con las plantas de gran tamaño, se está evaluando la posibilidad de producir bioetanol en pequeñas destilerías con una capacidad diaria de 10 toneladas. El tamaño de estas plantas haría posible involucrar a los agricultores - en forma de consorcio - en la cadena productiva.



La principal barrera para la introducción de este tipo de plantas es el elevado coste del producto, que se puede reducir sustancialmente si se logra mejorar la valorización energética de los subproductos. La elevada elasticidad en los posibles usos de los subproductos (zumo zucarino, granilla, forraje, fibras) y el alto rendimiento en bioetanol (valor promedio 4t/ha), convierten al sorgo en uno de los cultivos más indicados para lograr esa reducción de costes.

La **Tabla 2-8** muestra los costes de inversión y gestión en una planta de pequeñas dimensiones que produce bioetanol utilizando sorgo como materia prima.

Materias primas	Superficie agrícola utilizada (Ha)	Capacidad productiva (t/día)	Inversión total (€)	Costes de gestión (€/año)
Sorgo	900	10	4.800.000 (1)	1.900.000 (2)

(1) Planta de extracción: 250.00 €; planta de destilación y fermentación: 4.100.000 €

(2) Comprende el coste del cultivo, la amortiguación, los intereses, los gastos generales e imprevistos

Fuente: *European Biomass Industry Association*; <http://www.eubia.org/>. *Elaboración propia*

Tabla 2-8. Costes de inversión y gestión en una planta de pequeñas dimensiones para la producción de bioetanol

2.2.1.4 BALANCE ENERGÉTICO

La evaluación del balance energético de los biocarburantes, entendido como la relación que hay entre contenido energético del combustible (output) y la energía absorbida por el proceso (input), resulta fundamental para entender la sostenibilidad energética del bioetanol.

El balance energético puede variar enormemente dependiendo del modo en que se elabore. Mientras que la energía contenida en el biocarburante se calcula inequívocamente por su poder calorífico inferior, la cuantificación de la energía necesaria para producir el biocarburante puede contemplar variables diferentes, como la síntesis de los productos fitosanitarios o la incidencia de la logística y el transporte. Además, el cálculo puede sufrir variaciones sustanciales dependiendo de la estrategia de valorización de subproductos. **Este informe muestra los valores promedios y los intervalos identificados a través de la consulta de diferentes trabajos y estudios.**

El balance energético del bioetanol depende del tipo de materia prima empleada, ya que cada una de ellas tiene un proceso de producción diferente. Por ejemplo, la fase agronómica de la producción de bioetanol a través de la remolacha absorbe 7,8 MJ/kg (en un rango de entre 3,7 MJ/kg y 11,9 MJ/kg). La **Tabla 2-9** especifica los inputs energéticos de esta fase.

Coste energético de la fase agronómica	Remolacha azucarera (GJ/ha)
Maquinarias	18,2
Azoto (N)	11,3
Fósforo(como P2O5)	2,5
Potasio(como K2O)	0,5
Fitofármacos	1,1
Semilla	0,3
Total	33,9

Fuente: *Venturi P. y Venturi G.*; "Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems", *Biomass and bioenergy*, 2003; *Dos Santos M.A.*, *Energy analysis of crops used for production ethanol and CO2 emissions*, www.ivig.coppe.ufrj.br/doc/alcofoen.pdf. *Elaboración propia*

Tabla 2-9. Inputs energéticos de la fase agronómica para la remolacha azucarera



La producción de bioetanol con remolacha azucarera absorbe en total un promedio de 23,6 MJ/kg. La **Tabla 2-10** indican los inputs energéticos totales para la producción de bioetanol a partir de remolacha azucarera.

Coste energético de la producción	Remolacha azucarera (MJ/kg)
Total fase agronómica	3,7-11,9
Extracción	5,2
Fermentación-destilación	6,2
Deshidratación	3,4
Otros	1
Total	19,5 - 27,7

Fuente: Venturi P. y Venturi G.; “Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems”, *Biomass and bioenergy*, 2003; Dos Santos M.A., *Energy analysis of crops used for production ethanol and CO2 emissions*, www.ivig.coppe.ufri.br/doc/alcfoen.pdf. Elaboración propia

Tabla 2-10. Inputs energéticos totales para la producción de bioetanol con remolacha azucarera

Tomando en consideración una densidad energética media de 27 MJ/kg, el bioetanol producido con la remolacha presenta un balance energético promedio de 1,1. Este balance puede ser mejorado hasta 2,2 si se valoriza la pulpa obtenida en el transcurso de la extracción y previamente al secado.

En el caso del bioetanol producido con sorgo azucarero, la fase agronómica utiliza una media de 4,9 MJ/kg (en un rango entre 4,3 MJ/kg y 5,6 MJ/kg). La transformación industrial incide de media en 13,9 MJ/kg (rango entre 12,8 MJ/kg y 15,1 MJ/kg). Descontando los costes energéticos de almacenamiento y transporte, el *input* para la producción de bioetanol con sorgo azucarero tiene una media de 18,8 MJ/kg (ver **Tabla 2-11**).

Coste energético de la producción	Sorgo azucarero (MJ/kg)
Fertilizantes (1)	2,1
Fitofármacos	0,3
Carburantes	1,8
Total parcial de la fase agronómica	4,2
Extracción	3,9
Fermentación-destilación	5,1-7,4
Deshidratación	2,3
Otros	1,5
Total	17,0-19,3

(1) N (5,0 GJ/ha), P2O5 (1,0 GJ/ha), K2O (1,4 GJ/ha)

Fuente: Venturi P. y Venturi G.; “Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems”, *Biomass and bioenergy*, 2003; Dos Santos M.A., *Energy analysis of crops used for production ethanol and CO2 emissions* Elaboración propia

Tabla 2-11. Inputs energéticos totales para la producción de bioetanol con sorgo azucarero

Dado que el almacenamiento y el transporte conllevan algunos puntos críticos causados por el los altos contenidos de agua y azúcar en la biomasa recogida y en su consiguiente capacidad



de fermentación, generalmente se adoptan estrategias orientadas a minimizar la entidad de dichas fases. La concentración del zumo extraído y el almacenamiento en silos son soluciones que limitan los problemas relativos al almacenamiento, aunque la concentración tiene un consumo energético más elevado y no es aconsejable su uso.

La realización de cadenas de producción cortas para el bioetanol producido con sorgo, abarata los costes energéticos del transporte: 6,3 MJ/Km. por tonelada transportada. Frente a una densidad energética de 27 MJ/kg., el balance energético del bioetanol a través del sorgo azucarero es de 1,4. Se reduce hasta 1,2 en el caso de que se incluyan los costes de transporte y de almacenamiento. La valorización de los subproductos - obtenidos en grandes cantidades - puede contribuir a la mejora de dicho balance. A modo de ejemplo, la sola combustión del bagazo seco puede llegar a cubrir los costes energéticos de las fases de extracción, destilación y deshidratación. El balance energético de la cadena puede en este caso alcanzar el valor de 12,4.

En la cadena de producción del bioetanol con maíz, la fase agronómica utiliza entre 16 GJ/ha y 40 GJ/ha - que corresponden a 8,2 MJ/kg. Los *inputs* de la transformación industrial dependen de la elección elegida para la molienda. Por lo tanto, la producción de bioetanol a partir de maíz necesita de media 24,6 MJ/kg.

Coste energético de la producción	Maíz (MJ/kg)
Fertilizantes	2,1
Carburantes de origen fósil	0,3
Otros (1)	1,8
Total parcial de la fase agronómica	4,2
Transporte	3,9
Conversión por molienda por vía seca	5,1-7,4
Conversión por molienda por vía húmeda	2,3
Total	17,0 - 19,3

(1) comprensivo de fitofármacos

Fuente: Hosein Shapouri y otros: 'Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol'; Elaboración propia
Tabla 2-12. Inputs energéticos totales para la producción de bioetanol con maíz

Teniendo en cuenta la densidad energética de 27 MJ/kg, el bioetanol procedente del maíz presenta un balance de 1,1 en el caso de molienda por vía seca, y de 1,0 en el caso de molienda por vía húmeda. Si se lograra valorizar los DDGS, el balance energético mejora hasta llegar al 2,2-2,5 dependiendo del tipo de molienda.

Tanto el trigo como la cebada son usados comúnmente para la producción de etanol en Europa. En 2007, el 46% de la producción de etanol europeo se ha obtenido a través del trigo y otro 26% a partir de la cebada. Para ambas materias primas, el desarrollo tecnológico actual no permite que el biocombustible obtenido sea competitivo respecto a los carburantes fósiles tradicionales, siendo pero los márgenes de mejora muy amplios, sobre todo en consideración de las posibles valorizaciones, tanto energética como agrícola, de los subproductos de la producción de etanol, y de la posibilidad de cogeneración. Teniendo en cuenta la densidad energética de 27 MJ/kg, el balance energético del bioetanol proveniente del trigo presenta valores positivos que varían de 1,04 hasta 1,1, sobre todo en función de los costes de transporte. El balance energético de la cebada se sitúa en torno al 1,06, siendo los costes energéticos de la fase de transporte de la cebada más altos respecto a los del trigo. La



viabilidad energética en el uso de trigo y cebada para la producción de bioetanol puede incrementarse significativamente tomando en consideración las posibilidades brindadas por la valorización energética de los subproductos que derivan del proceso de producción del biocarburante, sobre todo paja y heno. La utilización de los subproductos, como materias primas energéticas, logra incrementar significativamente el balance energético de estos cereales hasta 2 o 4.

El balance energético total puede mejorarse de otra forma, interviniendo sobre el contenido energético de los fertilizantes. De hecho tanto en el trigo como el coste energético de este factor es muy relevante.

Coste energético de la producción	Trigo (MJ7Kg)
Fase agronómica	5,2 - 5,25
Producción (incluidos fertilizantes)	17 - 17,5
Transporte	0,25 - 1,5
Otros	1,75
Total	24,23 - 26

Fuente: CIEMAT y Dos Santos M.A., *Energy analysis of crops used for production ethanol and CO2 emissions*, www.ivig.coppe.ufrj.br/doc/alcofoen.pdf. Elaboración propia

Tabla 2-13. Inputs energéticos totales para la producción de bioetanol con trigo

Coste energético de la producción	Cebada (MJ7Kg)
Fase agronómica	5,7
Producción (incluidos fertilizantes)	15,74
Transporte	4
Otros	---
Total	25,44

Fuente: CIEMAT y Dos Santos M.A., *Energy analysis of crops used for production ethanol and CO2 emissions*, www.ivig.coppe.ufrj.br/doc/alcofoen.pdf. Elaboración propia

Tabla 2-14. Inputs energéticos totales para la producción de bioetanol con cebada

En el caso de las biomásas de origen lignocelulósico, las estimaciones hechas con las soluciones técnicas en fase de estudio indican que el balance energético del bioetanol de origen lignocelulósico es de 1,8-5,6. La amplitud del rango es debida a la inmadurez de la tecnología y a las consideraciones generalmente válidas en las estimaciones de los balances energéticos.

BIO-ETBE (ETIL TER BUTILE ETERE)

El bio-ETBE es un antidetonante sintetizado a partir del bioetanol. Puede ser utilizado en la composición de gasolinas para los motores de ciclo OTTO en sustitución del benceno y del MTBE, que a su vez han sustituido al plomo tetra-etilo. Dado que en su síntesis participa un hidrocarburo fósil (isobuteno), se considera biocarburante en una medida proporcional al peso del bioetanol en el compuesto final (es decir, alrededor del 47%). Las propiedades como antidetonante son parecidas a las del MTBE, pero su combustión ejercita un impacto inferior



sobre el balance atmosférico del anhídrido carbónico. Actualmente en la UE, puede ser usado en mezcla al 15% en volumen con la gasolina.

2.2.1.5 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

El bio-ETBE presenta unas características físico-químicas muy parecidas al MTBE, hasta el punto de que los poderes antidetonantes de ambos se pueden considerar iguales.

En la **Tabla 2-13** se comparan las características físico-químicas del bio-ETBE, la gasolina y el MTBE. Se puede ver que el bio-ETBE presenta valores parecidos a la gasolina en cuanto a densidad energética y volatilidad, lo que hace la mezcla del bio-ETBE con la gasolina no reduzca las prestaciones del carburante y no incremente su volatilidad. El número de octano más elevado del bio-ETBE hace que aumente la capacidad antidetonante de la gasolina.

Características	Bio-ETBE*	Gasolina*	MTBE
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	27	44	35
Contenido en oxígeno (% en peso)	35	Ausente	18
Motor Octane Number (MON)	96	85	101
Research Octane Number (RON)	130	95	118
Número de Octano (valor medio entre MON y RON)	113	90	110
Temperatura de ebullición (C°)	78	100	55
Tensión de vapor (kPa)	124	85	55
Estado	líquido	líquido	líquido
Aspecto	limpio	limpio	limpio

* Valor medio

Fuente: <http://www.biomassenergycentre.org.uk/>. Elaboración propia

Tabla 2-15. Comparación de las características físico-químicas del bio-ETBE, de la gasolina y del MTBE

2.2.1.6 MATERIAS PRIMAS

El bio-ETBE es un producto del bioetanol, por lo que las materias primas usadas para producir el biocarburante son las mismas en ambos casos. Si se obtienen a partir de cultivos alcohólicos específicos, el bio-ETBE tiene los siguientes rendimientos agronómicos (ver **Tabla 2-16**).

Cultivo alcohólico	Rendimiento medio del bio-ETBE (t/ha)
Remolacha azucarera	9,6
Sorgo azucarero	8,3
Maíz	7,2

Fuente ISEE y ENI. Elaboración propia

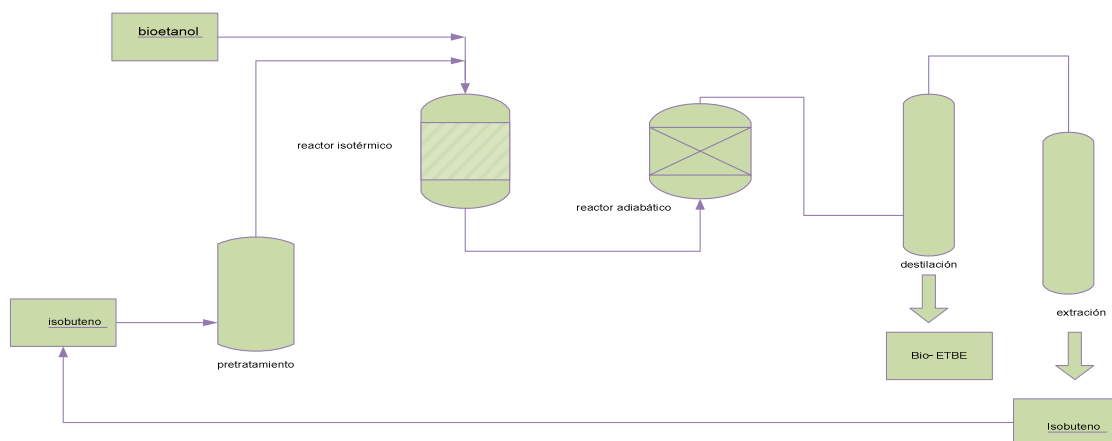
Tabla 2-16. Rendimiento agronómico medio del bio-ETBE según cultivo

2.2.1.7 TECNOLOGÍAS Y PROCESOS DE PRODUCCIÓN



La reacción química entre el isobuteno y el bioetanol por la cual se produce el bio-ETBE, es una catálisis ácida que se da en una superficie de resina con intercambio iónico. Es una reacción isotérmica caracterizada por un rendimiento teórico muy bajo (a una temperatura de 70° C, se estima en el 84,7%). El agua presente en el ambiente de reacción disminuye el rendimiento por la transformación del isobuteno en alcohol isobutílico. La concentración óptima de bioetanol no puede superar el 4% (en moles), dado que el bioetanol en exceso produce el recubrimiento excesivo de la superficie catalítica, favorece la polimerización del isobuteno y reduce el rendimiento de la reacción. Antes de su transformación, pasa por una fase de tratamiento preliminar con agua con el fin de quitar las impurezas presentes fruto de las operaciones de refino del petróleo y que podrían reducir la eficiencia catalítica de la reacción.

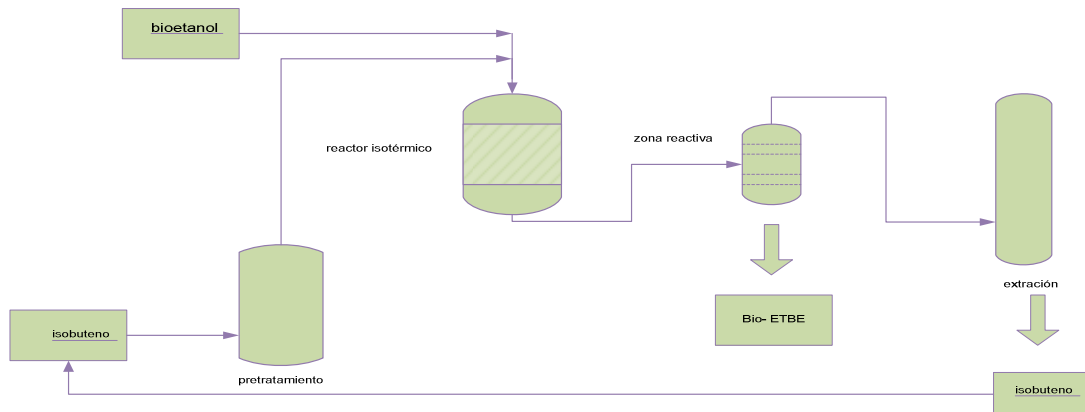
El bio-ETBE usa las mismas tecnologías que el MTBE, que goza de tecnologías ya experimentadas para su producción. La síntesis normal se produce en dos reactores en secuencia con el fin de maximizar el rendimiento de la conversión. En el **primer reactor** (reactor isotérmico) la reacción se lleva a cabo a una temperatura de 90° C y una presión de 1,5-2,0 MPa. El calor producido se recupera con el fin de no ralentizar la reacción. Es en esta fase donde se obtiene el mayor porcentaje del producto (alrededor del 80%). En el **segundo reactor** (reactor adiabático), la síntesis del bio-ETBE continúa a una temperatura operacional de 50-60° C. El producto sintetizado es purificado por medio de la destilación. El isobuteno en exceso se recupera por medio de una columna de extracción y es puesto en recirculación en el proceso. El **gráfico 2-15** muestra las fases del proceso para la síntesis normal del bio-ETBE.



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-15. Fases del proceso para la síntesis normal del bio-ETBE

La **destilación reactiva** representa un método innovador en la síntesis del bio-ETBE que permite simplificar su proceso de producción eliminando el reactor adiabático y completando la síntesis catalítica en la destilación. Gracias a esta tecnología es posible reducir la inversión inicial necesaria para la puesta en marcha de la planta y mejorar el balance energético del proceso en cuanto que es posible recuperar el bio-ETBE tanto en la cabecera como en la destilación. En el gráfico se esquematizan las fases del proceso para la síntesis según destilación reactiva del bio-ETBE.





Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-16. Fases del proceso para la síntesis según destilación reactiva del bio-ETBE

2.2.1.8 BALANCE ENERGÉTICO

El bio-ETBE es el resultado de la síntesis entre bioetanol y el isobuteno. Por lo tanto, los *inputs* energéticos necesarios para producirlo vienen dados por la suma de los *inputs* del bioetanol y el isobuteno. Tomando como referencia los datos relativos a los balances energéticos por materias primas para la producción de bioetanol y teniendo en cuenta que la incidencia de la producción y de la síntesis se estima en 18,6 MJ/kg., se puede concluir que la síntesis del bio-ETBE requiere 42,2 MJ/kilogramo si se produce con remolacha, 37,4 MJ/ kilogramo si se utiliza sorgo y 43,2 MJ/ kilogramo si se produce a partir de maíz.

La densidad energética del bio-ETBE es de 36 MJ/kg., frente al que le corresponde un balance energético negativo de 0,8 si es producido con remolacha o maíz y de 1,0 si se produce con sorgo. Si en el balance energético del bioetanol se incluyen el output representado por los subproductos, se llega a los siguientes valores de rendimiento energético: 1,2 si es producido con remolacha o maíz y de 1,7 si se produce con sorgo.

BIODIÉSEL

El biodiésel es un carburante compuesto por esteres metílicos de ácidos grasos de cadena larga obtenidos de aceites vegetales o grasas animales, que se caracteriza por su elevada densidad energética: 37 MJ/kg. El éster metílico es el producto de la reacción de un alcohol de cadena corta (por ejemplo, metanol o etanol) con una aceite graso (triglicérido), cuyo resultado es la formación de glicerol (glicerina) y de esteres de ácidos grasos de cadena larga. El biodiésel se puede utilizar en estado puro (B100) o mezclado con gasoil².

La **Tabla 2-17** muestra los valores de las principales propiedades del biodiésel, especificadas según la norma ASTM D 6751 de la *American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM)* y la norma Europea EN 14214.

² La mezcla 20% biodiésel - 80% gasoil, en volumen, se denomina B20; la mezcla 5% biodiésel - 95% gasoil se denomina B5; y así sucesivamente.



Parámetro	Unidad	Especificaciones	
		EN 14214-03	A.S.T.M D 6751-02
Contenido de esteres	% masa	Mín. 96,5	-----
Densidad a 15 °C	g/cm ³	0,86 – 0,90	-----
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	3,50 – 5,00	1,90 – 6,00
Punto de Inflamación (Flash-point)	°C	Mín. 120	Mín. 130
Punto de obstrucción de filtro frío (P.O.F.F)	°C verano	Máx. 0	-----
	°C invierno	Máx. -20	-----
Azufre total	% masa	Máx. 0,001	Máx. 0,05
Residuo carbonoso Conradson al 100%	% masa	Máx. 0,05	Máx. 0,05
Número de cetano	----	Mín. 51	Mín. 47
Contenido en cenizas	% masa	Máx. 0,03	Máx. 0,02
Contenido en agua	mg/Kg.	Máx. 500	-----
Agua y sedimentos	% volumen	-	Máx. 0,05
Corrosión al cobre (3h/50 °C)	Grado de Corrosión	Máx. 1	Máx. 3
Estabilidad a la oxidación	horas	Mín. 6	-----
Índice de acidez	mg KOH/g	Máx. 0,50	Máx. 0,80
Contenido en metanol	% masa	Máx. 0,20	-----
Contenido en monoglicéridos	% masa	Máx. 0,80	-----
Contenido en diglicéridos	% masa	Máx. 0,20	-----
Contenido en triglicéridos	% masa	Máx. 0,20	-----
Glicerol libre	% masa	Máx. 0,02	Máx. 0,02
Glicerol ocluido	% masa	Máx. 0,23	-----
Glicerol total	% masa	Máx. 0,25	Máx. 0,24
Índice de yodo	----	Máx. 120	-----
Fósforo	ppm.	Máx. 10	Máx. 10
Sales Metálicas (Na+K)	mg/Kg.	Máx. 5	-

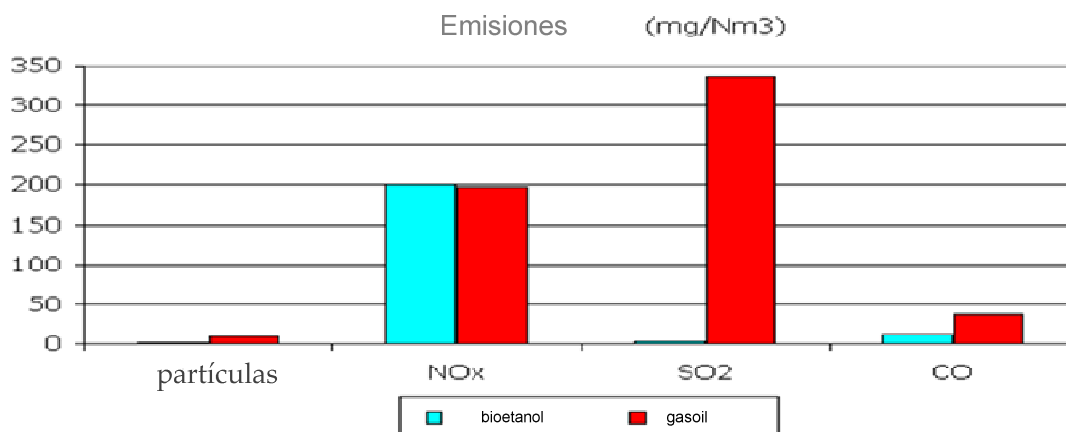
Fuente: www.abcbiodiésel.com.

Tabla 2-17. Valores de las principales propiedades del biodiésel, especificadas por la norma ASTM D 6751 y por la norma Europea EN 14214

La sustitución del gasoil por el biodiésel conlleva importantes beneficios ambientales en términos de contaminantes emitidos a la atmósfera durante la combustión (ver **gráfico 2-17 y Tabla 2-18**). En particular, en la combustión del biodiésel se emiten menos cantidades de monóxidos de carbono, partículas, sulfatos, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados. El uso del biodiésel permite un ahorro de emisiones de anhídrido carbónico del rango de 40-60% respecto al gasoil convencional³.

³ Este cálculo sólo tiene en cuenta la fase de producción





Fuente : Federici Mirco y Nicola Graniglia: 'Biomasse e Biocombustibili per la Produzione di Energi', Workin Paper, Università di Siena, 2005. Elaboración propia
Gráfico 2-17. Principales emisiones del bioetanol y del gasoil fósil

Porcentaje de reducción de los principales gases efecto invernadero medidas en el tubo de escape				
	SOx	CO	NOx	PM
Biodiesel	-100%	-50%	13%	-30%
Biodiesel 80/20	-20%	-30%	2%	-22%

Fuente : Federici Mirco y Nicola Graniglia: 'Biomasse e Biocombustibili per la Produzione di Energi', Workin Paper, Università di Siena, 2005. Elaboración propia
Tabla 2-18. Porcentaje de ahorro de emisiones del biodiésel respecto al gasoil

2.2.1.9 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Las características físico-químicas del biodiésel lo convierten en un producto muy afín al gasoil y, por la tanto, fácilmente sustituible por el diésel de origen fósil en los motores endotérmicos de ciclo Diésel. En la **Tabla 2-19** se comparan las principales características físico-químicas del biodiésel y del gasoil.

	GASOLEO	ACEITES VEGETALES	BIODIESEL
Densidad a 20 °C (kg/m ³)	840	910/930	870/890
Viscosidad a 40 °C (Cst)	3,5	25/35	3,5/4,5
P.C.I. (MJ/kg)	43	35/38	36/39
P.C.I. (MJ/l)	36	32/35	32/34
Nº Cetano	48/51	30/40	49/54
POFF (°C)	-20	10/20	0/-15
Residuo carbonoso (%)	0,1	>10	0,25/0,42
Punto de inflamación (°C)	65	>200	120/170
Azufre (% en peso)	0,05	0	0

Fuente: Manual de uso de biocarburantes. Elaboración propia
Tabla 2-19. Principales características físico-químicas del biodiésel, aceites vegetales y del gasoil



Algunas características convierten al biodiésel en un combustible más eficiente que el gasoil: el alto número de cetano garantiza un arranque rápido del motor; el valor del flash-point conlleva más seguridad en la manipulación. Sin embargo, otras características evidencian su peor comportamiento frente al gasoil: el número de yodo más alto describe una mayor propensión al deterioro; valores de los puntos de turbidez y fluidez más bajos lo hacen más vulnerable al frío y menos maleable en las temporadas invernales. El biodiésel presenta una densidad energética más baja que el gasoil: para sustituir 1kg de gasoil son necesarios 1,13 kg de biodiésel.

2.2.1.10 MATERIAS PRIMAS

El biodiésel se puede producir a partir de aceites vegetales obtenidos por cultivos energéticos oleaginosos, grasas animales y vegetales usadas de origen alimentario y grasas o aceites vegetales recuperados mediante recogida selectiva.

En las latitudes de la península ibérica los cultivos generalmente empleados para la producción de biodiésel son la colza, el girasol y, en menor medida, la soja. El cultivo de mostaza etíope (*Brassica Carinata*) se encuentra en fase experimental, pero resulta prometedor para las regiones más meridionales de la península por sus reducidas necesidades hídricas y por su adaptabilidad a los terrenos de cultivo. Los aceites vegetales usados en la producción de biodiésel, provienen de la preparación y conservación de alimentos, del sector de la restauración, de las industrias agroalimentarias y del sector doméstico.

Del mismo modo, pueden utilizarse grasas animales residuales de las industrias bovina, porcina, y avícola. Estos materiales están caracterizados por su elevada acidez y necesitan un tratamiento previo antes de ser utilizados para la producción de biodiésel. Una vez terminado el tratamiento previo, las grasas animales residuales se pueden utilizar en las plantas de producción de biodiésel en mezcla con los aceites vegetales obtenidos a través de los cultivos energéticos.

Cultivos energéticos oleaginosos	Producción de semilla (t/ha)	Contenido en materia grasa (% en peso)	Rendimiento medio del biodiésel* (t/ha)	Coste del cultivo* (€/ha)
Colza	1,5-2,1	41-50	0,9	500
Girasol	2,0-3,2	40-51	0,5-1,2	600
Soja	2,9-3,6	18-21	0,6	800
Brassica Carinata	2,9-3,5	30-39	1	400

* En valores medios

Fuente: IEA y APPA, Junta de Andalucía, www.navarraagraria.com, MARM. Elaboración propia
 Tabla 2-20. Principales características mercadológicas de los cultivos energéticos para la producción del biodiésel

La selección del tipo de aceite afecta a la producción y a la tecnología requerida. La elección del tipo de aceite o grasa a utilizar en la producción de biodiésel depende de sus características químicas y, sobre todo, de la cantidad de ácidos grasos libres asociados con los triglicéridos.

Los **aceites vegetales** suelen contener una cantidad muy baja de ácidos grasos y fosfolípidos. Los ácidos grasos se eliminan en la fase de refinado y los fosfolípidos necesitan de un proceso de



desgomado. Los aceites vegetales se pueden adquirir brutos, refinados o limpios de fosfolípidos.

Las **grasas animales residuales** y las **grasas recicladas** tienen un nivel mucho más alto de ácidos grasos libres. Si las grasas son de buena calidad (15% de ácidos grasos), se suelen utilizar en la producción de comida para animales y mascotas. Sólo si son de mala o muy mala calidad (entre 50 y 100% de ácidos grasos) se utilizan para la producción de biodiésel. Las grasas intermedias (entre 15% y 50 de ácidos grasos) presentan algunas dificultades en su proceso de conversión al biodiésel que se pueden resumir en: presencia de emulsiones difíciles de romper, presencia de arena, alto contenido de agua, color y olor muy persistentes que pueden afectar a la producción final de biodiésel.

El **alcohol** más usado en la producción de biodiésel es el metanol, aunque también se emplean el etanol, el alcohol isopropílico y el butanol. La elección de un alcohol u otro dependerá de factores como:

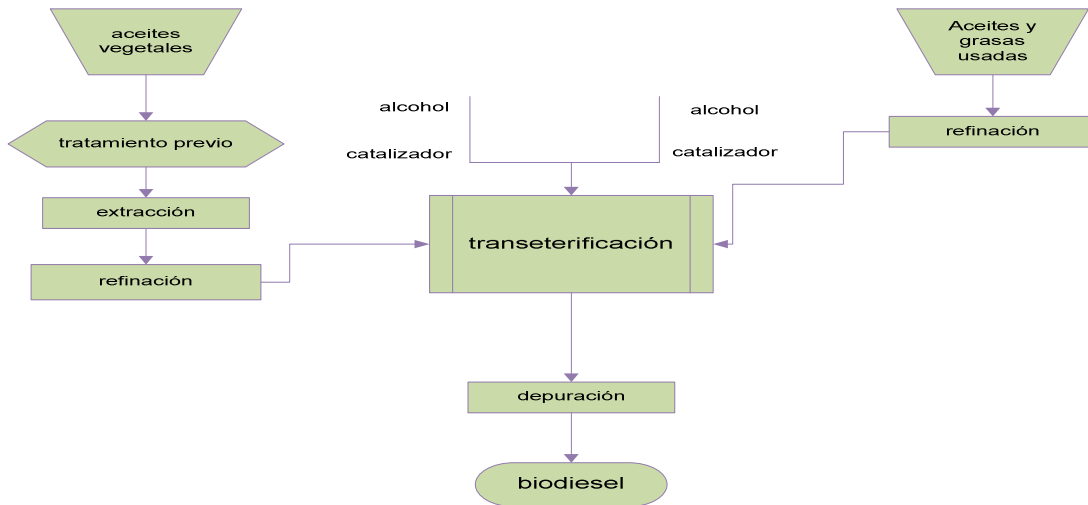
- Su contenido de agua. La cantidad de agua influye de forma negativa en la reacción y da lugar a un biodiésel más pobre y con altos niveles de jabón, ácidos grasos libres y triglicéridos.
- Su precio. Puesto que son necesarios tres moles de alcohol para reaccionar completamente con una mole de triglicéridos (3moles:1moles), el diferencial de coste por gamo-mole de los alcoholes usados como reactivos resulta determinante a la hora de elegir el alcohol. En el proceso de catálisis, el alcohol participa incrementando su relación de mole a 6:1 (6 moles de alcohol por una de triglicéridos). Esto es debido a que el alcohol es necesario en la cola del proceso para que los ésteres metílicos alcancen un rendimiento del 99,7% y se garantice el estándar de glicerina previsto.
- La cantidad de alcohol necesario para la reacción
- La posibilidad de recuperación y reciclaje. El alcohol residual se puede recuperar y reciclar dentro del proceso, minimizando los costes de la materia prima y los impactos ambientales asociados. El etanol resulta de más difícil recuperación que el metanol, ya que forma un azeotropo con el agua que dificulta su limpieza durante la fase de recuperación.
- Su régimen de tasación
- Cuestiones relacionadas con las emisiones a la atmósfera.

El metanol resulta de más fácil recuperación y tiene un contenido menor de agua que el etanol. Aunque el metanol es más tóxico y más volátil que el etanol, las dos razones anteriores lo convierten en el alcohol preferido para producir biodiésel.

2.2.1.11 TECNOLOGÍAS Y PROCESOS DE PRODUCCIÓN

Las materias primas para la producción del biodiésel son distintas, pero suelen compartir muchas de las fases de la cadena de producción del carburante (ver **gráfico 2-18**).





Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-18. Esquema general de la cadena de producción del biodiésel

Muchos de los procesos utilizados para la producción del biodiésel utilizan un catalizador, debido a que el alcohol usado en la reacción puede resultar poco soluble en la fase oleica. El catalizador facilita la solubilidad del alcohol y permite que la reacción funcione con mejores rendimientos. Los catalizadores pueden ser materiales bases, ácidos o enzimas.

Los catalizadores más usados son el hidróxido de sodio, el hidróxido de potasio y el metóxido de sodio. La mayoría de los catalizadores básicos se producen a través de aceites vegetales. En el caso de que los aceites vegetales usados no sean refinados, los ácidos grasos presentes (< 2%) se transforman en jabón durante el proceso y acaban convirtiéndose en glicerina no refinada.. Como inconveniente, cabe destacar que los catalizadores básicos forman moléculas de agua al reaccionar con el alcohol y absorben agua en la fase de almacenamiento. Si la cantidad de agua que excede es mucha, el catalizador puede reducir sus propiedades y el biodiésel producido no puede llegar a alcanzar los estándares mínimos de glicerina previstos para el biodiésel.

Los catalizadores ácidos usados en la transesterificación resultan demasiados lentos en los procesos industriales de producción de biodiésel y se usan sobre todo en los procesos de esterificación de los ácidos grasos libres. Estos catalizadores, en mezcla con metanol, se añaden a los ácidos grasos libres o a las materias primas con alto contenido de ácidos grasos para la producción de biodiésel.

Finalmente, los catalizadores enzimáticos todavía no representan una alternativa eficiente a los ya presentados. Algunas enzimas actúan sobre los triglicéridos convirtiéndolos en esteres metílicos, otras actúan sobre los ácidos grasos. Su uso comercial tiene algunas limitaciones: los precios de las enzimas son altos, la velocidad de reacción es bastante lenta y el rendimiento de los esteres metílicos es generalmente menor del 99,7%. El uso de enzimas como catalizadores no resulta viable por el momento.

Tratamiento previo, extracción y refino en el proceso de producción de biodiésel a partir de aceites vegetales sin usar



Tratamiento previo

El **tratamiento previo** de las semillas es una operación compuesta por varias fases y está destinada a quitar todos aquellos residuos generados en la recogida y a mejorar el rendimiento de la extracción. La semilla se limpia con métodos físicos y luego es descascarada y molida con granulometría variable. El tratamiento previo se completa con las fases de calentamiento y acondicionamiento, las cuales, operando con temperatura y humedad controladas (80 - 90° C y humedad de 7-10% en peso), favorecen la salida de las sustancias grasas.

Extracción de aceites

Hay diferentes procesos que se utilizan para **extraer los aceites** y que se eligen en función del contenido en materia grasa de las semillas y de la inversión económica que se quiere realizar. Aquí se resumen las tres técnicas principales utilizadas hoy en día:

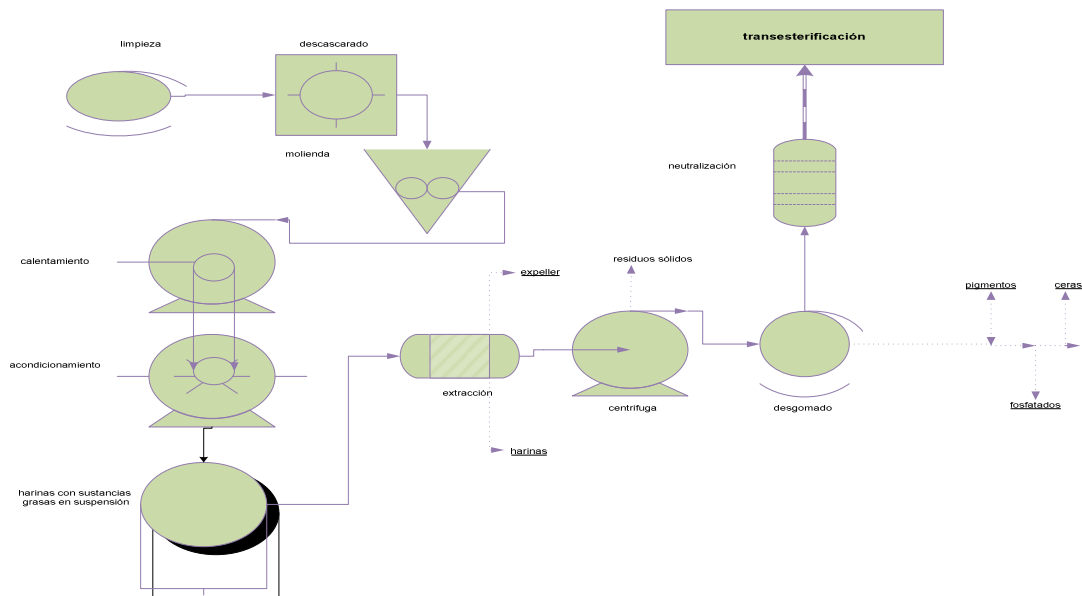
- **Extracción mecánica.-** se usa para semillas con un contenido de materia grasa superior al 20% en peso. El rendimiento de la extracción es del orden de 30/33%. Se usan prensas de tipo tornillo o hidráulicas.
- **Extracción química.-** se usan disolventes orgánicos (hexano, propano, fluidos supercríticos) que tienen la capacidad de disolver las sustancias grasas. La extracción se conduce a una temperatura de 50°C y el disolvente se usa en una relación 18:1 respecto a la cantidad de semilla. La extracción química es válida también para semillas con contenido de materia grasa inferior al 20% en peso. El contacto entre las semillas molidas y el solvente puede darse por percolación por gravedad, en el caso de granulometrías más grandes, y por inmersión para las harinas más finas y homogéneas. El rendimiento de la extracción química es del orden del 40-41% en peso.
- **Extracción mixta.-** a una primera fase de extracción mecánica parcial que deja en la matriz un residuo en aceite del 20-24% en peso, le sigue una segunda fase de extracción química que sube el rendimiento de la extracción hasta el 42% en peso.
Los subproductos de esta fase de la cadena de producción son el *'expeller'*, en el caso de extracción mecánica (rendimiento del 67% en peso); la harina, en el caso de extracción química (rendimiento del 59% en peso); y la harina desaceitada, en el caso de extracción mixta (rendimiento del 58% en peso).

Por su contenido en proteínas, carbohidratos y fibras, estos subproductos son usados sobre todo en la alimentación zootécnica. Los poderes nutricionales de los subproductos de la extracción dependen de los sistemas de tratamiento previo y de extracción llevados a cabo. El descascarillado mejora el poder nutricional y hace más sencilla la digestión de las harinas y del *'expeller'*, sobre todo en aquellas semillas en cuyos aquenios las sustancias lignocelulósicas representan un porcentaje relevante (20-50% en peso). El *expeller* contiene una importante fracción de aceites (8-12% en peso) y de vitaminas liposolubles, y por lo tanto se considera un alimento zootécnico completo y caracterizado por una baja conservación. La parte proteica del residuo puede valorizarse para la producción de energía térmica mediante combustión directa (poder calorífico inferior a 20,9 MJ/kg.). Las harinas producidas por extracción química y mixta tienen bajo contenido en grasas (1-2% en peso) y por lo tanto se usan en la preparación de piensos concentrados y no tienen problemas relevantes para su conservación.



Refino

En la fase de refino, los aceites brutos se tratan para poder obtener aceites cualitativamente mejores y aptos para ser convertidos en biodiésel. En primer lugar, los aceites son centrifugados para poder separar los residuos sólidos. A continuación, son desgomados con agua o ácido para eliminar los pigmentos, ceras y fosfatados. Finalmente, se neutralizan por vía física (es decir, con altas temperaturas de entre 240 y 260°C y bajo vacío) o química (es decir, mediante saponificación con sodio hidróxido con temperatura de 60 -80°C) con el fin de reducir la acidez de los aceites. Una vez refinados, los aceites se envían para ser transformados en biodiésel.



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-19. Fase de refino del biodiésel

Refino en el proceso de producción de biodiésel a partir de aceites y grasas usadas

Los aceites y las grasas se deterioran por las altas temperaturas alcanzadas en la cocción. Por encima de los 150° C, estos productos alcanzan el punto de humo y los triglicéridos se escinden progresivamente en monoglicéridos y diglicéridos de ácidos grasos y ácidos grasos libres, con el consiguiente incremento de la acidez. En función de las modalidades de empleo, los aceites y grasas usados pueden alcanzar valores de acidez variable entre 2 y 15%, mientras que para la conversión en biodiésel la acidez no puede superar el 4%.

Refino

Para la producción de biodiésel a partir de aceites y grasas usadas, es necesario regenerar esos aceites para reducir su acidez. Las principales técnicas de regeneración son la saponificación con sodio hidróxido y la esterificación de los ácidos grasos (síntesis de glicéridos).

- La **saponificación con sodio hidróxido** se usa cuando la acidez del aceite usado es inferior o igual al 10% en cuanto que para valores más altos las sustanciales pérdidas de aceite no hacen rentable la inversión. Indicativamente, para valores de acidez del 4% la



pérdida es del 1% en peso, por acidez del 10% la pérdida es del 30% en peso. El proceso necesita temperaturas de entre 60 y 80°C en una primera fase a la que siguen una fase de centrifugación, para la separación de los jabones, y otra fase de desgomado con agua o ácido para la remoción de fosfatados, pigmentos y ceras.

- **La esterificación de los ácidos grasos** se usa para aceites y grasas con acidez de entre el 10 y el 15 %. Los ácidos grasos libres se convierten en éster metílico por medio de una reacción que se obtiene con altas temperaturas (250-260 °C), presiones (0,5-0,6 MPa) y con el uso de un catalizador ácido- generalmente ácido sulfúrico o ácido fosfórico- que sirve, en este caso, tanto de catalizador como de sustancia higroscópica que absorbe el agua formada en la reacción.

Transesterificación en los procesos de producción de biodiésel a partir de aceites vírgenes y/o usados

Tras el refinado, la producción de biodiésel pasa al proceso de transesterificación independientemente de que se estén utilizando aceites brutos o usados como materia prima. La transesterificación es la reacción de síntesis para la obtención del biodiésel, necesaria para la ruptura de la molécula de triglicérido en tres moléculas más pequeñas y menos viscosas. El balance de masa simplificado del proceso es el siguiente:

- 1000 kg. de aceite refinado + 100 kg de metanol = 1000 kg de biodiésel + 100 kg de glicerol

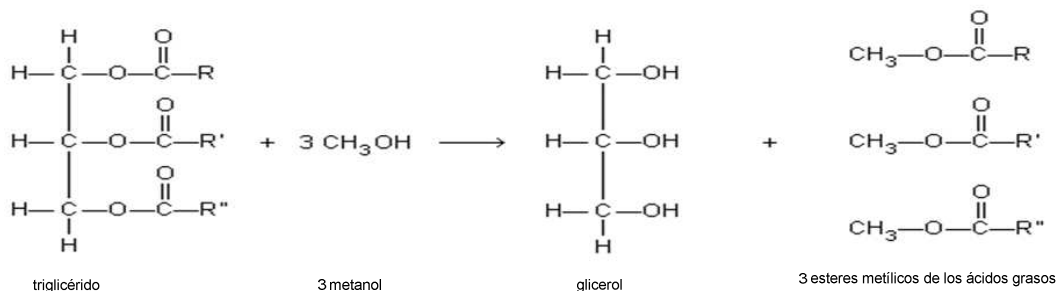


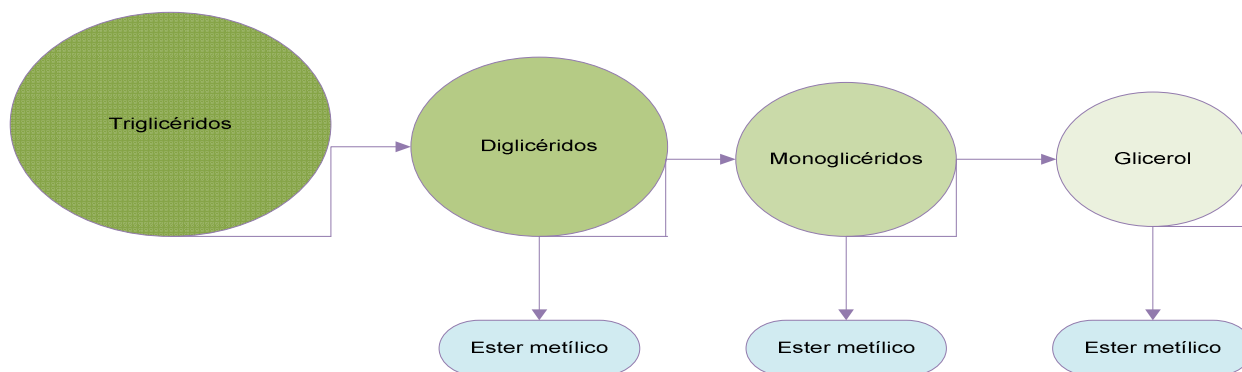
Gráfico 2-20. Esquema de la reacción de transesterificación

Los productos de la reacción son los ésteres metílicos (biodiésel), con un rendimiento del 90% en peso, y el glicerol (glicerina), con un rendimiento del 10% en peso. La ruptura de los triglicéridos que constituyen los aceites en ésteres metílicos, reduce la viscosidad hasta valores muy cercanos a los del gasóleo. La transesterificación se puede realizar a través de diferentes técnicas. La elección de una u otra dependerá de la evaluación de las capacidades productivas deseadas, la calidad de los aceites vegetales y la inversión que se quiere realizar. Los procesos más comunes para la producción del biodiésel son los siguientes (ver **gráficos 2-21 a 2-23**):

- **Reacción en discontinuo.** Es el método más sencillo para la producción de biodiésel. La relación entre triglicéridos y alcoholes es en media de 6:1 (mole:mole). El reactor tiene que estar sellado o equipado con un condensador de reflujo. La temperatura operacional es, en general, de 65°C (con un rango de temperatura de 25°C hasta 85 °C). Los catalizadores usados son básicos (hidróxido de potasio) y se usan en un porcentaje de entre el 0,3 hasta el 1,5. Se necesita una enérgica fase de mezcla para que el aceite, el catalizador y el alcohol se junten y reaccionen. El glicerol se separa en una fase diferente donde el proceso



Distillate Fuels' y la norma Europea EN 14214, que especifican las propiedades que debe tener el biodiésel para ser usado en los medios de transporte a combustión sin generar problemas. El parámetro más importante a considerar durante la producción del biodiésel es el grado de cumplimiento de la reacción de transesterificación. El proceso químico de base que se verifica durante la reacción se puede describir como una cadena de eventos a través de los cuales los triglicéridos se convierten en diglicéridos y estos en monoglicéridos y finalmente en glicerol. En cada paso se produce ester metílico:



Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-23. Conversión de los triglicéridos en glicerol y producción de esteres metílicos

Si la reacción es incompleta, el producto presenta altas concentraciones de contaminantes (triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos) y de moléculas de glicerol que no han sido liberadas (glicerol enlazado). La suma entre el glicerol enlazado y la glicerina libre da el glicerol total (glicerina total). Los estándares del ASTM establecen que la glicerina total presente en el biodiésel tiene que ser menor o igual al 0,24% del producto final, mientras que los estándares europeos (norma EN 14214) fijan un máximo de 0,25%.

Otro factor que determina la calidad del biodiésel es la cantidad de alcohol disuelto en el combustible. Aunque el alcohol disuelto no perjudica en sí la calidad del biodiésel, cantidades mínimas de alcohol pueden hacer disminuir drásticamente el flash-point del biodiésel y hacer su manipulación más peligrosa. Los límites de flash-point establecidos en la norma europea EN 14214 (mínimo 120° C) y en la norma estadounidense ASTM (mínimo 130° C), limitan la presencia de alcoholes en el biodiésel hasta cantidades muy pequeñas (<0,1%).

2.2.1.12 COSTES DE INVERSIÓN Y GESTIÓN DE LA CADENA DE PRODUCCIÓN

Los costes de las plantas de producción de biodiésel están muy relacionados con su capacidad de producción. En las **Tablas 2-21 y 2-22** se indican los costes de inversión y el coste de producción de biodiésel para plantas de **tamaño mediano o grande** y para algunas soluciones técnicas adoptadas que existen en los mercados estadounidenses y europeo. Los datos de la Tabla 2-21 son estimados, mientras que los de la Tabla 2-22 son datos reales de plantas en funcionamiento en el año 2007.



Capacidad productiva (t/año)	Materias primas	Costes de inversión (€)	Costes de gestión (€/año)	Coste de producción (€/t)
10.000	Aceites y grasas usadas	3.200.000	3.657.000	360
10.000	Aceite de soja	2.600.000	5.451.000	540
40.000	Aceite de soja + aceites usados	11.600.000	11.600.000	380
40.000	Aceites usados	10.400.000	17.000.000	420
40.000	Aceite de soja	9.600.000	20.300.000	510
100.000.000 (galones)	Aceite de soja	84.500.000	30.500	598

Fuente: www.nysl.nysed.gov y *Best case studies on biodiésel production plants in Europe*, IEA Bioenergy, (2004); R.L. Bain, 'World Biofuels Assessment Worldwide Biomass Potential: Technology Characterizations', nrel 2007. *Elaboración propia*

Tabla 2-21. Costes estimados de inversión y de producción de biodiésel en mercados estadounidenses y europeos

Capacidad productiva (t/año)	Materias primas	Soluciones técnicas	Costes de inversión (€)
40.000 (Zisterdorf, Austria)	Aceites y grasas usadas (90%) Aceite de colza (10%)	Proceso continuo ("Continuous Transesterificación Reactor", CTER); rendimiento de la transformación 99,8%	5.000.000
50.000 (Arnoldstein, Austria)	Aceites y grasas usadas (70%) Aceite de colza (20%) Grasas animales (10%)	proceso mixto; rendimiento de la transformación 92%	14.500.000
50.000 (Polná, República Ceca)	Aceite de colza (100%)	Con planta de extracción	7.300.000
200.000 (España, Cadiz)	Aceites vegetales crudos		42.000.000

Fuente: www.nysl.nysed.gov y *Best case studies on biodiésel production plants in Europe*, IEA Bioenergy, (2004); R.L. Bain, 'World Biofuels Assessment Worldwide Biomass Potential: Technology Characterizations', nrel 2007. *Elaboración propia*

Tabla 2-22. Costes de inversión y coste de producción del biodiésel en mercados estadounidenses y europeos

La **Tabla 2-23** muestra el coste de inversión y el coste de producción de plantas de tamaño pequeño⁴. Muestra también la superficie agrícola necesaria para lograr esas capacidades

⁴ En general, usan la transesterificación a temperatura ambiente o medio alta.



productivas, estimada con un dato de producción agronómica medio de 0,75 t/ha calculado con una producción de semillas de 2,5 t/ha.

Capacidad productiva (t/año)	Superficie agrícola utilizada (Ha)	Coste de inversión (€)	Coste de producción (€/t)
1500	2000	420.000	450
3000	4000	622.000	400
6000	8000	1.215.500	380

Fuente: 'Small Scale Biodiésel Report' en <http://www.istc.illinois.edu/tech/small-scale-biodiésel.pdf>, www.eia.doe.gov.
 Elaboración propia

Tabla 2-23. Coste de inversión y el coste de producción de plantas de tamaño pequeño

Los bajos costes de inversión posibilitan la participación directa de los agricultores en su desarrollo y explotación, con el consiguiente abaratamiento de los costes de producción de biodiésel.

2.2.1.13 BALANCE ENERGÉTICO

En la producción del biodiésel, la fase agronómica tiene una incidencia de 9,1 MJ/kg. si se utiliza el girasol y de 16,5 MJ/kg. si se utiliza la colza (ver **Tabla 2-24**).

Coste energético de la fase agronómica	Girasol (GJ/ha)	Colza (GJ/ha)
Combustible fósil	9 - 19	5 - 19
Azoto (N)	5,3 - 9,2	4,6 - 9,2
Fósforo (como P ₂ O ₅)	1,4 - 1,7	1,0 - 1,7
Potasio (como K ₂ O)	0,5 - 1,0	0 - 1
Fitofármacos	0,8 - 1,8	0,2 - 0,9
Semilla, maquinaria y otro	3,0 - 5,3	2,2 - 5,2
Total	20 - 38	13 - 37

Fuente: www.cti2000.it/biodiésel.htm. Elaboración propia

Tabla 2-24. Coste energético, en los cultivos de girasol y colza, de la fase agronómica para la producción de biodiésel

En total, la energía requerida para la producción del biodiésel se cuantifica en 18,1 MJ/kg. si se utiliza girasol y de 21,7 MJ/kg. si la materia prima es la colza.



Coste energético de la producción	Biodiésel de girasol (MJ/kg)	Biodiésel de colza (MJ/kg)
Producción de semillas	0,02	0,02
Labrado y acondicionamiento del terreno	1,01	0,36
Siembra	1,4	0,39
Fertilizantes	5,38	14,17
Fitofármaco	1,02	0,86
Recogida semillas	0,29	0,72
Total parcial de la fase agronómica	9,12	16,52
Almacenamiento semillas	0,24	0,1
Conversión industrial (1)	7,46	3,01
Transporte	1,32	2,03
Total	18,14	21,66

(1) extracción, refino, transesterificación

Fuente: www.cti2000.it/biodiésel.htm. Elaboración propia
Tabla 2-25. Coste energético total de la producción del biodiésel para el girasol y la colza

El mayor requerimiento energético se da en la producción de fertilizantes y en la conversión industrial del producto, con diferencia respecto a las otras determinantes del total. En el caso del girasol, el coste energético de la conversión industrial suma el 41% del total (14% por la colza). En el caso de los fertilizantes, éstos representan más del 65% del total del coste energético en el caso del biodiésel producido con colza y del 30% en el caso de producirse con girasol. El biodiésel con un poder calorífico inferior medio de 37 MJ/kg muestra un balance energético positivo de 2,0 si es producido con girasol y de 1,7 si se produce con colza. El balance mejora a 3,1 (en el caso del girasol) y 3,0 (en el caso de la colza) si en el cálculo total de los outputs se incluye el contenido energético del *expeller*, de las harinas y de los residuos de los cultivos.

2.3 BIOCOMBUSTIBLES DE SEGUNDA GENERACIÓN

La diferencia entre los biocombustibles de primera y de segunda generación (BCSG) está en el hecho de que los de segunda generación se pueden producir a partir de una amplia gama de materias primas. Estas materias primas están representadas, por lo general, por cultivos no alimenticios. Se pueden utilizar, por ejemplo, residuos agrícolas, que comprenden todas las partes de los cultivos alimentarios o industriales no consumibles o comercializables. Constituyen una serie muy heterogénea de materias primas, cuyo denominador común es la gran dificultad de eliminación. Algunas de las materias primas que se pueden emplear incluyen las siguientes:

- raíces, hojas o frutos no aprovechables;
- tallos, y en general, la parte aérea de la planta que es preciso separar para facilitar la recolección o las labores agrícolas. Una parte considerable de estos residuos herbáceos (por ejemplo, pajas de leguminosas y algunas de cereal o residuos verdes de cultivos como remolacha azucarera o ciertos residuos de huerta) son consumidos por el sector ganadero;
- residuos lignocelulósicos que se suelen quemar en las propias tierras de labor. A esta categoría de residuos corresponden las pajas de los cereales, el grano y el cañote de maíz,



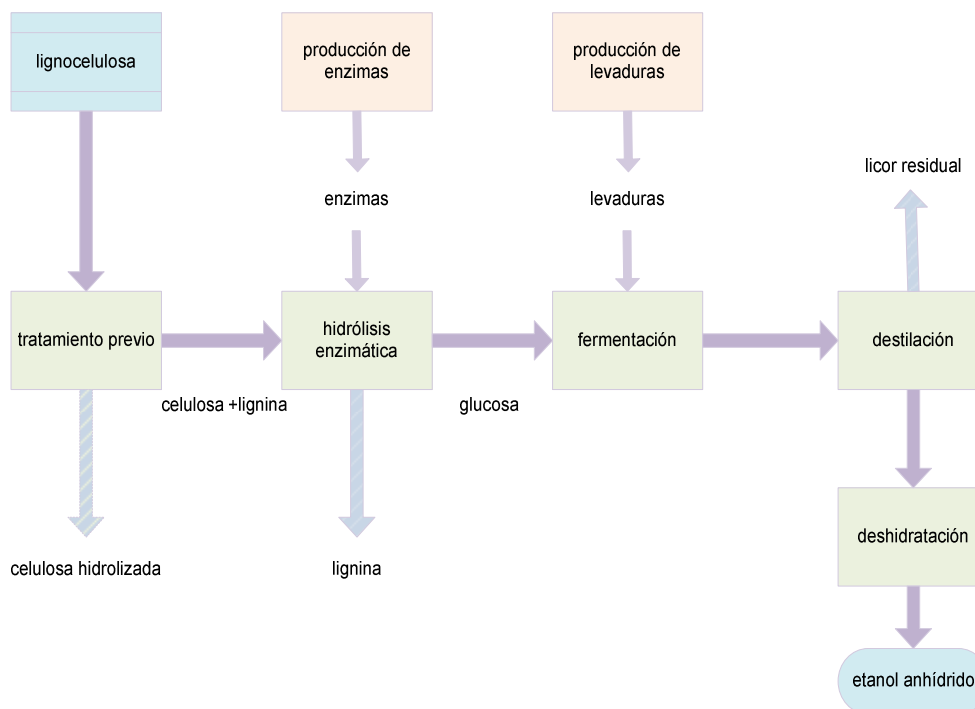
algunos cultivos industriales como los textiles y oleaginosas (girasol, algodón) y la poda anual de frutales y viñedos (sarmientos).

Aparte, cabe hacer mención de los llamados **biocombustibles de tercera generación** que se basan en la intervención de las biotecnologías en el tratamiento de las materias primas. El objetivo es modificar genéticamente las plantas para que el contenido estructural de sus células (lignina, celulosa, hemicelulosa) pueda ser gestionado de acuerdo con algunas especificaciones requeridas para obtener determinadas prestaciones. Por ejemplo, algunos botánicos están desarrollando árboles que tienen la propiedad de crecer de forma normal y que pueden ser activados para cambiar la estructura de sus paredes celulares y permitir que los azúcares presentes en la estructura se suelten más fácilmente. En los biocarburantes de tercera generación, se intenta crear una sinergia entre la ingeniería genética y los procesos de producción de los biocombustibles: plantas con características especiales son procesadas a través de enzimas de ingeniería.

Los BCSG muestran características y prestaciones mejores que los biocarburantes comunes. Sin embargo, su elaboración requiere procesos y tecnologías más complejas y perfeccionadas. Los procesos productivos se encuentran aún en fase de optimización, estimándose un tiempo de maduración de entre 5 y 10 años.

Existen diferentes procesos químicos para tratar adecuadamente la biomasa utilizada como materia prima en la producción de BCSG. Dos procesos predominan sobre el resto: **hidrólisis y procesos termo-químicos**.

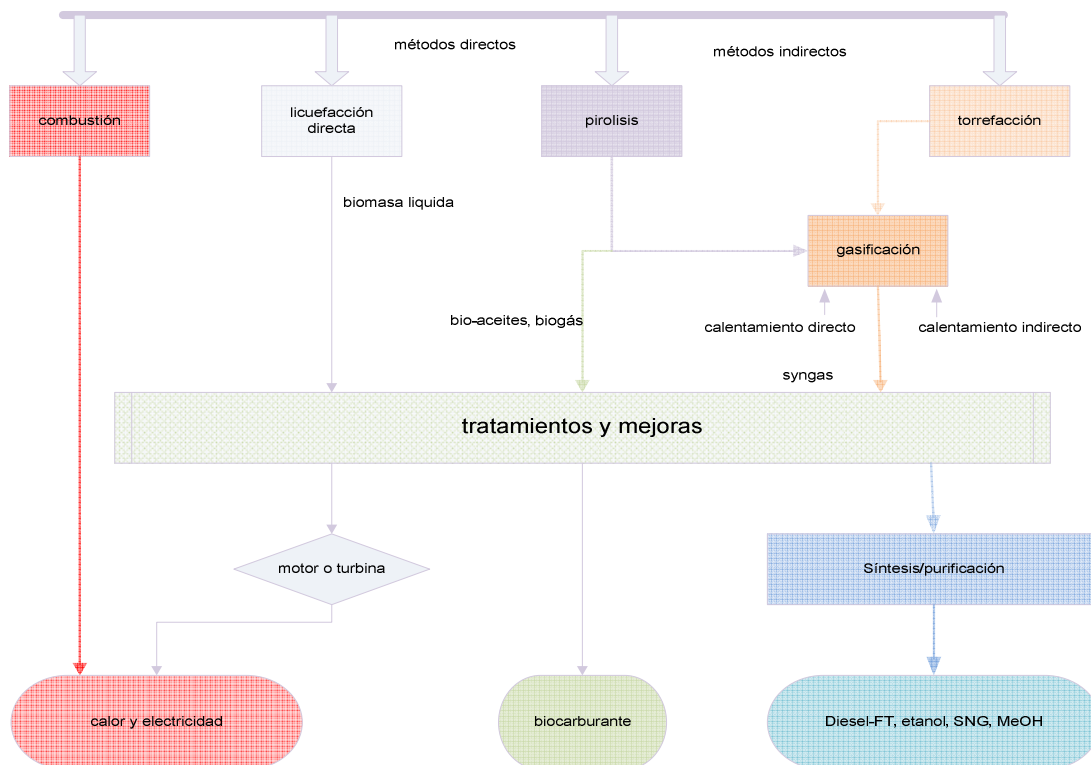
La **hidrólisis** de la lignocelulosa en azúcares (ver **gráfico 2-24**) puede producirse a través de procesos bioquímicos con el uso de enzimas especiales.



Fuente: IFP, Innovating Energy Environment, www.ifp.com. Gráfico 2-24. Esquema de la hidrólisis de la lignocelulosa



Los **procesos termo-químicos** (ver **gráfico 2-25**) usan altas temperaturas para la pirólisis y la gasificación de la biomasa, transforman las lignocelulosas en gases primarios que son seguidamente tratados y acondicionados para convertirse en gas de síntesis (syngas); estos gases pueden ser transformados en diferentes tipos de gases líquidos y carburantes gaseosos a través de distintas reacciones de síntesis. Los biocombustibles que se producen a través de procesos termo-químicos se conocen como '**biocombustibles sintéticos**'. Algunos de los biocombustibles sintéticos líquidos más prometedores son el biometanol y los Fischer-Tropsch fuels.



Fuente: IFP, *Innovating Energy Environment*, www.ifp.com.

Gráfico 2-25. Esquema de procesos termo-químicos para la pirólisis y la gasificación de la biomasa

BIOHIDRÓGENO

El biohidrógeno se obtiene a partir de biomasa y/o de la fracción biodegradable de los residuos, utilizando dos procesos diferentes. El primero, de tipo termo-químico, usa la gasificación y se integra con una fase de rectificación (*steam reforming*) si el contenido final de hidrógeno no es adecuado. El segundo, en fase de estudio, es una fermentación en ausencia de luz similar a la digestión anaeróbica y que permite producir directamente hidrógeno en vez de metano. Los productos intermedios de las vías metabólicas, los ácidos orgánicos, se convierten en biohidrógeno gracias a la luz solar y al proceso de foto-fermentación. El hidrógeno se puede utilizar en los motores de combustión interna de ciclo Otto, en los de ciclo Diésel o en las pilas de combustibles. Las características del biohidrógeno se muestran en la Tabla adjunta.



Características	Biohidrógeno*
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	10,05
Número de Octano (valor medio entre MON y RON)	130
Flash-point (C°)	585
Temperatura de ebullición (C°)	-252
Temperatura de inflamación	-279
Estado	gaseoso
Aspecto	gaseoso

*Valor medio

Fuente: Hamelinck C.N., 'Outlook for advanced biofuels', <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0209-113022/contents.pdf>, Michael. J. Murphy, 'Compendium of Experimental Cetane Number Data', nrel 2005 www.nrel.gov, www.biofuels-summit.com.

Tabla 2-26. Características químico físicas del biohidrógeno

La utilización del biohidrógeno en el sector transporte implica la compresión y la licuefacción del gas o como alternativa su transformación en hidruro metálico

SYNGAS

El gas de síntesis o *syngas* es una mezcla de gases que se genera mediante el proceso de gasificación de los materiales que contienen carbono, entre las cuales están las biomásas lignocelulósicas.

El *syngas* se compone principalmente de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂), como combustibles principales; contiene además nitrógeno y anhídrido carbónico (CO₂). Su poder calorífico inferior es variable dado que su composición puede variar en el curso de la gasificación, usando aire o agua (*steam reforming*) para definir la relación entre H₂ y CO deseada. Sus propiedades físico-químicas permiten su utilización en los motores de combustión interna de ciclo Otto, en los de ciclo Diésel, en las turbinas de gas y en las pilas de combustible. Las características obtenidas en función del tipo de gasificación utilizada se muestran en la **Tabla 2-27**.



Características	Tipo de gasificado		
	aire	oxígeno	vapor
Poder calorífico inferior (PCI)[MJ/Nm ³]	3,8 - 4,6	10	12 - 13
Contenido en monóxido di carbono [%]	12 - 13	30 - 37	32 - 41
Contenido en anhídrido carbónico [% in peso]	14 - 17	25 - 29	17 - 19
Contenido in hidrógeno [%]	9 - 10	30 - 34	24 - 26
Contenido in metano [%]	2 - 4	4 - 6	12,4
Contenido en cetano [%]	0,2 - 1	0,7	2,5
Contenido en azoto [%]	56 -59	02-may	2,5
Rendimiento del gas [Nm ³ /kg de madera seca]	2,3 - 3	1,3 - 1,45	--
Estado	gaseoso		
Aspecto	gaseoso		

Fuente: Hamelinck C.N., 'Outlook for advanced biofuels', <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0209-113022/contents.pdf>, Michael. J. Murphy , 'Compendium of Experimental Cetane Number Data', National Renewable Energy, Laboratory (NREL), www.nrel.gov, www.biofuels-summit.com. Biomass Program: Pyrolysis and Other Thermal Processing, www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html,
 Tabla 2-27. Características físico - químicas del syngas

BIO-ACEITE

El bio-aceite es el producto líquido de la pirólisis de la biomasa lignocelulósica y tiene características muy similares a las del petróleo. La pirólisis es un proceso térmico de descomposición de la biomasa conducido en ausencia de oxígeno y con temperaturas de entre 350 y 550°C. Entre las diferentes opciones de plantas, que permiten rendimientos de bio-aceites del orden del 75% en peso seco de la biomasa de partida, se citan los reactores de lecho fluido y los reactores de ciclón. Los bio-aceites se han experimentado con éxito en los motores de ciclo Diésel y en las turbinas y se considera como un hidrocarburo combustible de alta calidad. En la actualidad genera costes energéticos y económicos demasiado altos para ser considerado un combustible viable.

Características	Bio-aceite*
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	18,5
Número de cetano	10
Contenido en oxígeno [% en peso]	45
Contenido en agua [% en peso]	14
Temperatura de inflamación	70
Contenido in ceniza [% en peso]	0,13
Densidad [kg/m ³]	1.250
Estado	líquido
Aspecto	líquido

*Valor medio

Fuente: Hamelinck C.N., 'Outlook for advanced biofuels', <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0209-113022/contents.pdf>, Michael. J. Murphy , 'Compendium of Experimental Cetane Number Data', National Renewable Energy, Laboratory (NREL), www.nrel.gov, www.biofuels-summit.com. Biomass Program: Pyrolysis and Other Thermal Processing, www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html,
 Tabla 2-28. Características físico-químicas del bio-aceite



BIOMETANOL

El biometanol se diferencia del metanol tradicional por la materia prima utilizada para su producción: mientras que el metanol tradicional es obtenido mediante el proceso de conversión catalítica a partir de un combustible fósil (generalmente gas natural), para el biometanol se usa biomasa lignocelulósica. La gasificación de la biomasa, con la conversión catalítica de los gases obtenidos (CO₂ y H₂), es el proceso más usado para la producción del biometanol. La reacción para la producción de biometanol se da con altas temperaturas (alrededor de los 400°C) y presión (40-80 atm). Dadas las propiedades del biocombustible, muy parecidas a las del bioetanol, el biometanol se puede utilizar en los motores de ciclo Otto y Diésel.

Características	Biometanol*
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	19,5
Contenido de oxígeno [% en peso]	34,7
Número de Octano (valor medio entre MON y RON)	104,3
Número de cetano	5
Flash-point (C°)	464
Temperatura de ebullición (C°)	65
Tensión de vapor [kPa]	32
Estado	líquido
Aspecto	líquido

*Valor medio

Fuente: Hamelinck C.N., 'Outlook for advanced biofuels', <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0209-113022/contents.pdf>, Michael. J. Murphy, 'Compendium of Experimental Cetane Number Data', National Renewable Energy Laboratory (NREL), www.nrel.gov, www.biofuels-summit.com. Biomass Program: Pyrolysis and Other Thermal Processing, www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html,
 Tabla 2-29. características químico físicas del biometanol

En las aplicaciones para el transporte, el biometanol presenta un comportamiento muy similar a la gasolina en cuanto a prestaciones y se caracteriza por un valor más alto de número de octano. La principal criticidad en la utilización del biometanol está relacionada con la seguridad en las fases de transporte y almacenamiento en cuanto que quema sin llama visible y es tóxico por inhalación, contacto e ingestión. Estas problemáticas se reflejan en los elevados costes de gestión que corren a cargo de la red de distribución. El uso de biometanol hasta el 20% en mezcla con la gasolina no requiere modificaciones en el motor o en las infraestructuras de distribución. Su utilización en altas concentraciones con la gasolina o en estado puro necesita de modificaciones en el motor, para garantizar los rendimientos en el arranque en frío y para evitar la corrosión de los materiales.

En la cadena del biodiésel, el biometanol se puede utilizar como reactor en la transesterificación de los aceites vegetales.



BIODIMETILÉTER (BIO-DME)

El biodimetiléter es el dimetil éter obtenido por la biomasa. En el proceso productivo del bio-DME se usa la gasificación de la biomasa lignocelulósica para producir biometanol que se convierte sucesivamente en bio-DME. En la actualidad, se están optimizando algunas tecnologías que permiten la transformación directa del *syngas* en bio-DME. Tomando en consideración las propiedades físico-químicas del bio-DME, éste es indicado para la sustitución del gasoil en los motores de ciclo Diésel.

Características	Bio-DME *
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	28,3
Contenido de oxígeno [% en peso]	35
Número de cetano	57
Flash-point (C°)	292
Temperatura de ebullición (C°)	-23
Temperatura de inflamabilidad	-41
Densidad [kg/m ³]	668 (líquido)
Estado	Gaseoso
Aspecto	Gaseoso incoloro

*Valor medio

Fuente: Hamelinck C.N., 'Outlook for advanced biofuels', <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0209-113022/contents.pdf>, Michael. J. Murphy, 'Compendium of Experimental Cetane Number Data', National Renewable Energy, Laboratory (NREL), www.nrel.gov, www.biofuels-summit.com. Biomass Program: Pyrolysis and Other Thermal Processing, www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html,
 Tabla 2-30. características químico físicas del bio-DME

El bio-DME es gaseoso a temperatura ambiente y líquido si la presión es superior a 5 bares o con temperaturas inferiores a -25°C. Por lo general, es posible su uso en el estado líquido, operando con valores de presión del orden de 5-10 bares.

La investigación sobre las aplicaciones del bio-DME como carburante en el sector transporte se han iniciado recientemente y se ha notado que la predisposición de los motores necesitan la sustitución de algunos materiales, tales como los plásticos, los elastómeros y las gomas, los cuales pueden ser dañados por contacto con el bio-DME. Las operaciones de transporte, almacenamiento y distribución del biocarburante son similares a las adoptadas por el GPL.

BIO-MTBE (METILO TER BUTIL ÉTER)

El bio-MTBE se produce a partir del biometanol y se puede utilizar como antidetonante en los motores de ciclo Otto, como sustituto del MTBE de origen fósil. Sus características físico-químicas son de hecho parecidas al MTBE.

El bio-MTBE incrementa el número de octano de la gasolina sin disminuir su densidad energética o incrementar su volatilidad. Dado que en la reacción de síntesis participa el isobuteno de origen fósil, el bio-MTBE se considera biocarburante en la medida del porcentaje de biometanol presente en su composición, es decir, por un 36%. Con la progresiva eliminación del plomo de la gasolina, a partir de mediados de los años ochenta, el bio-MTBE ha



llegado a ser unos de los componentes más utilizados para la formulación de las gasolinas: su coste y su toxicidad, inferiores a la del plomo tetraetilo y a las del benceno, han hecho crecer el uso del bio-MTBE como antidetonante en todas las gasolinas verdes y, en la actualidad, se usa en porcentajes que van desde el 7 hasta el 12 % en volumen.

El punto crítico principal, que penaliza el uso del bio-MTBE, es su elevada solubilidad en agua. Esta, junto con la modesta absorción de la fracción orgánica y mineral por el suelo y de la escasa degradación del bio-MTBE, representa una grave amenaza para la calidad de las aguas subterráneas.

BIOBUTANOL

El biobutanol es un biocarburante líquido, producido por la fermentación de los azúcares por medio del microorganismo *Clostridium acetobutylicum*, a partir de las mismas materias primas del bioetanol. Por sus propiedades, el biobutanol puede utilizarse en los motores a combustión interna de ciclo Diésel y Otto, de forma análoga al bioetanol.

Características	Biobutanol*
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	36
Contenido de oxígeno [% en peso]	22
Número de Octano (valor medio entre MON y RON)	87
Número de cetano	17
Flash-point (C°)	35
Temperatura de ebullición (C°)	118
Tensión de vapor [kPa]	32
Estado	líquido
Aspecto	líquido

*Valor medio

Fuente: Hamelinck C.N., 'Outlook for advanced biofuels', <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0209-113022/contents.pdf>, Michael. J. Murphy, 'Compendium of Experimental Cetane Number Data', National Renewable Energy Laboratory (NREL), www.nrel.gov, www.biofuels-summit.com. Biomass Program: Pyrolysis and Other Thermal Processing, www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html,

Tabla 2-31. Características químico físicas del biobutanol

El biobutanol presenta algunas características que favorecen su uso respecto al bioetanol. En primer lugar, es menos corrosivo y genera problemas en las infraestructuras existentes para la distribución de la gasolina. En segundo lugar, su mezcla con los carburantes fósiles es óptima y las mezclas no incurren en la separación de las fases. Como resultado, el almacenamiento y la distribución del biobutanol son simplificadas. Frente a una densidad energética superior a la del bioetanol, el biobutanol evidencia valores más bajos por número de octano.

BIOCABURANTES SINTÉTICOS

Pertencen a esta categoría los hidrocarburos sintéticos o las mezclas de hidrocarburos sintéticos producidos a través de la biomasa. El proceso más conocido para la conversión energética de la biomasa lignocelulosa en biocarburantes líquidos es la síntesis de Fischer-Tropsch, que se usó en gran escala en Alemania durante la segunda guerra mundial. El



proceso Fischer-Tropsch comprende la gasificación de las biomásas lignocelulósicas, la purificación y el acondicionamiento del gas producido y la consiguiente conversión en biocarburantes líquidos. Los productos líquidos se constituyen por hidrocarburos de cadena lineal y no contienen compuestos del azufre, pudiendo ser convertidos en combustibles para el sector transporte. El diésel Fischer-Tropsch puede producirse directamente, pero se obtienen rendimientos más elevados si se pasa por un producto intermedio que es sucesivamente transformado a través de un proceso de hidrólisis. Este diésel tiene características parecidas al diésel de origen fósil, en cuanto a poder calorífico inferior, densidad y viscosidad y puede sustituir este carburante en los motores de ciclo Diésel.

Características	Diesel Fischer-Tropsch *
Poder calorífico inferior (PCI) (MJ/kg)	42,9
Número de cetano	74
Flash-point (C°)	315
Densidad [kg/m3]	770
Estado	líquido
Aspecto	líquido

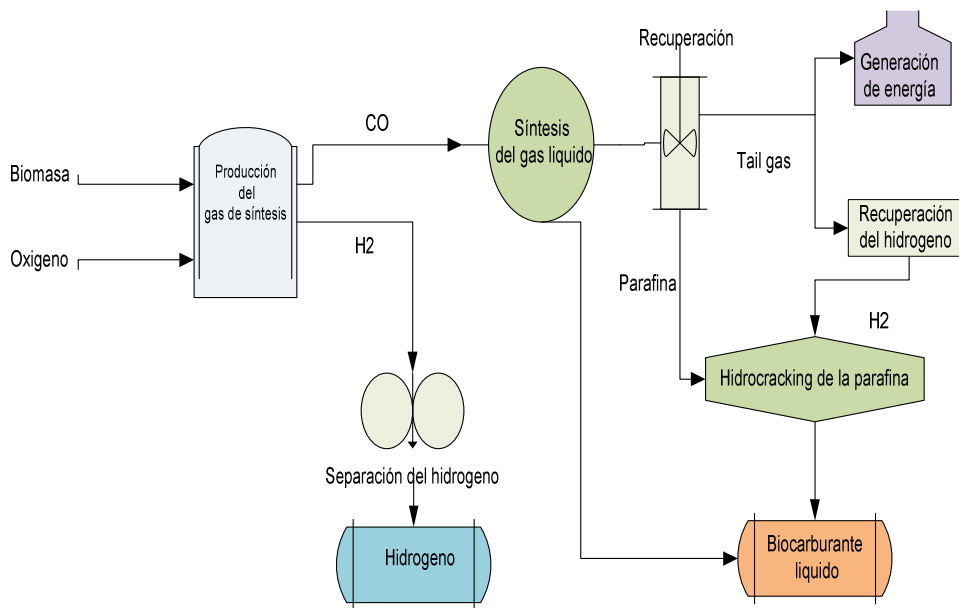
*Valor medio

Fuente: Hamelinck C.N., 'Outlook for advanced biofuels', <http://iqitur-archive.library.uu.nl/dissertations/2005-0209-113022/contents.pdf>, Michael. J. Murphy, 'Compendium of Experimental Cetane Number Data', National Renewable Energy, Laboratory (NREL), www.nrel.gov, www.biofuels-summit.com. Biomass Program: Pyrolysis and Other Thermal Processing, www1.eere.energy.gov/biomass/pyrolysis.html, CIEMAT
 Tabla 2-32. Características químico físicas del diésel Fischer-Tropsch

En algunas características el diésel de síntesis presenta un comportamiento mejor que el gasoil: el número de cetano es más alto y el contenido de compuestos aromáticos es inferior, lo cual genera menores emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno. El gasoil fósil y el biocarburante sintético pueden estar en mezcla en cualquier proporción sin la necesidad de aportar modificación alguna tanto en los motores como en las infraestructuras de distribución.

Los principales temas de investigación en los años venideros para la producción de los biocarburantes sintéticos están en la purificación y el acondicionamiento de los gases de síntesis, el desarrollo de catalizadores y la valorización de subproductos para la producción de energía eléctrica, térmica o vapor.





Fuente: Elaboración propia
Gráfico 2-26. Esquema de procesos de la síntesis de Fischer-Tropsch

2.4 BIORREFINERÍAS

Las biorrefinerías son instalaciones altamente integradas en las que las diferentes materias primas (biomasas) se separan en componentes individuales para convertirlas en productos vendibles como energía, carburantes, productos químicos y/o productos de síntesis. Es decir, el concepto de biorrefinería es análogo a lo que representan hoy las refinerías tradicionales en las que se producen combustibles y productos derivados del petróleo crudo.

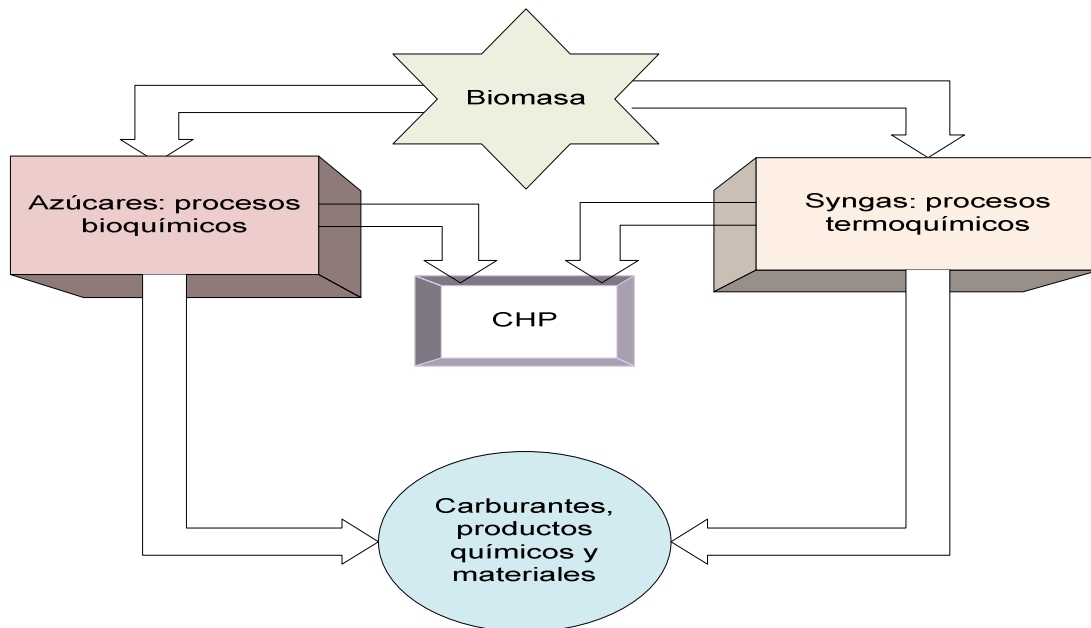
La diferente naturaleza en la composición de las biomasas exige la aplicación de una amplia gama de procesos, que van desde las operaciones termoquímicas tradicionales hasta las técnicas de bioprocesamiento. Sólo así será posible vender los adecuados volúmenes de productos requeridos en el mercado, crear economías de escala y proveer una amplia gama de productos químicos y líneas de producto a un coste competitivo.

La capacidad de desarrollar procesos y tecnologías económicamente viables capaces de aprovechar los diferentes tipos de azúcares presentes en las fracciones celulósicas y hemicelulósicas de las materias primas lignocelulósicas y transformarles en productos vendibles, es clave para el futuro desarrollo del concepto de biorrefinería. Para lograr economías de escala adecuadas y ser viable, una biorrefinería necesitaría procesar entre 5.000 y 10.000 toneladas de biomasa al día.

El concepto de biorrefinería se mueve hoy en día entre dos posibles directrices (ver **gráfico 2-26**):

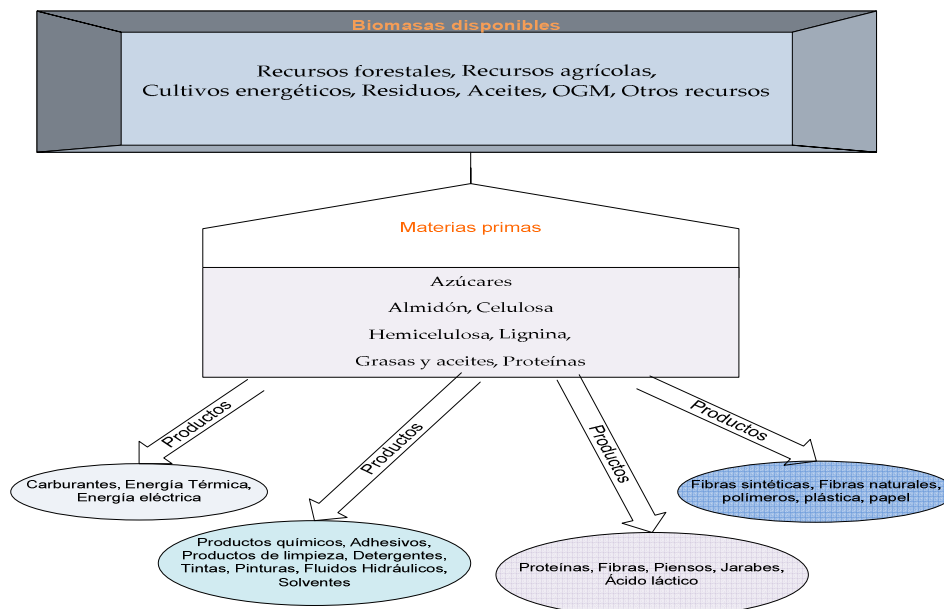
- La **vertiente zucarina**, que se basa en los procesos de conversión bioquímica y se focaliza en la fermentación de los azúcares extraídos de las biomasas.
- La **vertiente del syngas**, que se basa en los procesos de conversión termoquímica y se focaliza en la gasificación de la biomasa y de los subproductos de los procesos de transformación.





Fuente: Sergey Zinoviev y otros, 'Background Paper On Biofuel Production Technologies', International Centre for Science and High Technology, United Nations Industrial Development Organization, 2007, <http://www.biofuels-dubrovnik.org>.
 Gráfico 2-27. Esquema básico de una biorefinería

Los combustibles para el transporte representan, en potencia, el producto de más peso de las biorrefinerías. Sin embargo, también tienen capacidad para producir productos como fibras, energía, productos químicos, etcétera (ver gráfico 2-27).



Fuente: Sergey Zinoviev y otros, 'Background Paper On Biofuel Production Technologies', International Centre for Science and High Technology, United Nations Industrial Development Organization, 2007, <http://www.biofuels-dubrovnik.org>.
 Gráfico 2-28. Diversificación de producto en las biorefinerías



3 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE BIOCARBURANTES

La producción y el uso de los biocarburantes han entrado en una era de crecimiento global y está experimentando una fuerte aceleración, tanto en lo que a la dimensión de la industria se refiere como en el número de países implicados. Así lo demuestran, por ejemplo, el desarrollo de nuevas y más eficientes tecnologías de transformación o la introducción de nuevas políticas nacionales de fomento de los biocarburantes.

También las tendencias actuales en la producción de biocarburantes indican ese crecimiento. La producción de biodiésel de EEUU, preferentemente procedente de soja, fue de 1,9 millones de litros (500.000 galones) en 1995; para 2005, la producción alcanzó los 284 millones de litros (75 millones de galones); y en 2006 se triplicó, alcanzando los 852 millones de litros (224 millones de galones). A mediados de 2006, la capacidad de producción de biodiésel de EEUU estuvo cerca de alcanzar los 1,2 billones de litros por año procedente de 42 plantas y alcanzará los más de 400 millones de litros por año de capacidad adicional debido a 21 nuevas plantas que están en construcción.

La razón del creciente interés de los gobiernos por los biocombustibles se debe buscar en la necesidad de encontrar nuevos mercados para los productos de los agricultores y en la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El bioetanol y el biodiésel son los dos biocarburantes que dominan hoy en día los mercados mundiales. El bioetanol representa en torno al 85% de la producción total de biocarburantes y el biodiésel el 15% restante. La producción mundial de bioetanol se ha triplicado entre 2000 y 2007. La de biodiésel se ha multiplicado casi por cinco. A pesar de los incrementos, los biocarburantes representan sólo el 3% de la oferta de combustibles para el sector transporte. El bioetanol se produce y consume en gran medida en Brasil y América del Norte, mientras que Europa es líder mundial en producción de biodiésel.

Las **Tablas 2-33 y 2-34** muestran la producción de etanol y biodiésel en 2009 repartida por países.

EEUU y Brasil fueron ese año los principales productores de etanol. Más de la mitad del etanol producido a nivel mundial procedía de EEUU en 2009, de cosechas de grano procedentes del norte y representando del 2-3% del combustible no-diésel del país. Más del 36% del aporte de bioetanol global fue producido en Brasil en 2009, donde la caña de azúcar, que crece mayormente en la región centro-sur del país, aporta el 40% del combustible no-diésel del país. La práctica totalidad del bioetanol restante proviene de la Unión Europea - donde España, Suecia, Francia y Alemania son los mayores productores y utilizan cereales y remolacha azucarera, China - utiliza maíz, trigo y caña de azúcar como materia prima para producir una gran cantidad de etanol destinado a uso industrial - y Canadá.

Europa ha sido el líder mundial indiscutible en la producción de biodiésel a nivel global. El biodiésel ha tenido un crecimiento similar en la mayor parte de Europa. Este combustible ocupaba en 2009 más del 70% de la producción europea total de biocarburantes, alcanzando el 50% de toda la producción mundial de biodiésel. El biodiésel procede principalmente del aceite de colza y de las semillas de girasol, por lo que se refiere a la producción europea, de la soja, en el caso de EEUU y del aceite de palma -o del aceite de palma fraccionado (kernel)- en el caso de los dos países productores emergentes: Indonesia y Malasia.



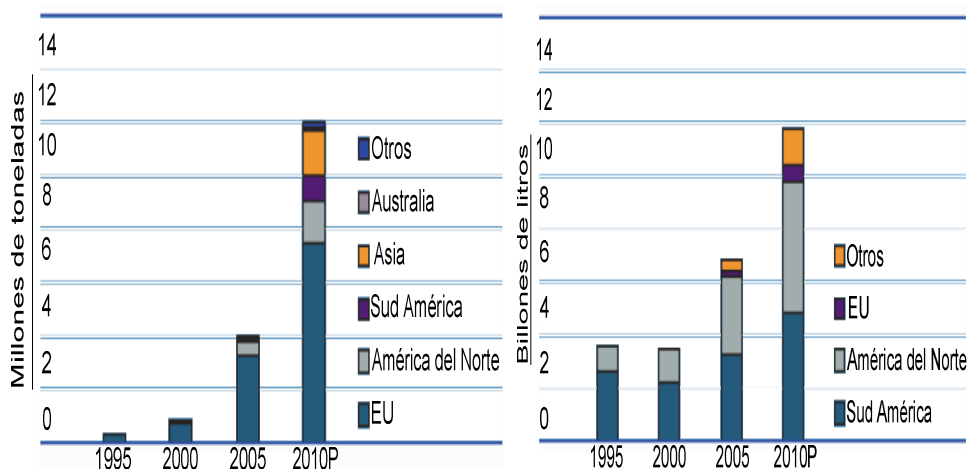
PAIS	PRODUCCIÓN ANUAL DE BIOETANOL 2009 (m ³ x 1.000)	%
EEUU	40.600	56%
BRASIL	23.920	33%
UE	3.594	5%
CHINA	2.050	3%
CANADÁ	1.000	1%
TAILANDIA	395	1%
COLOMBIA	327	0%
OTROS	940	1%
	72.826	

Fuente: Eurostat 2010
 Tabla 2-33. Producción mundial de etanol, 2009

PAIS	PRODUCCIÓN ANUAL DE BODIESEL 2009 (m ³ x 1.000)	%
UE	8.964	54%
EEUU	2.125	13%
BRASIL	1.591	10%
ARGENTINA	1.477	9%
INDONESIA	398	2%
MALASIA	273	2%
OTROS	1.792	11%
	16.619	

Fuente: Eurostat 2010
 Tabla 2-34. Producción mundial de biodiesel, 2009

El **gráfico 2-29** muestra la producción mundial actual y prevista de bioetanol (izquierda) y biodiésel (derecha).



Fuente: EuropaBio, 2007
 Gráfico 2-29. Producción total de bioetanol y de biodiésel 1995-2010* (*estimada)



Se estima en 2010 la producción mundial de bioetanol sea el doble que la de 2005. La producción mundial de biodiésel podría llegar a triplicarse en ese mismo espacio temporal. Es muy probable que los cultivos agrícolas tradicionales continúen siendo la principal fuente de la materia prima usada en el sector, por lo que gran parte de ese incremento se logrará con tecnologías y materiales de primera generación. Los biocarburantes de segunda generación se integrarán como producto comercializable en el mercado de los biocarburantes a partir de 2010.

3.1 BRASIL

Brasil es la primera economía que ha logrado un uso sostenible del etanol y el país es considerado, por tanto, el modelo a seguir por otros países.

BIOETANOL

Sus fábricas de etanol mantienen un balance energético positivo, al quemar la parte que no produce azúcar de la caña. La productividad energética en Brasil es ocho veces mayor que en EE.UU. La productividad por hectárea es más del doble: mientras en Estados Unidos se producen 3.000 litros de etanol por hectárea de maíz, en Brasil se producen 7.500 litros por hectárea de caña de azúcar. Mientras que Estados Unidos destina un 3,7% de sus tierras cultivables a producir etanol, Brasil destina sólo el 1%. Las áreas donde se cultiva mayoritariamente la caña de azúcar se concentran en el estado de São Paulo, a poco más de 2.500 kilómetros de la selva amazónica.

La producción de etanol en 2009 fue de 239 millones de hectolitros, frente los 224 millones de hectolitros de 2007. El consumo interno en 2008 fue de 192 millones de hectolitros, lo que convirtió a Brasil en un país exportador de bioetanol. Se prevé que en 2010 continúe esta tendencia, ya que el consumo interno previsto para 2010 es de 224 millones de hectolitros.

La caña de azúcar es la materia prima que se utiliza en Brasil para producir etanol. Las limitaciones a las exportaciones de azúcares a nivel mundial y el incremento de la demanda de etanol tanto a nivel doméstico como en los mercados internacionales, han hecho que el uso de la caña de azúcar para la producción de bioetanol haya ido incrementando año tras año. Se estima que la producción de caña de azúcar en 2008 será de 550 millones de toneladas métricas, de las que el 58% se utilizarán para producir etanol. En 2007 se emplearon para generar etanol el 54,5% de las 491,1 millones de toneladas métricas de caña de azúcar producidas.

BIODIÉSEL

Brasil puso en marcha en 2003 un **programa de desarrollo de biodiésel**. Y en 2008 el gobierno introdujo el objetivo de que el 2% del total del combustible del sector transporte sea biodiésel (el porcentaje deberá ser del 3% en 2009 y del 5% en 2013). Puesto que el principal aceite vegetal utilizado para la producción de biodiésel se obtiene de la **soja**⁵, se estima que para lograr el objetivo del 2% habrá que producir 850 millones de litros de biodiésel y serán necesarias 3,5 millones de toneladas de soja. Cuando la mezcla obligatoria del 3% se haga efectiva, la demanda anual de biodiésel será de 1,2 mil millones de litros.

⁵ El biodiésel producido a partir de soja es casi tres veces más barato que el fabricado a partir del ricino.



Actualmente existen 51 plantas de producción de biodiésel autorizadas por la Agencia Nacional de Petróleo (ANP). La mayoría de ellas está instalada en áreas donde hay soja o infraestructura de transporte para recibirla. Además de esas, la ANP está evaluando proyectos de otras 50 fábricas (16 proyectos en Mato Grosso, 7 en São Paulo, 5 en Paraná, 4 en Rio de Janeiro y en Mato Grosso do Sul, 2 en Bahía, en Tocantins, en Ceará y en Rio Grande do Sul, y 1 en Rondônia, Rio Grande do Norte, Goiás, Sergipe, Maranhão y Santa Catarina). Una vez terminadas, la capacidad instalada de producción pasará de los actuales 2,5 mil millones de litros anuales a más de 4 mil millones de litros anuales.

3.2 CANADÁ

BIOETANOL

El gobierno canadiense inició un programa para la expansión del etanol⁶ en agosto de 2003, como parte de su estrategia de lucha contra el cambio climático. En 2009, la producción de bioetanol fue de 10 millones de hectolitros. La siguiente tabla muestra la capacidad productiva actual y prevista de bioetanol. Se puede ver que la capacidad actual es de 11 millones de hectolitros y que la construcción de las cinco plantas en proyecto sumará 6 millones de hectolitros adicionales. Las plantas actuales y previstas utilizan trigo y maíz como materia prima.

Nombre de la planta	Ciudad	Materias primas	Capacidad (millones de litros)
Permolex	Red Deer	trigo	40
Husky Energy	Lloydminster	trigo	130
Terra Grain Fuels *	Belle Plaine	trigo	150
Poundmaker	Lanigan	trigo	12
NorAmera Bioenergy	Weyburn	trigo	25
Husky Energy	Minnedosa	trigo	130
Iogen	Ottawa	paja de trigo	2
IGPC *	Aylmer	maíz	150
Greenfield Ethanol	Hensall	maíz	200
Greenfield Ethanol	Tiverton	maíz	26
Greenfield Ethanol	Chatham	maíz	150
Collingwood Ethanol *	Collingwood	maíz	50
Suncor Energy	St. Clair	maíz	200
Greenfield Ethanol *	Johnstown	maíz	200
Greenfield Ethanol	Varennes	maíz	130
North West Bio-Energy *	Unity	trigo	25

* Plantas en construcción

Fuente: Centre for Research in the Economics of Agrifood (CREA),
 Tabla 2-35. Plantas de producción de bioetanol existentes y previstas a medio plazo

⁶ Ethanol Expansion Program



BIODIÉSEL

La producción de biodiésel en 2009 estuvo cercana a 1 millón de hectolitros, que se obtuvo a partir de grasas animales y aceites vegetales. A medio plazo está prevista la construcción de una macro planta de producción de biodiésel a partir de semillas de colza con una capacidad de 2,25 millones de hectolitros.

Nombre de la planta	Ciudad	Materias primas	Capacidad (millones de litros)
Milligan BioTech	Foam Lake	aceite de colza	1
BIOX	Hamilton	sebo	66
Rothsay	Montreal	grasas animales	30
Canadian Bioenergy *	Sturgeon County	colza	225

* Plantas en construcción

*Fuente: Centre for Research in the Economics of Agrifood (CREA),
 Tabla 2-36. Plantas de producción de biodiésel existentes y previstas a medio plazo*

La producción de oleaginosas (colza, soja y girasol, principalmente) alcanzará en 2010 las 12,5 Mt que representa un incremento del 9% respecto al año anterior (11,5 Mt), debido principalmente a un incremento de producción de colza (+9%) y soja (+12). Para la producción de girasol, la cual representa una pequeña parte del total de la producción de oleaginosas, se prevé un decrecimiento del 26% respecto a los niveles del 2007.

3.3 CHINA

BIOETANOL

En 2001 el gobierno chino lanzó el Plan Nacional de Fomento del Bioetanol con el objetivo de distribuir la mezcla E10 en nueve provincias del país. Según el Plan, la producción de bioetanol en 2010 tendría que ser de 300.000 toneladas y aumentar hasta 2 millones de toneladas en 2020. La mezcla E10 tendría que extenderse en casi todas las provincias en 2010 y las mezclas E20, E85, B5 y B20 tendrían que introducirse a nivel general en 2020. En la actualidad, la mezcla E10 se usa en 10 provincias del país y un total de 20.000 gasolineras (sobre las 85.000 existentes). En general, la mezcla E10 representa el 20% del consumo nacional de gasolina.

El mismo plan hace referencia explícita a la necesidad de desarrollar tecnologías de producción de los biocarburantes que usen culturas que no compitan con los terrenos agrícolas, que no usen materias primas que compitan con la producción de alimentos y que no dañen el medio ambiente. Por esta razón, se priman aquellos proyectos que no utilicen cereales como materia prima y que aprovechen las plantaciones de cultivos no aptos para la alimentación.

China es el tercer país productor de etanol, pero gran cantidad del etanol producido es consumido por la industria farmacéutica y la industria de fabricación de bebidas. En 2006 había cuatro refinerías de bioetanol operativas que producían cerca de 1,02 millones de toneladas. En 2007 entraron en funcionamiento cuatro nuevas plantas de producción en las provincias de Guangxi (110.000 toneladas), Hebei (300,000 toneladas), Liaoning (300.000 toneladas), y Hubei (200.000 toneladas). Con estas nuevas plantas, la producción en 2007 alcanzó los 1600 millones de litros. Alrededor del 80% de la producción de bioetanol usa el maíz como materia



prima. Cuatro de las productoras existentes (Heilongjiang, Jilin, Anhui y Henan) utilizan otros cereales como materia prima.

Las preocupaciones de las autoridades locales por la producción de alimentos, está haciendo que se desarrolle el uso de materias primas diferentes como la colza, el sorgo dulce y las patatas dulces. Se calcula que existen en la actualidad 116 millones de hectáreas de tierras marginales que pueden ser utilizadas para los nuevos cultivos. China está al mismo tiempo empujando la transición de la producción de bioetanol a través de la biomasa lignocelulósica, en particular residuos de cereales y forestales. En la actualidad se estima una producción de estos tipos de residuos de 1.500 toneladas al año, suficientes para producir 370 millones de toneladas de etanol.

Además, la Corporación Nacional China de Cereales, Aceites y Alimentos (COFCO) ha invertido alrededor de 6,5 millones de dólares en la construcción de dos plantas piloto para la producción de bioetanol a partir de celulosa. Una planta estará tendrá una capacidad de producción de 5.000 toneladas y la podrá producir 10.000 toneladas.

Los principales países importadores del etanol chino son Japón, Corea y Singapur. En 2006 China ha exportado cerca de 500.000 toneladas de etanol debido sobre todo a un incremento de la demanda desde EEUU debido a supresión del MTBE en ese país.

BIODIÉSEL

El biodiésel tiene una trayectoria más reciente. En 2006 la producción fue de 30.000 toneladas procedentes de una docena de pequeñas industrias productoras, las más grandes de las cuales son Fujian Zuoyue New Energy Co., Sichuan Gusan Biodiésel Co., y Hainan Zhenghe Biodiésel Co. En 2007 pusieron en funcionamiento las plantas de producción de Shanghai, Fujian, Jiangsu, Anhui, Chongqing, Xinjiang y Guizhou, entre otros. Estas nuevas plantas, de capital privado - extranjero pero controladas por el estado, tienen en general una capacidad productiva mayor que las viejas (algunas alcanzan una producción de 600.000-750.000 toneladas al año). Gracias a estas nuevas plantas, la producción de biodiésel en 2007 fue de 113,2 millones de litros. En la actualidad, hay muchos proyectos de biodiésel en construcción o en fase de planificación cuya capacidad acumulada estimada es de más de 3 millones de toneladas al año.

Las materias primas representan un factor limitante en el desarrollo del biodiésel in China. Los aceites vegetales vírgenes no resultan económicamente viables en el contexto chino debido a que la mayor parte de los aceites son de importación se destinan a uso alimentario. Ante este panorama, las principales materias primas utilizadas son los aceites usados, los aceites ácidos y las grasas animales procedentes de la industria alimentaria china. Se estima que anualmente se producen en el país alrededor de 3 millones de toneladas de aceites y grasas usados.

Para la producción de biodiésel a largo plazo, China está apostando por materias primas provenientes de aceites no comestibles como las nueces de Barbados, el pistacho chino o la jatrofa (piñón manso). Este última abunda en el suroeste del país (Sichuan, Yunnan, Guizhou, etc.), pero su uso para estos fines podría tener graves consecuencias ambientales debido a que esas áreas contienen zonas ecológicamente muy valiosas y de elasticidad y resiliencia muy bajas.

No existen estadísticas oficiales sobre el comercio de biodiésel pero se estima que las exportaciones han alcanzado las 10.000 toneladas en 2006. Las importaciones provienen sobre todo desde Indonesia y Malasia, desde las cuales China importa sobre todo aceite de palma.



En 2007 las importaciones de esta materia prima han disminuido debido al incremento de precios experimentado por el aceite de palma.

3.4 INDIA

Desde hace algunos años, el gobierno indio está promoviendo activamente la producción de biocarburantes en general y de bioetanol en particular. El crecimiento económico del país y la elevada demanda doméstica de carburantes, convertirán a India en el medio-largo plazo en un país importador de carburantes. Por esta razón, la diversificación de carburantes es una prioridad del gobierno nacional.

BIOETANOL

La producción de bioetanol en 2009 fue superior a 4 millones de hectolitros, obtiene principalmente de la melaza de la caña de azúcar. Actualmente, hay más de 5 millones de hectáreas de cultivo de caña de azúcar en el país y se prevé que esta superficie aumente en los próximos años.

BIODIÉSEL

La producción de biodiesel es relativamente nueva en el país y todavía no es comercialmente viable. En la actualidad el biodiesel se produce en plantas piloto, pero existen interesantes iniciativas de colaboración público-privadas que prevén la puesta en marcha de plantas de producción a gran escala.

El biodiesel se produce sobre todo a partir de la jathropa y de aceite de palma importado. En 2009, la producción de biodiesel fue de sido de 450.000 hectolitros. Para el 2020 está prevista la introducción de la mezcla B20 en el gasoil, lo que supondría una necesidad de nuevas tierras de cultivo de alrededor 40 millones de hectáreas. Se estima que en el país existen 55,3 millones de hectáreas de tierras marginales que pueden ser usadas para los cultivos energéticos de oleaginosas, particularmente la jathropa y la pongamia. La disponibilidad de estas tierras marginales choca con la no clara definición de los derechos de propiedad sobre esas tierras y con el hecho de que a día de hoy no se ha comprobado la rentabilidad a medio-largo plazo del cultivo de jathropa en suelos degradados.

3.5 INDONESIA

Indonesia está apostando de manera decidida en el desarrollo de los biocombustibles los cuales son vistos como una oportunidad para acelerar el desarrollo económico del país, disminuir la pobreza y crear empleo y al mismo tiempo mitigar la producción de gases efecto invernadero.

BIOETANOL

La producción de etanol alcanzó en 2009 los 1,4 millones de hectolitros, frente a unas previsiones de producción de 3,77 millones de hectolitros para el 2010. En la siguiente tabla se muestran las plantas de bioetanol en funcionamiento y en construcción - previstas dentro del plan de fomento de los biocombustibles para 2010



Nombre de la planta	Ciudad	Materias primas	Capacidad (millones de litros)
Salam Group	Sumsel	caña de azúcar	70
BPPT	Lampung	tapioca	2,5
Sungai Budi	Lampung	tapioca	120
Sugar Group	Lampung, Sumsel, Kalimantan	caña de azúcar	500
Wilamar Group	Lampung, Sumsel	caña de azúcar	70
Molindo	Lampung, Jatim	tapioca	150
Sampurna	Madiun, Pawosan	tapioca	800
Medco	Lampung, Jabar, Kalimantan	tapioca	270
EN3 Korea	Suisel	tapioca	180
Angel Product	Sultra	caña de azúcar	10
Sorini Tbk	Sultra	tapioca	200
Satria Brozeoak	Kalimatan	caña de azúcar	300
Mitsui PETROBRAS	Papúa, Kalimantan	caña de azúcar	500
Bioethanol Skala	Jabar, Katim, Sulut	mixto	600
RNI PTPN	Sumut, Lampung, Suisel, Jawa	tapioca	200

* Plantas en construcción

Feunte: US Department of Agriculture (USDA), Ministry Of Energy And Mineral Resources Republic Of Indonesia
Tabla 2-37. Refinerías de bioetanol en funcionamiento y en construcción en Indonesia

En la actualidad, la gran mayoría del bioetanol se produce con la melaza de la caña de azúcar. En el país hay alrededor de 5,5 millones de acres dedicadas a la producción de caña de azúcar y muchas compañías están expandiendo su producción.

Indonesia está entre los 10 países con mayor producción de caña de azúcar, con una producción de cerca 30 millones de toneladas por año. La producción de tapioca está en plena fase de expansión y, en 2007, han sido plantados 52.195 ha de esta planta, con lo cual la superficie total de tapioca alcanza los 782.000 ha en 2008. En Indonesia una tonelada de melaza produce alrededor de 250 litros de etanol, y una tonelada de tapioca alrededor de 155 litros.

El principal mercado de exportación para el bioetanol es Japón, aunque en el futuro, debido a la creciente demanda interna, estas exportaciones podrán disminuir considerablemente.

BIODIÉSEL

La producción de biodiésel en 2009 alcanzó 39,8 millones de hectolitros. Se estima que en 2010 alcance los 55,7 millones de hectolitros. La siguiente tabla muestran las plantas de biodiésel existentes y en construcción - previstas dentro del plan de fomento de los biocombustibles para 2010.



Nombre de la planta	Ciudad	Materias primas	Capacidad (millones de litros)
Petarmina	Dumai, Balogan, Balikpapan	aceite de palma, aceite de coco	500
Wilmar Group	Dumai, Sumatra	aceite de palma	1.000,0
Sinarmas	Dumai	aceite de palma	400
Bakrie Idofood	Sumatra, Jawa	aceite de palma	600
PT. Indo Biofuels Energy	Merak	aceite de palma, aceite de coco	260
BPPT	Jakarta	CPO	6
Sumiasih	Bekasi, Lampung	jatropa, aceite de coco	100
PTPN 4 y Ganesha	Medan	aceite de palma	4
Wilamar Group	Dumai	CPO	990
Platinum	Serang	jatropa, aceite de coco	20
Eterindo	Gresik, Tangerang	aceite de palma, aceite de coco	240
Sweden Bioenergy	ND	aceite de palma	350
Dharmex	ND	CPO	100

Feunte: *US Department of Agriculture (USDA), Ministry Of Energy And Mineral Resources Republic Of Indonesia*
 Tabla 2-38. Plantas de biodiésel en funcionamiento y en construcción en Indonesia

La principal materia prima para la producción de biodiésel es el aceite de palma (CPO). En 2007, Indonesia adelantó a Malasia como país líder en la producción de aceite de palma⁷. Se estima que la producción de CPO en Indonesia en 2007 fue de 17,4 millones de toneladas, frente a las 15,9 millones de toneladas de 2006.

Otras materias primas que se podrían utilizar para la producción de biodiésel son el aceite de coco y la jathropa. La producción de aceite de coco fue de 880.000 toneladas en 2006, de las que cerca de 500.000 toneladas fueron exportadas. El uso de la jathropa está en fase de desarrollo. Aunque las estimaciones sobre su rendimiento para la producción de biodiésel no son muy prometedoras, su utilización podría ayudar a eliminar el conflicto existente entre la producción de alimentos y la producción de carburantes.

Indonesia exporta pequeñas cantidades de biodiésel, sobre todo a China, UE y EEUU. El aceite de palma (CPO) es el principal producto de exportación. Las exportaciones han alcanzado la cantidad de 12,1 millones de toneladas en 2006 y de 13,2 millones de toneladas en 2007. En 2008 las exportaciones difícilmente alcanzarán las 14 millones de toneladas.

3.6 MALASIA

El crecimiento de los biocarburantes en Malasia depende del desarrollo de la industria de los cultivos palmáceos. De hecho, la grandísima producción nacional hace que el biodiésel se produzca casi exclusivamente a partir de aceite de palma. La dinámica de los biocarburantes está centrada.

⁷ Indonesia y Malasia producen conjuntamente el 87% del aceite de palma mundial.



BIOETANOL

Existe la opción de producir bioetanol a partir del material lignocelulósico de las palmas de aceite, pero la tecnología está aún en fase embrionaria y la dinámica de biocarburantes malasia está centrada en la creación de industrias rentables con las tecnologías existentes capaces de producir biodiésel.

BIODIÉSEL

En 2006 se diseñó la Política Nacional de Fomento de los Biocarburantes, con el fin de incentivar la producción de biodiésel con aceite de palma. Ese mismo año el gobierno promulgó un plan de fomento para las industrias productoras, que introduce la obligación de usar la mezcla B5 en el gasoil nacional a partir del 2008. Esta medida creará una demanda interna de biodiésel de 500.00 toneladas. Sin embargo, la medida ha sido retrasada debido al fuerte incremento en los precios del aceite de palma a nivel mundial.

En la actualidad existen 5 plantas en funcionamiento para la producción de biodiésel y el gobierno ha aprobado recientemente licencias para la construcción de 84 plantas adicionales. La subida de los precios del aceite de palma y las crecientes presiones ambientalistas⁸ han retrasado el inicio de las obras de construcción.

La producción de biodiésel en 2009 fue de 234.000 toneladas. Gran parte de este biodiésel se exporta a EEUU, UE y Japón debido a que en Malasia sólo un reducido número de vehículos gubernamentales es capaz de utilizar biodiésel. Para 2010, se estima que las exportaciones de biodiésel a Europa alcancen las 300-350 mil toneladas anuales.

La principal materia prima para la producción de biodiésel es el aceite de palma, cuyas plantaciones ocupan del 11% del territorio malasio (el 62% de las tierras arables). La producción de aceite de palma se ha más que duplicado en la última década, pasando de las 7,81 millones de toneladas en 1995 a las 16,5 millones de toneladas en 2006. Con las infraestructuras existentes en la actualidad, sólo es posible convertir en biodiésel 6 millones de toneladas de esa materia prima.

Malasia ha introducido un tipo de biodiésel denominado *Envo Diésel*, que consiste en una mezcla de 95% de gasoil de origen fósil y de un 5% de aceite de palma procesado (RBD). Este carburante, producido únicamente para el mercado interno, difiere del biodiésel usado en Europa (generalmente, B5) en cuanto que usa aceite de palma puro en vez de éster metílico. Para el mercado exterior, las industrias producen y comercializan biodiésel (éster metílico) generado a partir de aceite de palma y metanol.

3.7 TAILANDIA

Tailandia ha puesto en marcha una serie de estrategias para reducir la importación de carburantes de origen fósil, reducir las emisiones de CO₂ y sustituir al menos el 20% de los combustibles usados en el sector transporte del país con fuentes renovables como el bioetanol y biodiésel. Los biocarburantes se consideran una oportunidad de desarrollo para las zonas rurales del país y una oportunidad para el comercio.

⁸ La palma se encuentra generalmente en selvas tropicales de alto valor ecológico.



BIOETANOL

En 2009, la producción de etanol en Tailandia fue de alrededor de 3,9 millones de hectolitros.

Plantas operativas Agosto 2011	localización	capacidad(l/d)	materia prima
PawnWiLai Inter Group Trading	Ayuddhya	25.000	Melaza
Thai Agro Energy	Suphanburi	150.000	Melaza
Thai Alcohol	NakornPathom	200.000	Melaza
Khon Kaen Alcohol	Khon Kaen	150.000	Melaza
ThaiNguan Ethanol	Khon Kaen	130.000	Yuca
Thai Sugar Ethanol	Kanchanaburi	100.000	Melaza
KI Ethanol	Nakorn Ratchsima	100.000	Melaza
Petro Green (Kanlaseen)	Kanlaseen	200.000	Melaza
Petro Green (Chaiyapoom)	Chaiyapoom	200.000	Melaza
EkrathPattana	Nakorn Swan	200.000	Melaza
ThaiRungRueng Energy	Saraburi	120.000	Melaza
Ratchburi Ethanol	Ratchburi	150.000	Yuca
ES Power	Sakaew	150.000	Melaza
Maesawd Clean Energy	Tak	200.000	Caña de azúcar
SupThip	Lopburi	200.000	Yuca
TaiPing Ethanol	Sakaew	150.000	Yuca
PSB Starch Production	Chonburi	150.000	Yuca
Petro Green (DanChang)	Suphanburi	200.000	Melaza
Khon Kaen Alcohol (Boh Ploy)	Kanchanaburi	150.000	Melaza
Capacidad de producción total		2.925.000	

Fuente: elaboración propia www.dede.go.th

Tabla 2-39. Refinerías de bioetanol en funcionamiento en Tailandia

Alrededor del 90% del etanol producido en Tailandia usa la melaza de caña como materia prima. El restante 10% usa Yuca. La proporción es destinada a inclinarse a favor de la tapioca. La producción de melaza se estima incrementa a las 3 millones de toneladas, la mitad de la cual será utilizada en la industria alimentaria y el resto será destinado a la exportación o la producción de bioetanol. La producción de tapioca ha sido de 22,5 millones de toneladas en 2006 y de 27 millones de toneladas en 2008 de las cuales 2 millones de toneladas han sido destinadas a la producción de bioetanol.

BIODIÉSEL

En 2010, la producción de biodiésel alcanzó los 2 millones de hectolitros.

La principal materia prima para la producción de biodiésel en Tailandia es el aceite de palma, del que Tailandia es el tercer productor mundial detrás de Malasia e Indonesia. El total de aceite producido es de 1,4 millones de toneladas, de las que 800.000 han ido para a la industria alimentaria. De las restantes 500.000 toneladas, 420.000 se han destinado a la producción de biodiésel. En el futuro, serán necesarias como mínimo 600.000 toneladas para satisfacer la demanda de la mezcla B5 exigidas por el Gobierno.

El plan de fomento del aceite de palma prevé la ampliación de las áreas cultivadas con palmas de aceite de 400.00 ha en los próximos cinco años. Algunas de las plantas presentes en



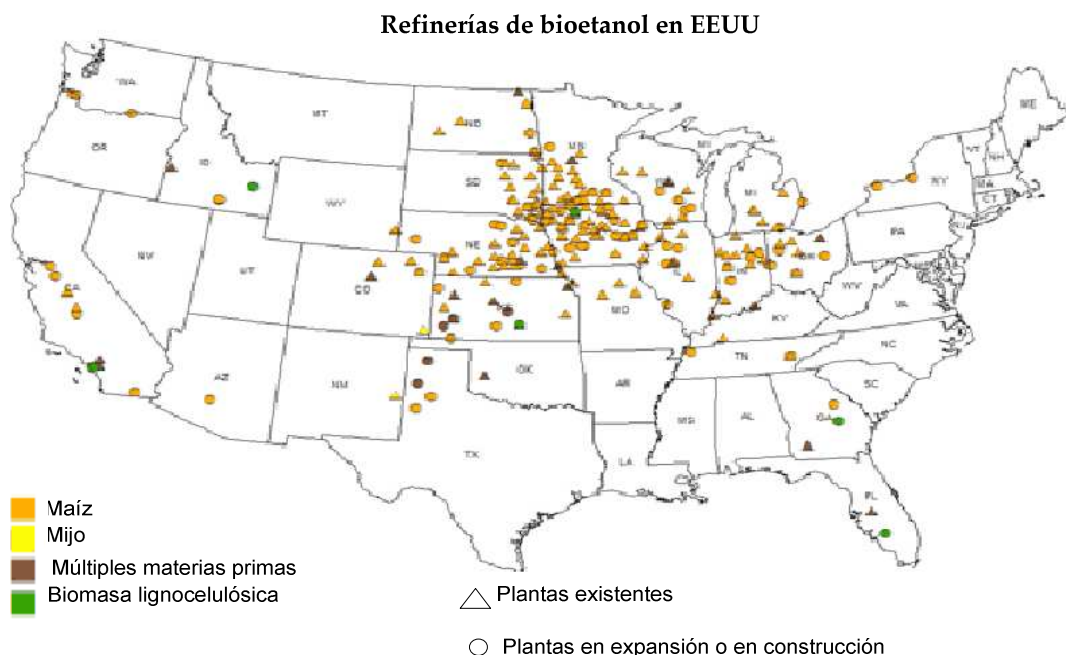
Tailandia usan como materia prima aceites usados y otras plantas como la jatrofa. Este última puede tener un desarrollo muy prometedor en el país y en la actualidad es en fase de construcción una planta experimental de biodiésel de jatrofa.

3.8 ESTADOS UNIDOS

BIOETANOL

La producción anual de etanol ha crecido de forma significativa y constante desde el 1970, hasta alcanzar la cantidad de 40.000 millones de litros en 2009.

El siguiente gráfico muestra las refinerías de bioetanol en funcionamiento y en construcción en EEUU. En diciembre 2007 había 135 plantas operativas, con una capacidad de producción de más de 280 millones de hectolitros al año⁹. Otras 74 plantas, con capacidad para producir 230 millones de hectolitros, estaban en construcción o en fase de expansión. Existen 6 plantas comerciales de bioetanol producido con biomasa lignocelulósica en fase de construcción. Cuatro de ellas (*BlueFire Ethanol Inc.*, *Broin Companies*, *logen Biorefinery Partners*, y *Abengoa Bioenergy*) emplearán un proceso de conversión bioquímico. Las dos restantes (*Range Fuels* y *ALICO Inc.*) producirán etanol vía conversión termo-química. Cuando estas plantas estén en plena operatividad, se espera una producción de bioetanol de cerca de 5 millones de hectolitros/año.



Fuente: US Department of Agriculture (USDA)

La práctica totalidad del etanol estadounidense se produce con maíz. Según estimaciones del departamento de agricultura estadounidense (USDA), en 2008 el 30% del maíz cosechado en el país se destinará a la producción de etanol. La producción de etanol ha acarreado también el incremento en la demanda de cereales como el sorgo y el mijo. La producción de etanol empleaba en 2008 el 26% de la producción nacional de sorgo y mijo.

⁹ Fuente: 'Renewable Fuels Association'



Dadas las problemáticas relacionadas con el incremento de los precios de los alimentos base, la política de desarrollo a medio-largo plazo para los biocarburantes en EEUU se está focalizando en la producción de etano a través de la biomasa lignocelulósica. Algunos estudios sugieren que, dentro de la primera mitad del siglo, EEUU puedan llegar a procesar, de forma viable, 1.180 millones de toneladas de biomasa no alimentaria por año, suficiente para sustituir alrededor del 30% de consumo actual de petróleo.

Las mezclas de gasolinas con bajos niveles de etanol se venden en todos los estados. Más de un tercio de la gasolina comercializada contiene mezcla E10. El etanol se usa en altos niveles de mezcla, E85, en los nuevos vehículos que permiten esta mezcla. Según la asociación de productores de combustibles renovables (RFA), se consuman en la actualidad más de 190 millones de litros de mezcla E85 en el país.

En la actualidad, hay más de 1600 estaciones de servicio en el país que distribuyen E85. Más de 6 millones de vehículos FFV, predispuestos para consumir gasolina normal o cualquier tipo de mezcla con etanol hasta un máximo del 85% (E85), están registrados.

La decisión de eliminar el MTBE de las mezclas de gasolina en 2006 ha determinado un incremento sin precedentes en la demanda de bioetanol. Sólo en 2006, EEUU importaron más de 2500 millones de litros de etanol. Hoy en día, EEUU son el primer país del mundo en cuanto a importación de bioetanol.

La siguiente tabla muestra los 7 principales países de los que EE.UU. importa bioetanol.

Importaciones de etanol en EEUU, 2007	
País	Total litros
Brasil	714.784.055
Jamaica	284.637.181
El Salvador	277.397.229
Trinidad y Tobago	161.783.019
Costa Rica	148.991.151
Canadá	20.374.994
China	5.560.179
Total	1.613.527.809

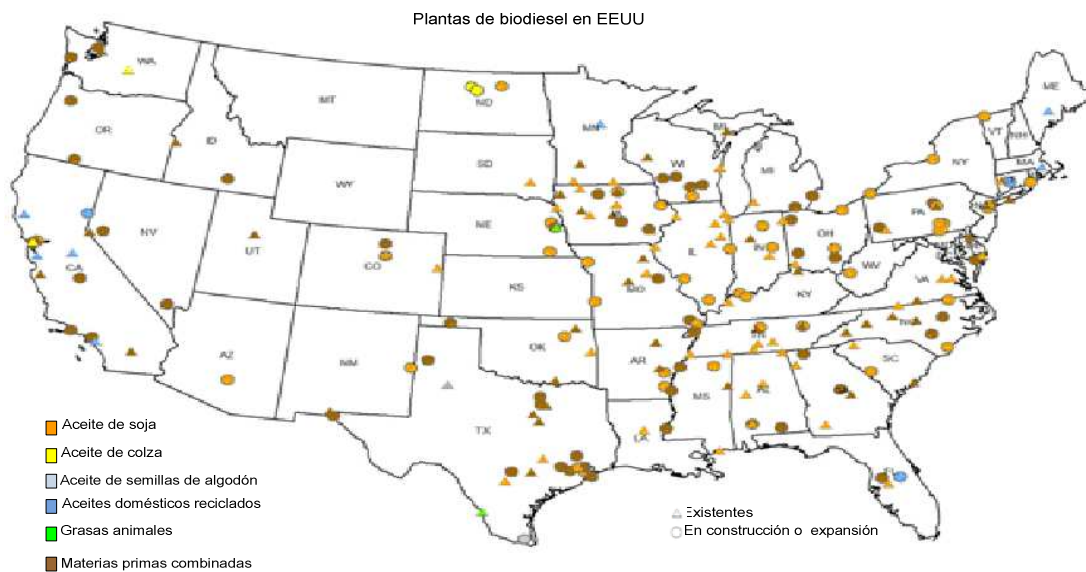
Fuente: US Department of Agriculture (USDA)



BIODIÉSEL

El biodiésel ha tenido un crecimiento mucho más tardío pero igual de dinámico, pasando de una producción prácticamente nula en el año 2000 a una producción de 2.125.000 m³ en 2009.

Existen en la actualidad 165 plantas de producción de biodiésel operativas, con una capacidad de producción total de 7.000 millones de litros¹⁰. Otras 84 plantas están en fase de expansión o construcción y cuando se concluyan podrán producir 5.000 millones de litros aproximadamente.



Fuente: US Department of Agriculture (USDA)
Gráfico 2-33. Plantas de biodiésel en funcionamiento y en construcción en EEUU

Alrededor del 90% del biodiésel producido en EEUU proviene de aceite de soja. En el medio plazo, más del 10% del aceite de soja producido en EEUU se utilizará para producir biodiésel.

La mezcla de biodiésel más común es la B20, pero niveles más bajos de mezcla, tales como la B2 y la B5, están entrando con fuerza en el mercado. Las mezclas con alto porcentaje de biodiésel, más que B20, se usan en la actualidad como carburantes en medios de transporte específicos, generalmente vehículos gubernamentales o flotas privadas especiales.

El país importa pequeñas cantidades de aceite de palma para producir biodiésel. En los próximos años se prevé una disminución en las importaciones de biocombustibles, debido a los incrementos de producción domésticos.

3.9 CONTEXTO EUROPEO

La producción de biocarburantes en Europa ha crecido de manera muy rápida en los últimos años. La tierra dedicada a los cultivos energéticos ha pasado de 0,3 millones hectáreas en 2004 a 2,8 millones hectáreas en 2007. Aún así, Europa está todavía lejos de llegar a los

¹⁰ Fuente: 'National Biodiésel Board'



objetivos establecidos en la directiva sobre biocarburantes, que establecía que en 2010 el 5,75% de la energía usada en el sector del transporte tenía que derivar de biocarburantes (2% en 2005).

BIOETANOL

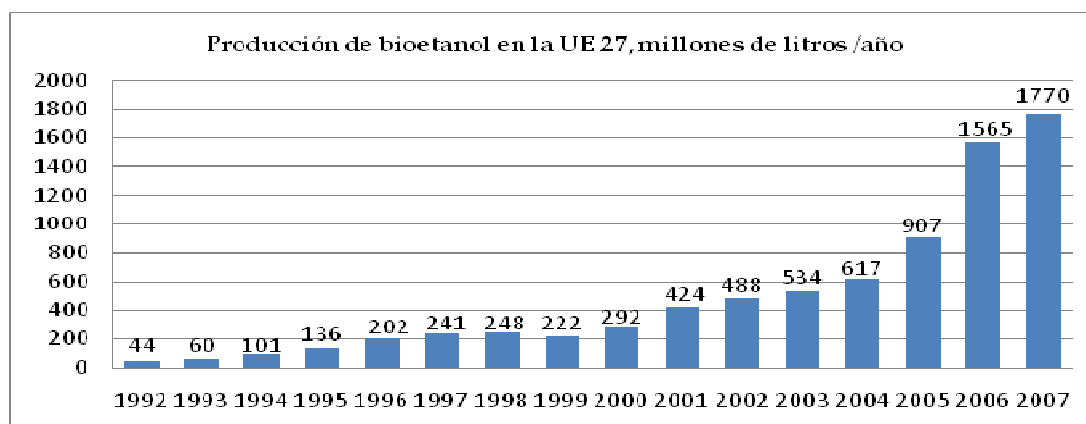
El desarrollo del etanol no ha tan importante como el del biodiesel en Europa, aunque esto está cambiando en los últimos años debido a que las empresas de automóviles europeas comienzan a desarrollar nuevos modelos optimizados para el mejor aprovechamiento del combustible vegetal en cuestión.

Hasta 2005, España fue el mayor productor de bioetanol de la UE. En 2006 el liderato pasó a Alemania y en 2007 fue Francia el principal productor europeo de bioetanol, manteniéndose así hasta la fecha actual.

PAIS	PRODUCCIÓN ANUAL DE BIOETANOL 2009 (m ³ x 1.000)	%
FRANCIA	1.040	29%
ALEMANIA	760	21%
ESPAÑA	500	14%
BÉLGICA	220	6%
AUSTRIA	175	5%
POLONIA	166	5%
SUECIA	160	4%
OTROS	573	16%
UNION EUROPEA	3.594	

Fuente: Euroobserve ' Biofuels Barometer 2010'. Elaboración propia

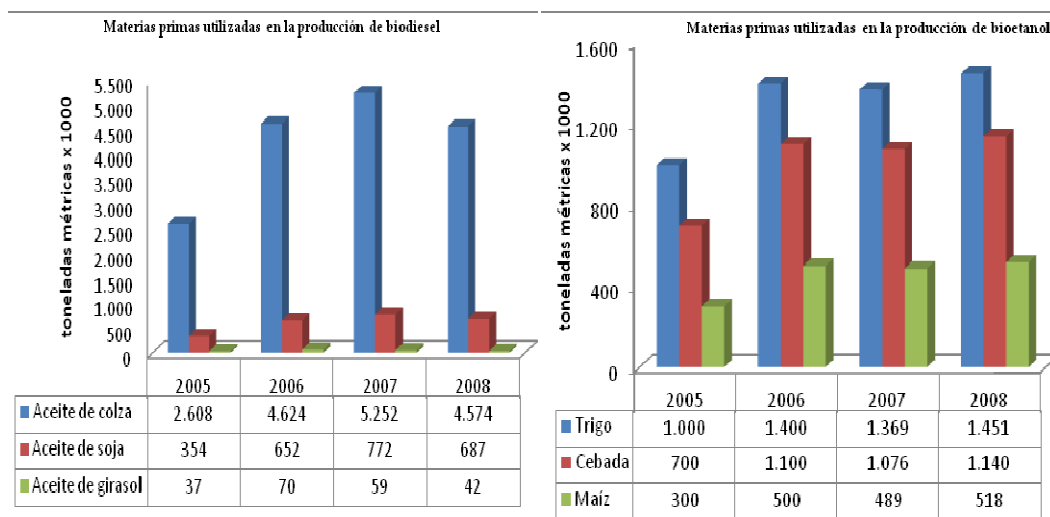
El bajo precio del bioetanol proveniente de Brasil y EEUU representa un límite al crecimiento de la producción en la EU, ya que resulta más rentable importar que producir internamente. Así lo demuestra el hecho de que en 2007 el 37% del consumo total europeo de biodiésel (1.000 de los 2.700 millones de litros) fuera de origen extranjero.



Fuente: Biofuels Platform, 2008. Elaboración Propia
 Gráfico 2-34. Evolución en la producción de bioetanol en la UE 27: 1992-2007



Para la producción de bioetanol se utilizan cereales como trigo (46% de la producción de bioetanol), cebada (26%) y, en menor proporción, maíz. El gráfico siguiente muestra la evolución en la utilización de las principales materias primas para la producción de biodiésel y bioetanol en la UE 27 en el período 2005-2008.



Fuente: Biofuels Platform, 2008. Elaboración Propia
Gráfico 2-35. Evolución en la utilización de las principales materias primas para la producción de biodiésel y bioetanol en la UE 27: 2005-2008

BIODIÉSEL

La UE es el mayor productor de biodiésel del mundo. La siguiente tabla muestra los principales países productores. Se puede ver que Alemania es el principal productor, seguido por Francia (1/3 de la producción de Alemania) e Italia (ocho veces menor que Alemania). En los últimos años, países como España, Portugal, Reino Unido y Holanda han experimentado un fuerte crecimiento en la producción de biodiésel.

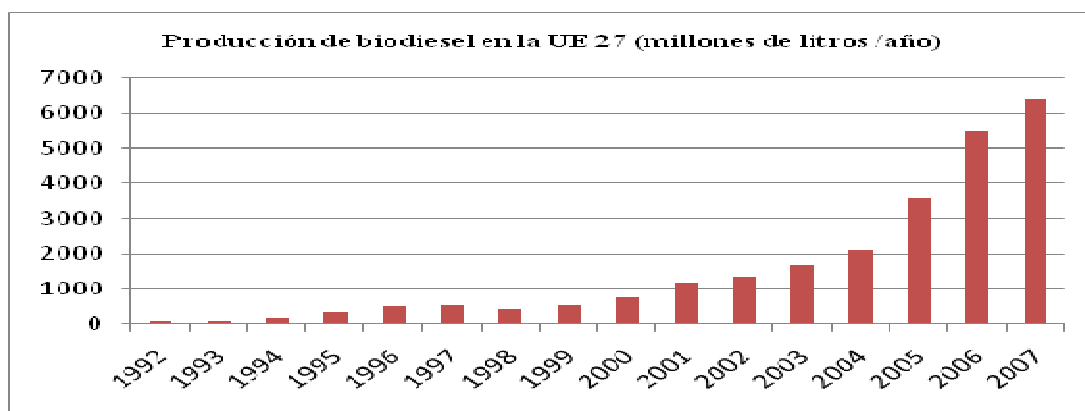
País	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Alemania	619	805	1.166	1.880	2.998	3.255
Francia	412	402	392	554	837	982
Italia	236	307	360	446	503	409
Austria	28	36	64	96	139	301
Portugal	0	0	0	1	102	197
España	0	7	15	82	111	189
Bélgica	0	0	0	1	28	187
Reino Unido	3	10	10	57	216	169
Grecia	0	0	0	3	47	113
Holanda	0	0	0	0	20	96
Otros	59	126	128	440	505	537
Total	1.357	1.693	2.135	3.560	5.506	6.435

Fuente: OECD; FAO; Euroobserve 'Biofuels Barometer 2008'. Elaboración propia
Tabla 2-44. Evolución en la producción de biodiésel por país: 2002-2007



PAIS	PRODUCCIÓN ANUAL DE BIODIESEL 2009 (m ³ x 1.000)	%
ALEMANIA	2.727	30%
FRANCIA	2.273	25%
ITALIA	648	7%
ESPAÑA	568	6%
REINO UNIDO	511	6%
POLONIA	341	4%
OTROS	1.895	21%
UNION EUROPEA	8.964	

La capacidad de producción para el biodiésel es más alta que la producción actual y muchos productores están operando en capacidad reducida como resultado de la distribución de cuotas.



Fuente: Biofuels Platform, 2008. Elaboración Propia
 Gráfico 2-36. Evolución en la producción de biodiésel en la UE 27: 1992-2007

El consumo de biodiésel ha sido cerca de 7400 millones de litros en 2007, lo que ha supuesto un volumen de importación de este carburante de 1000 millones de litros, alrededor del 15% de la producción. Para 2008 se prevé un incremento en la demanda total de biodiésel, un decremento en la producción interna de la UE y, por lo tanto, un incremento significativo en las importaciones de biodiésel.

Las principales materias primas en la producción de biodiésel son: los aceites de colza (86% de la producción de biodiésel en la UE), el aceite de soja (12,5%) y el aceite de girasol en menores proporciones.

4 MERCADO DE MATERIAS PRIMAS PARA PRODUCIR BIOCARBURANTES

En el capítulo de introducción dedicado a los biocarburantes, se ha hecho una primera aproximación sobre las materias las primas utilizadas. Aquí se especifican las dinámicas de mercado de las principales materias. El análisis se fija en las materias primas más representativas en las técnicas productivas de primera generación, ya que estas tecnologías representan la mayor parte de la producción de biocarburantes. Los datos de mercados de esta sección han sido tomados de estudios y estadísticas publicadas por OECD (*Organization for Economic Cooperation and Development*), FAO (*Food and Agriculture Organization*) y FAPRI (*Food and Agricultural Research Institute*).



4.1 TRIGO

Las existencias de trigo han llegado a su mínimo en 2007/08. Esto ha determinado la imposición de restricciones a la exportación por parte de algunos de los principales países exportadores como Argentina, China, Rusia y Ucrania.

Tanto los estudios de la FAPRI como los de la OECD-FAO, coinciden en prever un incremento de entre el 10% y el 13% en las proyecciones de producción, consumo y comercio de trigo en los próximos 10 años. El **gráfico 2-37** muestra la producción mundial de trigo actual y la prevista.

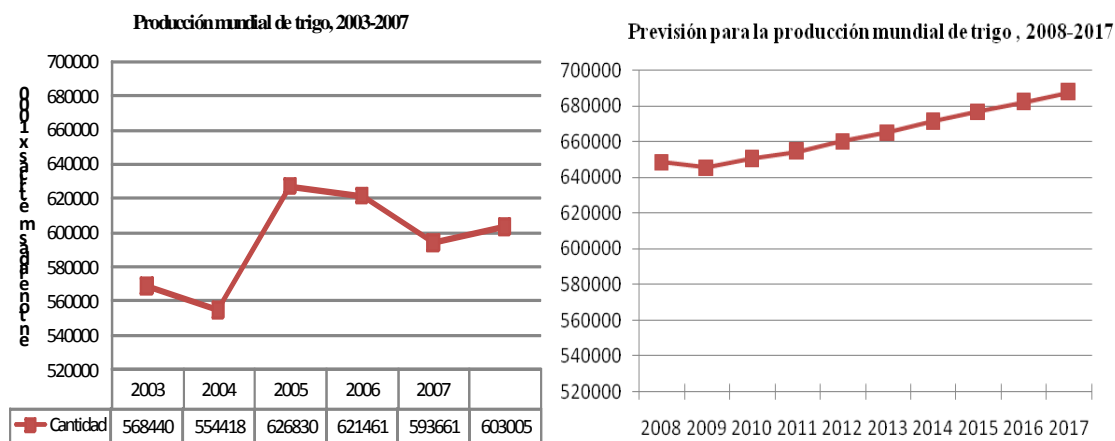


Gráfico 2-37. Producción mundial de trigo, valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

Este incremento en la producción llevará asociado un aumento de la superficie sembrada en los principales países productores (UE, Australia y EEUU), aunque el efecto a nivel mundial será una leve reducción de la superficie dedicada al cultivo de trigo (ver **gráfico 2-38**). Esta reducción en la superficie será posible gracias al incremento de la productividad por hectárea: de 2,92 toneladas por hectárea en 2008 a 3,12 toneladas por hectárea en 2017 (es decir, un incremento del 6,4%).

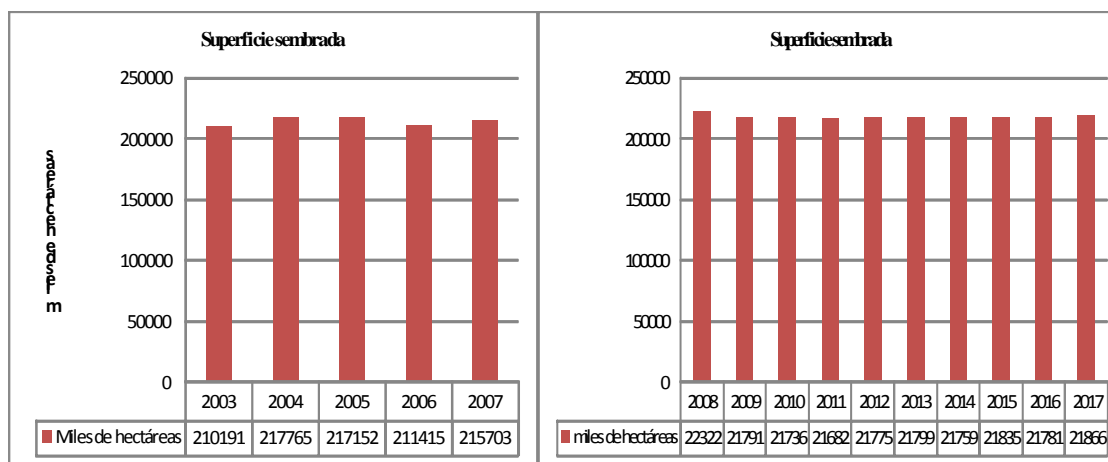


Gráfico 2-38. Total superficie sembrada de maíz; valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

Los principales países consumidores de trigo se localizan en Asia y en África. En el **gráfico 2-39** se puede ver que los principales países exportadores de trigo son EEUU (primer país exportador actualmente, aunque se prevé que su cota de mercado disminuya desde el 29% hasta el 24% en los próximos diez años), Australia, Canadá, UE-27 y Argentina. Entre todos ellos, concentran el 80% del comercio mundial de trigo.



Por otro lado se resalta el rol de Rusia y de los países del área CIS (ex bloque soviético) en las exportaciones de trigo. En el caso de Rusia, se estima un incremento en las exportaciones de entre el 4% y el 11% en los próximos años. En conjunto, se prevé que los países CIS, junto con Rusia, lleguen a exportar más de 40 millones de toneladas métricas de trigo en 2017.

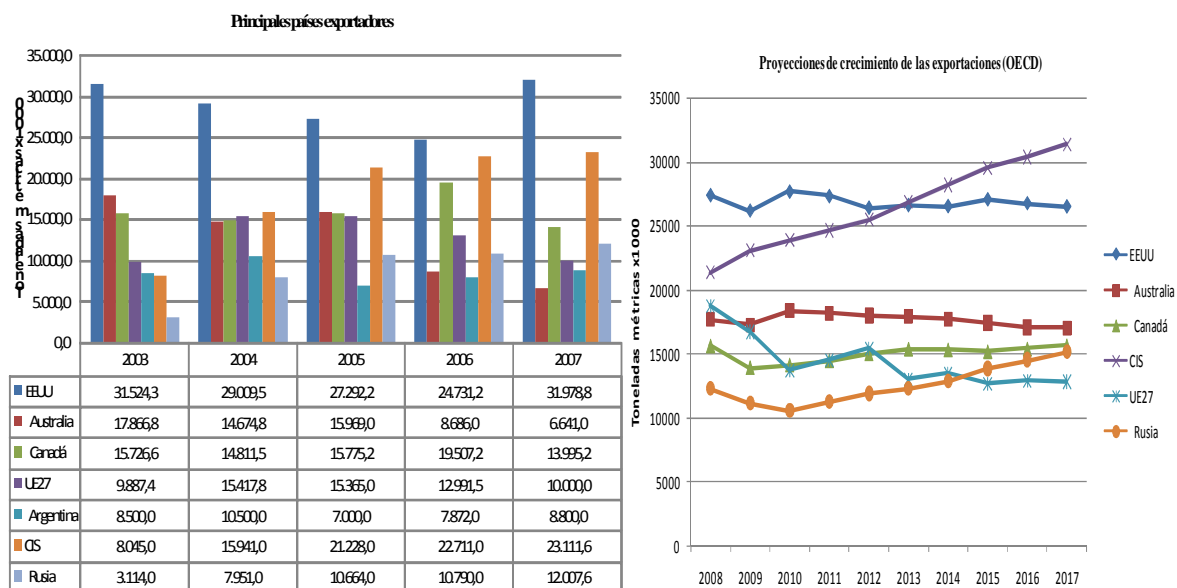


Gráfico 2-39. Principales países productores de trigo; valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

En el caso de los países importadores, se debe destacar que en 2006 India pasó a ser importador neto de trigo. Sus importaciones netas fueron de cerca de 2 millones de toneladas. Está previsto que en 2011/12 China pase a ser importador de trigo. Los países africanos y muchos de los países asiáticos, tradicionalmente importadores, continuarán siéndolo. En 2017 sus importaciones superarán las 10 millones de toneladas. Sus importaciones en 2007 fueron de 7 millones de toneladas.

Se prevé que aumente el trigo que tenga como destino final la producción para usos alimentarios y otros usos, incluida la producción de bioetanol. Pasará de 525 millones de toneladas en 2008 a 574 millones de toneladas en 2017 (ver **gráfico 2-40**).

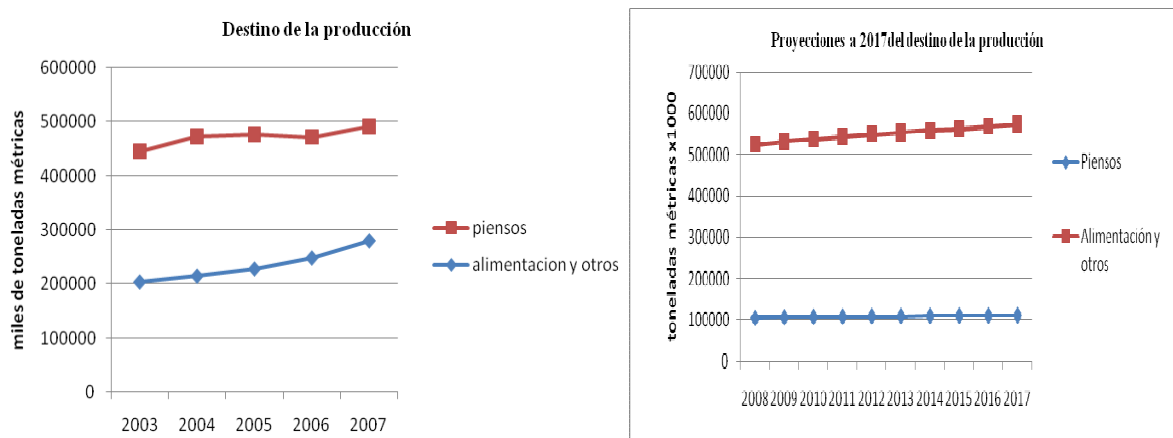


Gráfico 2-40. Destino de la producción de trigo, valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)



4.2 CEREALES DE GRANO GRUESO

Tanto la producción como el consumo total de cereales de grano grueso se han incrementado sustancialmente en el último bienio, siendo el incremento de la demanda superior al de la oferta (ver **gráfico 2-41**). El uso de cereales de grano grueso en la producción de bioetanol está asociado principalmente al uso del maíz como materia prima para la producción de bioetanol en EEUU. La UE utiliza por lo general cebada.

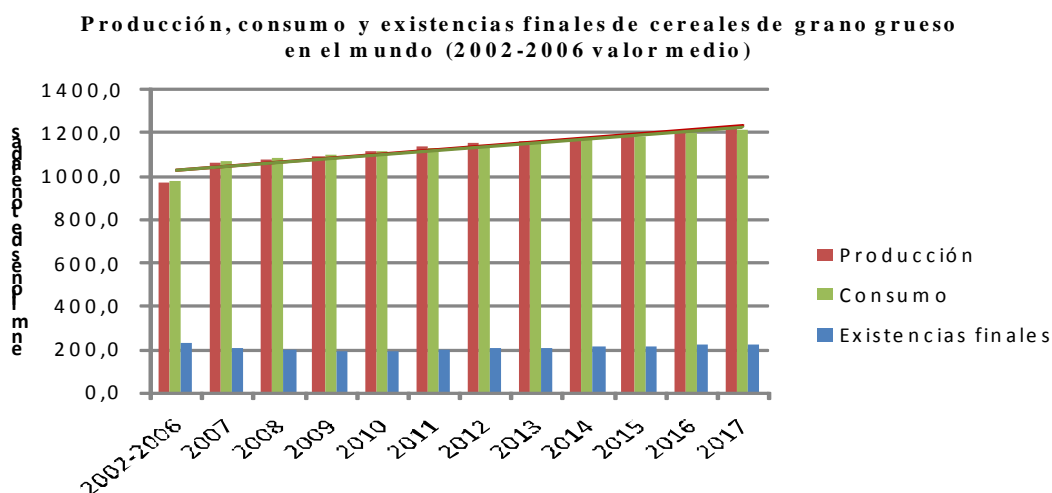


Gráfico 2-41. Producción, consumo y existencias finales de cereales de grano grueso en el mundo; valor medio (2002-2006) y valores estimados (2008-2017)

MAÍZ

El incremento en el consumo y la producción de maíz a nivel mundial a partir del 2003, se explica por dos factores principales:

- El incremento en las importaciones en los países en vía de desarrollo, particularmente China y Méjico
- El rápido incremento de la producción de bioetanol en EEUU.

Las proyecciones de FAPRI estiman un incremento en el consumo global de maíz del 19% en los próximos 10 años. La producción de maíz seguirá aumentando en el futuro, hasta alcanzar las 900.000 miles de toneladas en 2017 (ver **gráfico 2-41**). Para esa fecha, se estima que EE.UU. destine más del 40% de su producción de maíz a la producción de biodiésel (en 2007 destinó alrededor del 25%).

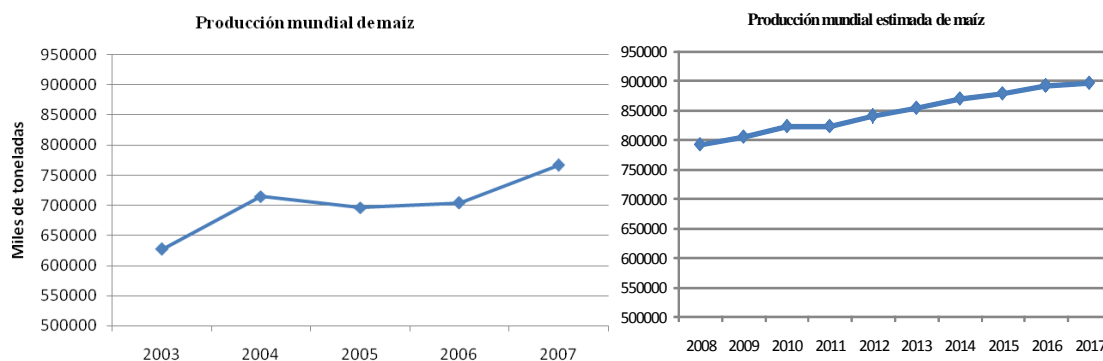


Gráfico 2-42. Producción mundial de maíz, valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)



La superficie cultivada mantendrá su crecimiento en los próximos años y pasará de 157 millones de hectáreas de 2007 hasta las 163 millones de hectáreas de 2017, tal y como se observa en el **gráfico 2-42**. Los principales responsables de este incremento serán Argentina y Brasil.

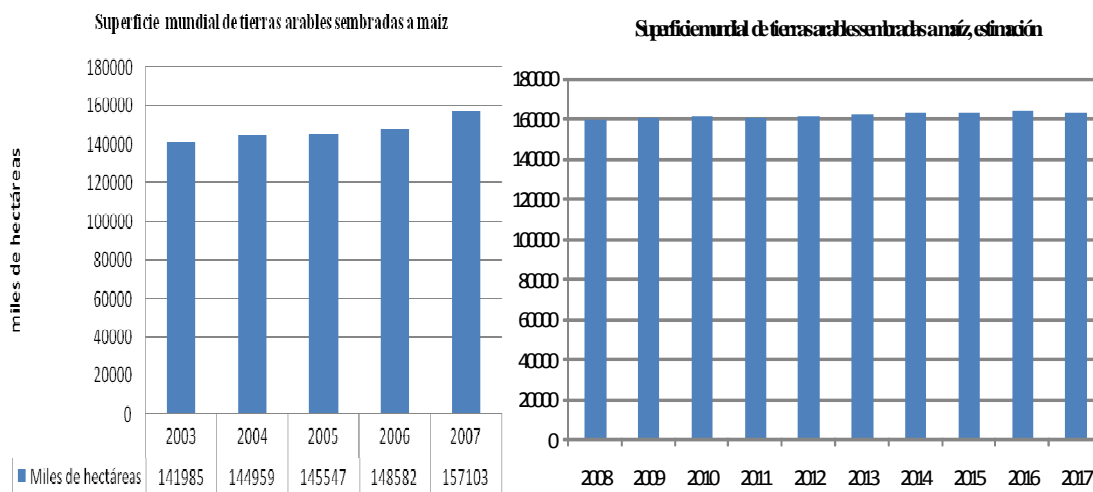


Gráfico 2-43. Total superficie sembrada de maíz, valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

Los principales productores de maíz son EEUU, China, la UE, Brasil, Méjico y Argentina, que juntos son responsables de más del 86% de la producción mundial de maíz. EEUU, Brasil y Argentina son exportadores netos de maíz y está previsto que continúen siéndolo durante la próxima década.

El mayor incremento de la demanda tendrá lugar en los países asiáticos, asociado al crecimiento en la producción de biocombustibles y la mayor demanda de piensos para el sector ganadero. El uso del maíz en el sector ganadero se ha ido incrementando en los últimos años, sobre todo por el incremento de demanda de productos cárnicos en los países en vía de desarrollo (en particular, China e India). Esta tendencia de crecimiento seguirá en la próxima década, alcanzando las 528 millones de toneladas en 2017.

Se prevé que las importaciones asiáticas crezcan de 10,1 millones de toneladas en la próxima década, mientras que las importaciones netas de los países africanos disminuiría debido a los incrementos en las producciones internas de los varios países. Por ejemplo, China pasará a ser importador neto de maíz en 2009 y para 2017 importará más de 2,5 millones de toneladas de maíz. Entre los países de Sudamérica, Méjico seguirá siendo el mayor importador neto. Sus importaciones serán de 14,3 millones de toneladas en 2017.

CEBADA

La cebada sea el segundo cereal de grano grueso por importancia detrás del maíz, tanto por la cantidad producida como por su utilización como materia prima en la preparación de bioetanol. Pero sus magnitudes son muchas que las del maíz: el total de la superficie cultivada de cebada es equivalente al 36,5% de la del maíz. En 2007 la producción de cebada fue de 132 millones de toneladas, de las que 12,6 millones fueron comercializadas a nivel mundial.



El decremento de la producción que tuvo lugar entre 2004 y 2007, hizo que el precio de la materia prima aumentara. Dado que la gran mayoría de la cebada se usa para la producción de piensos, este incremento del precio repercutió fundamentalmente en la cadena de valor del sector ganadero. A partir del 2007 ha empezado una recuperación en la producción de cebada, que se prevé continúe en el medio plazo. Gran parte de este incremento es absorbido por el sector industrial de la UE; es decir, la producción de bioetanol.

La producción de cebada está muy concentrada en la UE, Rusia y Canadá.

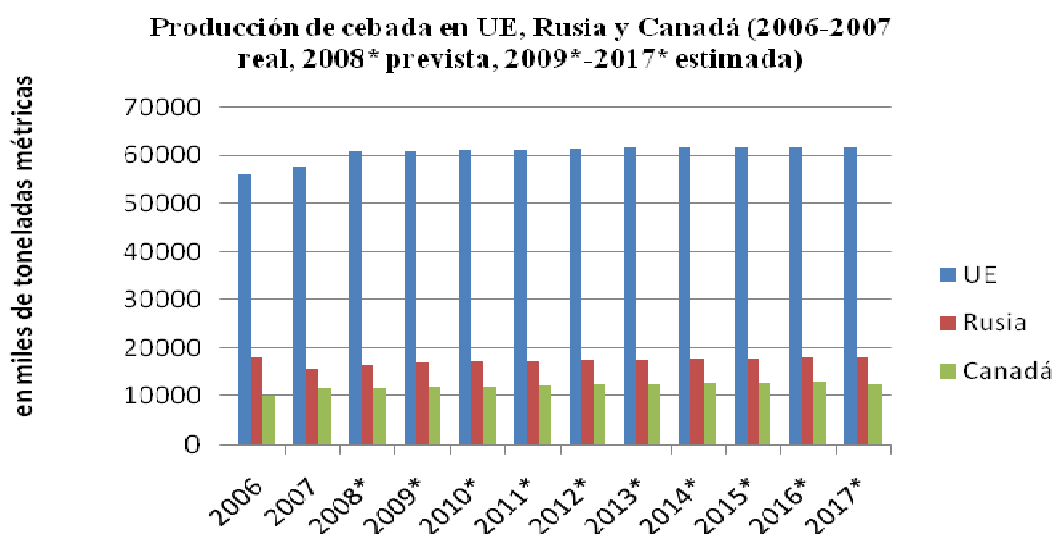
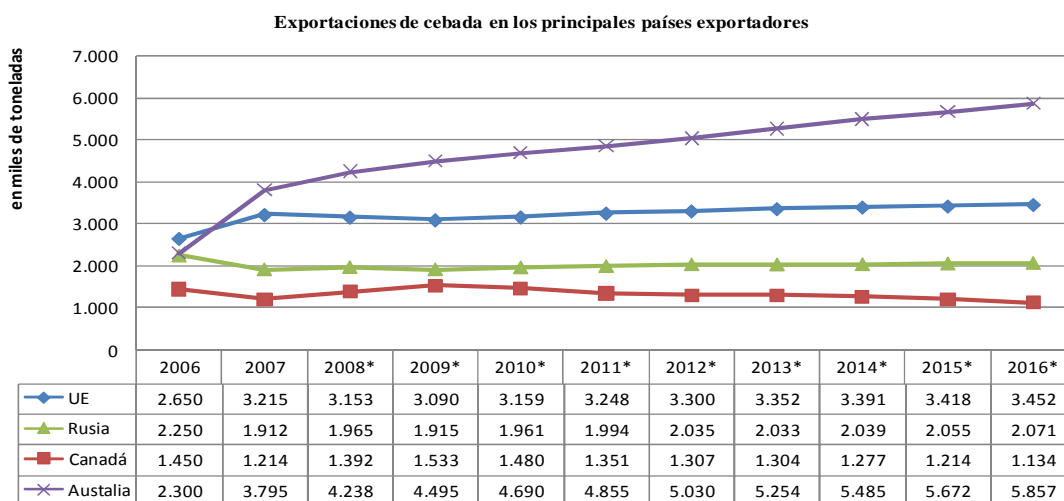


Gráfico 2-48. Principales países productores de cebada; valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

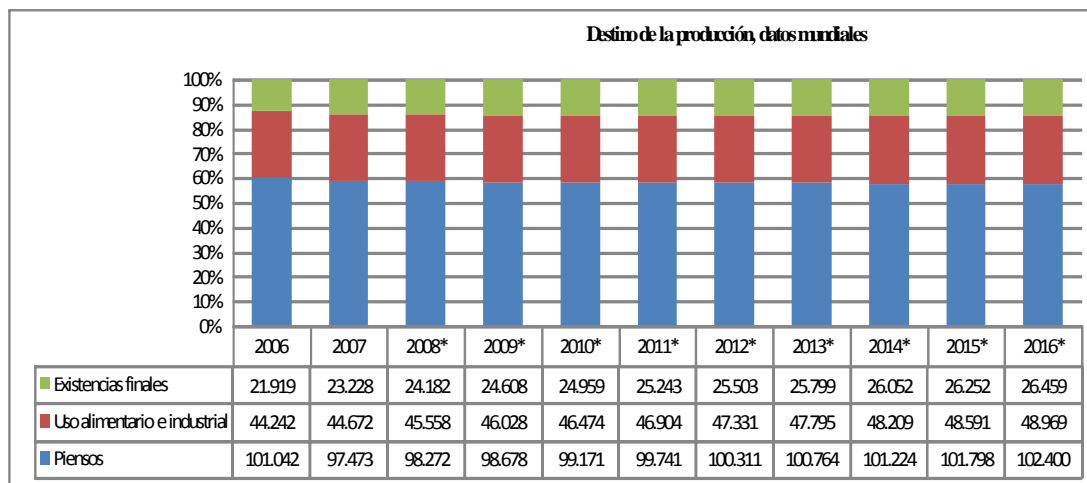
Los tres grandes productores están también entre los mayores exportadores de cebada, aunque el país que más cebada exporta es Australia. La producción de cebada de este último alcanzó las 8 millones de toneladas en 2007, con una prospección de 10 millones de toneladas a 2017 que hará que Australia siga siendo el mayor exportador de cebada a nivel mundial en los 10 próximos años.



Principales países exportadores de cebada, real (2006-2007) y estimada (2008-2017)



El destino de las exportaciones de cebada es fundamentalmente Asia, que utilizan la materia prima tanto para la alimentación del ganado como para la creciente producción de bioetanol.



Destino de la producción de cebada; valores reales (2006-2007) y estimados (2008-2017)

4.3 COLZA

La producción mundial de colza fue de 39,4 millones de toneladas en 2007. Está previsto que la producción aumente, hasta superar las 61 millones de toneladas en 2017.

En 2007 la UE fue el mayor productor del mundo, con una producción que superó los 18 millones de toneladas. China fue, con una producción de 11,42 millones de toneladas, el segundo productor mundial. Le siguió Canadá, con una producción de 6,78 millones de toneladas ese mismo año.

Producción de colza, en los principales países productores, en millones de toneladas métricas (real 2003-2007, estimada 2008-2017)

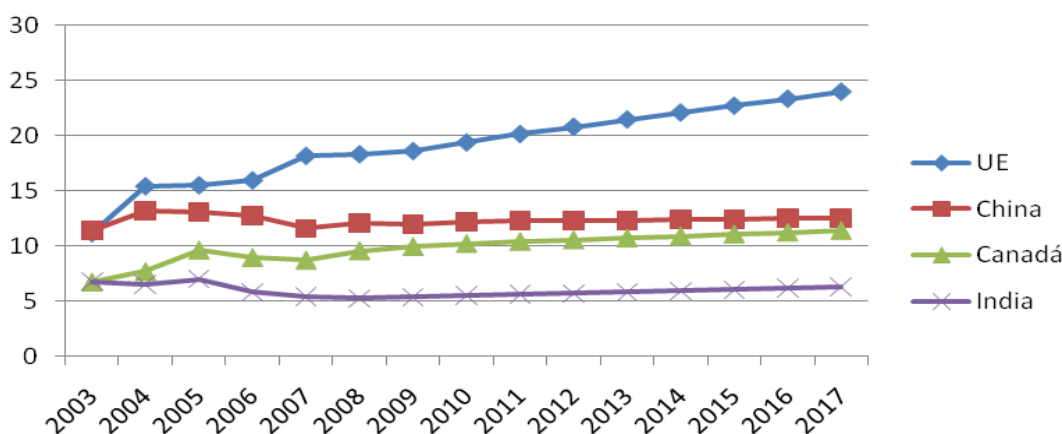


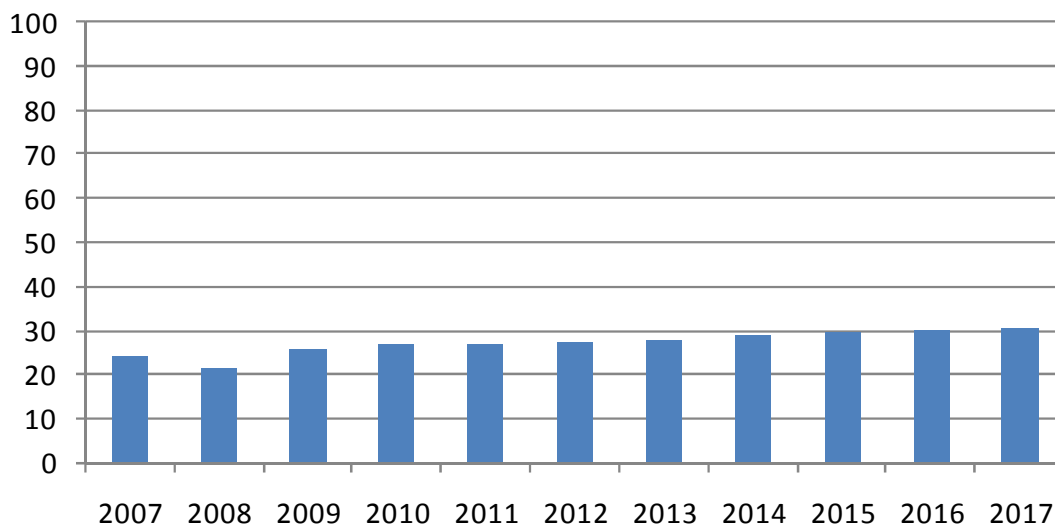
Gráfico 2-52. Principales países productores de colza; valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

El destino de la producción es muy diferente dependiendo de las áreas geográficas. Mientras que la UE destina gran parte de la producción a la generación de biodiésel, China lo dedica a usos alimentarios internos y Canadá lo utiliza con fines comerciales. El siguiente gráfico



muestra el porcentaje de colza destinado (actual y previsto) para la producción de biodiésel en la UE: 24% en 2007 y 30% previsto en 2017.

% de la demanda total de colza en la UE destinada a la producción de biodiésel



Porcentaje de la demanda total de colza destinada a la producción de biodiésel en la UE; valores reales (2007) y estimados (2008-2017)

Canadá – tercer productor mundial de colza – es el mayor exportador neto de colza del mundo. Los países CIS están entrando con fuerza en el mercado de la exportación de esta materia prima, ante la falta de infraestructuras propias para su procesamiento y conversión en biodiésel; se prevé que sus cotas de exportaciones crezcan en la próxima década, pasando de los 2 millones de toneladas de 2007 hasta superar los 4 millones de toneladas en 2017. La UE y China son los dos principales importadores netos de colza, con previsiones de crecimiento constante en la próxima década.

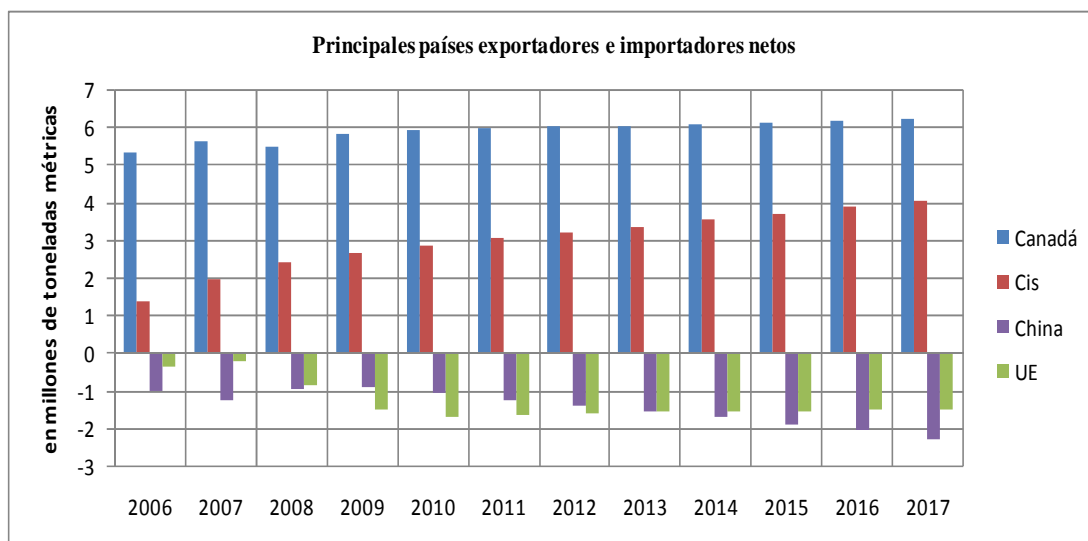


Gráfico 2-54. Principales países exportadores e importadores netos de colza; valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)



En los próximos años es de esperar un incremento en el total de la superficie sembrada, El incremento de la superficie vendrá de la mano de los notables aumentos previstos en la superficie sembrada de la UE, Canadá y los países CIS.

La superficie sembrada en la UE ha tenido una fuerte expansión en los últimos años – impulsado sobre todo al aumento del precio de la materia prima - y se prevé una expansión de 7,8 millones de hectáreas para el 2017. La superficie de Canadá ha tenido un incremento constante en los últimos años y se prevé que continúe así en la próxima década. Finalmente, los países CIS están experimentando un crecimiento de dos dígitos en el total de la superficie cultivada, debido sobre todo el incremento de la demanda de la UE para producir biodiésel. En 2007, la superficie total cultivada ha crecido de un 55% respecto al año anterior, y se prevé un crecimiento constante de un 7,5% al año para los próximos diez años.

4.4 SOJA

La producción de soja estadounidense ha caído un 19% en los últimos años, como consecuencia directa de la expansión del área de cultivo de maíz. La reducción estadounidense ha hecho que la producción mundial disminuya un 6%, aunque esta tendencia ha comenzado a cambiar a partir de este año. De cara al futuro, se prevé que la producción mundial aumente en los próximos años empujada por los altos precios de la materia prima. A corto plazo, se prevé un incremento de la producción de soja en Brasil y EEUU del 10%.

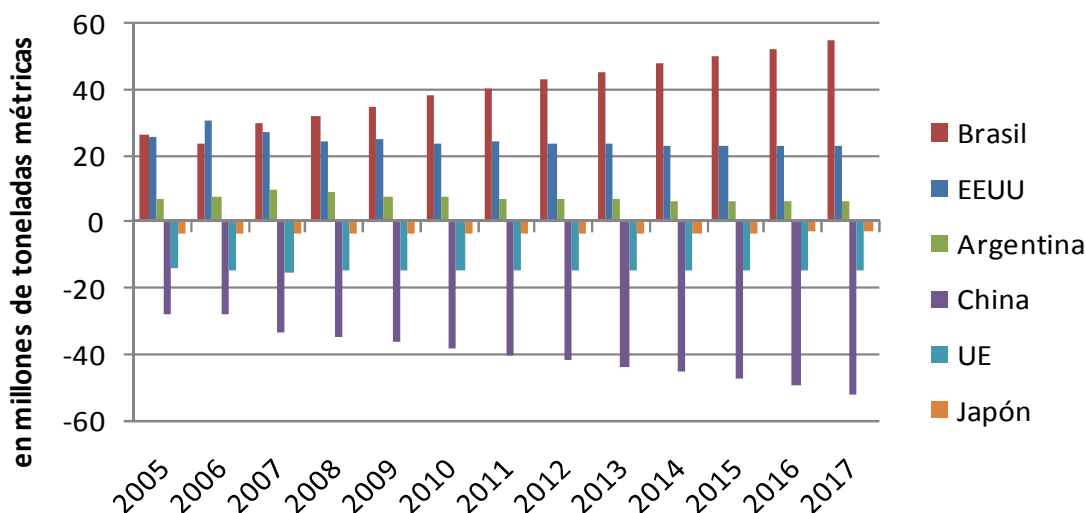
La sustitución de las zonas de cultivos en EEUU y el escaso crecimiento de las zonas de cultivos en China, debido a la expansión urbanística experimentada por el país en los últimos años, han determinado un decremento notable en la superficie cultivadas a nivel mundial. El incremento de la superficie de cultivo en Argentina y Brasil ha atenuado dichos efectos, pero no ha podido compensarlos. Se prevé una recuperación de la superficie de cultivo de soja a partir de 2008.

La producción de soja se concentra en EEUU, Brasil y Argentina - en este orden-, que juntos suman el 53% de la producción mundial. Según las previsiones, Brasil mantendrá un crecimiento constante en la producción de soja, alrededor del 3% al año, lo que llevará a que Brasil suplante EEUU como líder mundial en la producción de soja en los próximos diez años.

En 2007 se han intercambiado alrededor de 71,5 millones de toneladas de soja y se prevé un incremento del comercio de soja del orden de un 3% al año en los próximos diez años. Los principales países exportadores son, en este orden, Brasil, EEUU y Argentina. Y los principales importadores son China, la UE y Japón. Mientras China y Japón demandan soja para usos alimentarios, la UE utiliza una gran parte de su demanda para la producción de biodiésel. La soja representa por importancia la segunda materia prima utilizada en la UE para la producción de biodiésel, por detrás de la colza.



**Principales países exportadores e importadores
 (real 2005-2007, estimado 2008-2017)**



Principales países exportadores e importadores netos de soja, valores reales (2005-2007) y estimados (2008-2017)

La UE es el principal demandante de aceite de soja para la producción de biodiésel, con más de 3,5 millones de toneladas de aceite demandadas en 2007. La estrategia de expansión del biodiésel europea se basa en el cultivo de colza, por lo cual no se esperan variaciones relevantes en los próximos años en cuanto al uso de aceite de soja en el sector de los biocarburantes. El fuerte incremento de los precios del aceite de soja, en bienio pasado, ha generado una contracción del 17% de la demanda de esta materia prima en la UE en 2007, aunque se prevé una recuperación en la demanda a partir de 2010.

% de aceite de soja utilizado para la producción de biodiesel en la UE(real 2007, estimado 2008-2017)

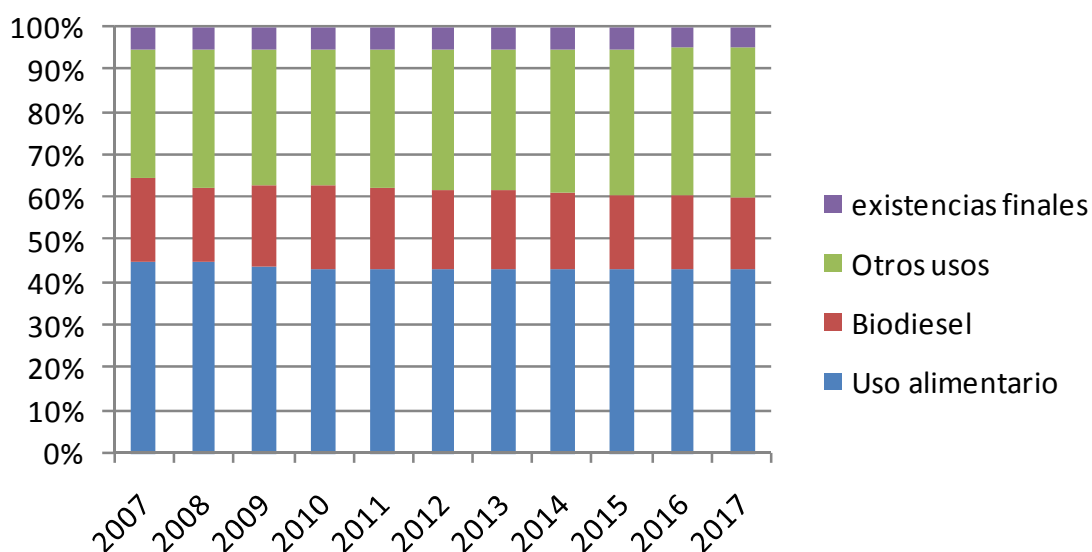
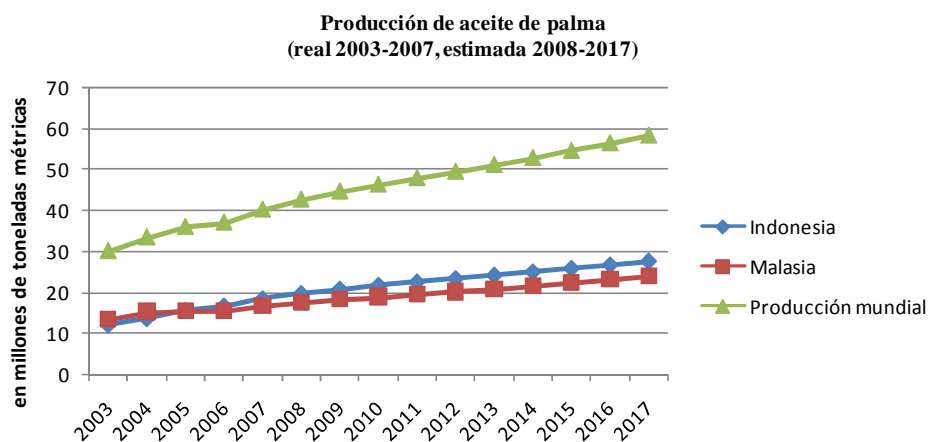


Gráfico 2-60. Porcentaje de la demanda total de aceite soja destinada a la producción de biodiésel en la UE, valores reales (2007) y estimados (2008-2017)



4.5 ACEITE DE PALMA

La producción mundial de aceite de palma asciende a 40,2 millones de toneladas métricas, de las cuales 26,3 millones de toneladas métricas han sido comercializadas. Malasia e Indonesia son los mayores productores de aceite de palma mundiales, sumando conjuntamente cerca del 80% de la producción mundial de aceite de palma y de productos relacionados. Indonesia mantiene su liderazgo mundial en la producción de aceite de palma, sobre todo empujada por la alza en los precios y por la disponibilidad de terrenos cultivables. En los próximos años se prevé un fuerte incremento en las superficies cultivadas, lo que puede poner el riesgo el mantenimiento del frágil equilibrio de las selvas primarias del país. Malasia tiene un menor potencial de incremento y, en su caso, el incremento de productividad por hectárea es un elemento clave para futuros incrementos de la producción. Los dos países mantienen planes muy ambiciosos para la promoción de la producción de biodiésel.

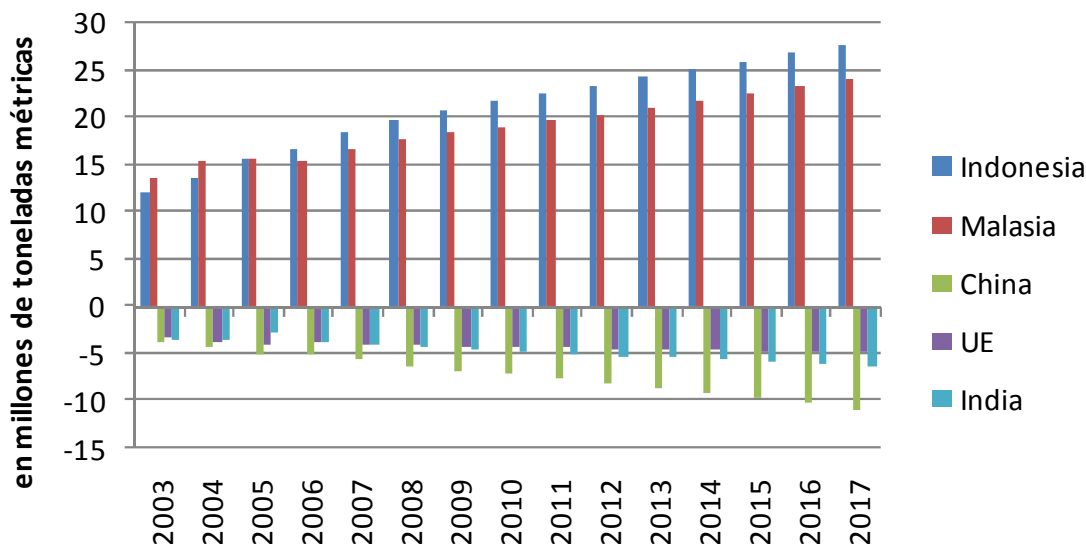


Principales países productores y producción mundial de aceite de palma; valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

El siguiente gráfico muestra los principales países exportadores e importadores de aceite de palma. Se puede ver que las exportaciones están dominadas por Indonesia y Malasia. Los principales importadores son China, India y la UE.



**Principales países exportadores e importadores netos
 (real 2003-2007, estimado 2008-2017)**



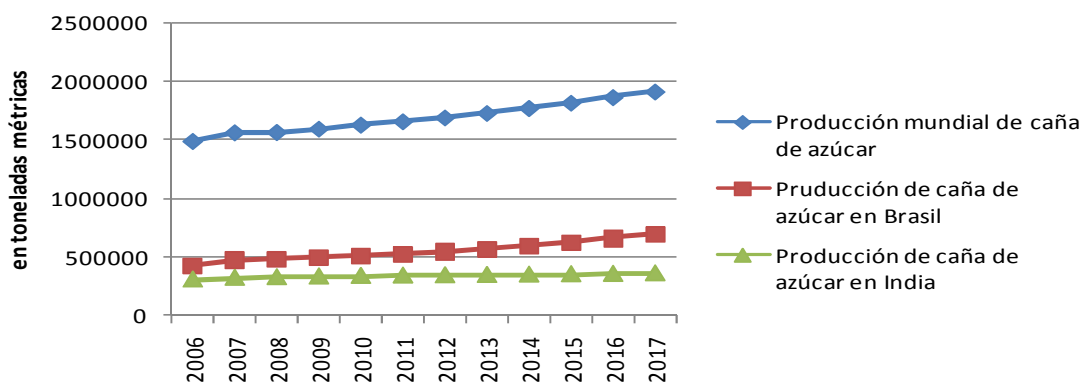
Principales países exportadores e importadores netos de aceite de palma; valores reales (2003-2007) y estimados (2008-2017)

China, el mayor consumidor de aceite de palma del planeta, depende fuertemente de las importaciones para hacer frente a una demanda muy relacionada con el sector alimentario. Lo mismo se puede decir de India, cuyos incrementos en las importaciones de aceite de palma dependen del incremento de la población y de la renta per cápita. Los incrementos de importación del aceite de palma en la UE están asociados al incremento de la demanda para usos industriales, como sustituto del aceite de colza, y a la creciente demanda para la producción de biodiésel.

4.6 CAÑA DE AZÚCAR

La caña de azúcar se utiliza para producir bioetanol. Existen dos grandes productores mundiales de caña de azúcar: Brasil e India, que juntos suman el 50% de la producción mundial.

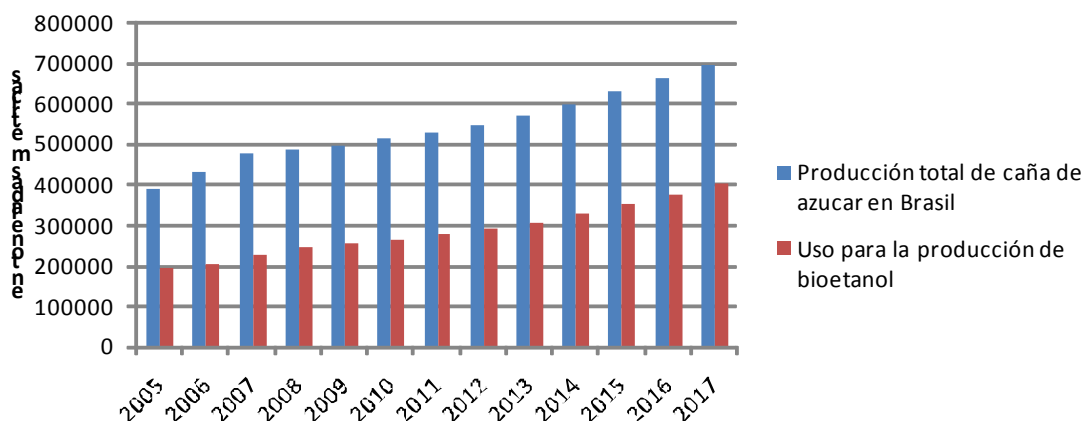
**Producción de caña de azúcar
 (real 2006-2007, estimada 2008-2017)**



Principales países productores y producción mundial de caña de azúcar; valores reales (2006-2007) y estimados (2008-2017)



India utiliza la caña de azúcar para usos alimentarios, mientras que Brasil ha ido desarrollando a lo largo de los últimos años una fuerte industria de los biocarburantes y destina gran parte de su producción a la generación de bioetanol.



Producción total de caña de azúcar y uso para la producción de etanol; valores reales (2005-2007) y estimados (2008-2017)

Brasil continúa su estrategia de crecimiento en la producción y exportación de bioetanol, lo que se demuestra mirando al incremento de la superficie dedicada al cultivo de caña de azúcar: un 9% entre 2006 y 2007. Se prevé que la superficie cultivada de caña de azúcar seguirá creciendo en la próxima década, en una media de un 3,5% anual.

A pesar del creciente uso de la caña de azúcar en la producción de bioetanol, Brasil lidera también las exportaciones de azúcar a nivel mundial por delante de Tailandia, Australia e India. El mercado de las importaciones está liderado por la UE, que ha pasado de ser exportador neto a importador neto debido al cambio en las políticas comunitarias de ayuda al sector azucarero (la principal materia prima para la producción de azúcar en la UE es la remolacha azucarera). Otros grandes importadores son Rusia e Indonesia, en el orden. En 2007 se han comercializado alrededor de 37 millones de toneladas de azúcar.

5 TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN COMERCIALIZADAS

5.1 BIODIÉSEL

El biodiésel es producido a partir de las grasas vegetales de aceites y grasas animales, principalmente, siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más utilizadas para este fin. El término biodiésel se refiere de forma exclusiva al éster metílico producido a partir de un aceite vegetal o animal, que cumple la norma UNE-EN-14214. El aceite vegetal, a pesar de sus similitudes con el gasóleo de origen fósil, no es considerado como biocarburante.

Procedencias de aceites útiles para la producción de biodiésel:

Plantas oleaginosas: colza, soja, girasol, palma, ricino, semilla de cardo.

Aceites vegetales usados: procedentes de la industria alimenticia (fritos)

Grasas animales: procedentes de la industria cárnica.

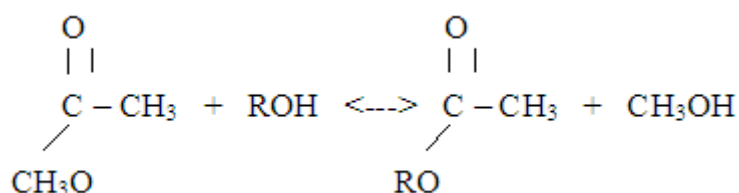


El método utilizado comercialmente para la obtención de biodiésel es la transesterificación (también llamada alcoholólisis), aunque la esterificación¹¹ también es un proceso posible. La transesterificación es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.

a

(H) $\begin{array}{c} \text{O} \\ || \\ \text{R}-\text{C}-\text{OR}' \end{array}$ Éster: compuesto orgánico en el cual un grupo orgánico (R') reemplaza uno o más átomos de hidrógeno en un ácido oxigenado, ácido cuyas moléculas poseen un grupo hidroxilo (-OH) desde el cual el hidrógeno puede disociarse como un ion protón (H+). R es un grupo alquilo

A continuación se puede observar un proceso general de transesterificación mediante adición de un ácido. El CH₃O actúa como grupo alcoxi y ROH es el alcohol.



Proceso general de transesterificación

La transesterificación –proceso químico industrial utilizado para la producción de biodiésel– consiste en tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido¹² 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.

La obtención de biodiésel 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 formación de glicerina, inmiscible con los ésteres metílicos, juega un papel importante en el desplazamiento de la reacción hacia la derecha, alcanzándose conversiones cercanas al 100%.

La reacción de se desarrolla en una proporción molar de alcohol a triglicérido de 3 a 1, es decir, reacciona 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).

Los siguientes diagramas representan 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.

¹¹ La esterificación es el proceso por el cual se sintetiza un [éster](#). Un éster es un compuesto derivado formalmente de la reacción química entre un [oxácido](#) y un [alcohol](#).

¹² El triglicérido es el principal componente del aceite vegetal o la grasa animal.



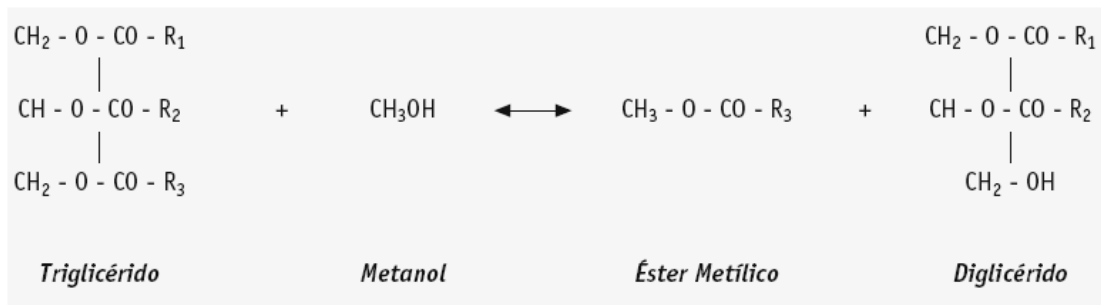


Gráfico 2-73. Reacciones implicadas en la transesterificación: 1ª reacción

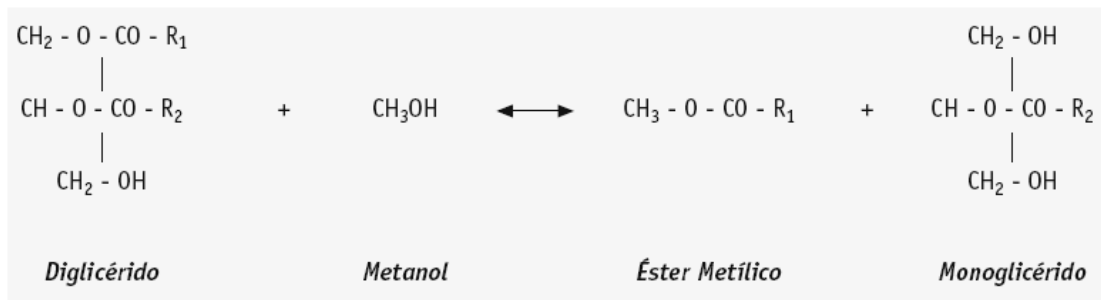


Gráfico 2-74. Reacciones implicadas en la transesterificación: 2ª reacción

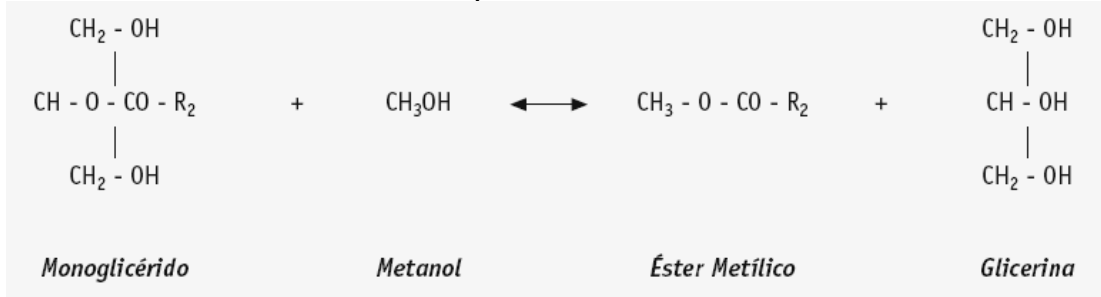


Gráfico 2-75. Reacciones implicadas en la transesterificación: 3ª reacción

Los catalizadores utilizados, para mejorar la velocidad de la reacción y el rendimiento final, pueden ser ácidos homogéneos (H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 , RSO_3), ácidos heterogéneos (Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO_4/ZrO_2 , WO_3/ZrO_2), básicos heterogéneos (MgO , CaO , $\text{Na}/\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$), básicos homogéneos (KOH , NaOH) o enzimáticos (Lipasas: *Candida*, *Penicillium*, *Pseudomonas*).

Los catalizadores que se suelen utilizar a escala comercial son los catalizadores homogéneos básicos ya que actúan mucho más rápido y permiten operar en condiciones moderadas. La utilización de un catalizador ácido requiere temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos, por ello es frecuente la utilización de derivados de ácidos más activos.

El único problema de estos catalizadores es que deben ser anhídros 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 alcóxico 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 H₂SO₄ 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. Todos los catalizadores utilizados en la transesterificación tienen ventajas e inconvenientes, tal y como se muestra a continuación¹³.

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

La opción comercial para catalizador más utilizada a escala industrial es álcalis. Esta elección implica que el glicérido y el alcohol deben ser anhidros (<0,06 % v/v) para evitar que se produzca la saponificación (formación de jabón). 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.

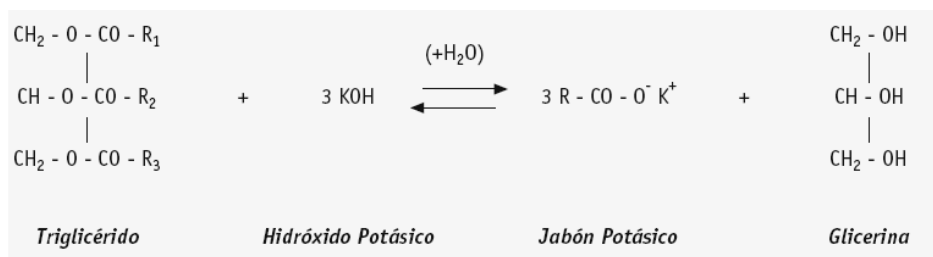
¹³ Fuente: Grupo de Ingeniería Química y Ambiental (GIQA) de la Universidad Rey Juan Carlos



Por tanto, las reacciones secundarias que se pueden dar en el proceso de transesterificación son:

- Reacción de saponificación.
- Reacción de neutralización de ácidos grasos libres.

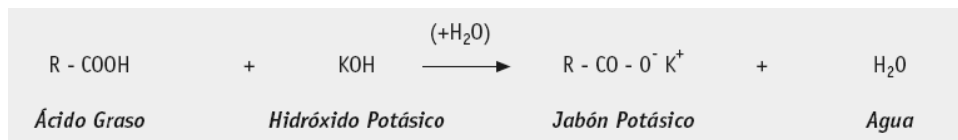
Reacción de saponificación.



El triglicérido reacciona con el catalizador básico, consumiéndolo en presencia de agua y dando lugar a la formación de jabones (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.

Reacción de neutralización de ácidos grasos libres

Hay dos maneras de eliminar los ácidos grasos libres presentes en el aceite. 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.



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.

La esterificación se viene aplicando de forma combinada con la transesterificación para eliminar ácidos grasos, obteniéndose un subproducto de los mismos, y producir asimismo biodiésel.

El proceso más común para la obtención de ésteres 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.

Reacción de esterificación.



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.

Los catalizadores que se utilizan en este tipo de reacción son ácidos o enzimáticos. En el caso de la esterificación, al contrario que en la reacción de transesterificación, el uso de catalizadores ácidos no supone trabajar a elevadas temperaturas y con tiempos de reacción largos.

Por último, para finalizar con la descripción del proceso de transesterificación, vamos a señalar algunas variables que afectan a la reacción.

Acidez y humedad

Los contenidos de ácidos grasos y de humedad son los parámetros determinantes para la viabilidad del proceso de transesterificación del aceite vegetal. Para que se realice la reacción completa se necesita un valor de ácidos grasos libres, Free Fatty Acid (FFA), menor al 3%. Cuanta 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. La presencia de humedad disminuye el rendimiento de la reacción, pues el agua reacciona con los catalizadores formando jabones.

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.

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 de glicerina. 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 pre tratamiento 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, ya que los catalizadores básicos tenderían a neutralizar estos ácidos grasos y por tanto formarían jabones. Los catalizadores ácidos pueden ser sulfúrico, fosfórico o ácido sulfónico orgánico.

En los procesos de metanólisis¹⁴ 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].

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 de la glicerina 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 la glicerina 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 glicerina. La transesterificación es una reacción de equilibrio que necesita un exceso de alcohol para trasladar la reacción al lado derecho. Para una conversión máxima se debe utilizar una reacción molar 6:1. Sin embargo un valor alto de relación molar de alcohol dificulta la separación de glicerina debido al incremento de solubilidad. Cuando la glicerina se mantiene en la solución hace que la reacción se revierta hacia la izquierda, disminuyendo la producción de biodiésel.

El tipo de alcohol utilizado es también un factor importante en la formación de ésteres. El etanol y el metanol no se disuelven con los triglicéridos a temperatura ambiente y la mezcla debe ser

¹⁴ Proceso de transesterificación donde el alcohol utilizado es el metanol.



agitada mecánicamente para que haya transferencia de masa. Durante la reacción generalmente se forma una emulsión, si el alcohol utilizado es el metanol esta emulsión desciende rápidamente formándose una capa rica en glicerina quedándose en la parte superior otra zona rica en éster metílico. Sin embargo, si el alcohol utilizado es el etanol esta emulsión no es estable y complica mucho la separación y purificación de los ésteres etílicos.

La emulsión se debe principalmente a la formación de monoglicéridos y diglicéridos 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. 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 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 el éster era idéntica para 60 y 45°C y ligeramente menor para 32°C.

Procesos industriales para la obtención de biodiésel.

Existen múltiples opciones para la producción de biodiésel a partir del proceso general de transesterificación. Muchas de estas tecnologías pueden ser combinadas de diferentes maneras variando las condiciones del proceso y la alimentación del mismo. La elección de la tecnología será función de la capacidad deseada de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol y del catalizador.

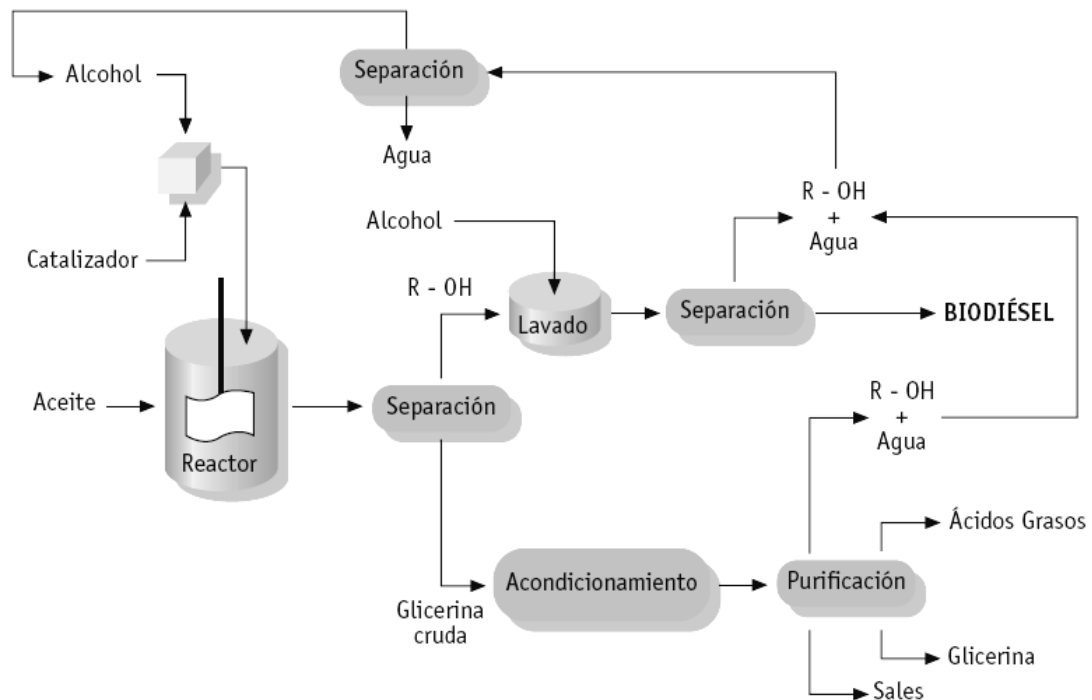
En general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación suelen utilizar procesos Batch o discontinuos. Los procesos continuos, sin embargo, son más idóneos para plantas de mayor capacidad que justifique el mayor número de personal y requieren una alimentación más uniforme.

Proceso discontinuo

Se trata del método más sencillo para la producción de biodiésel. 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% respectivamente. 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 a la glicerina separarse de la fase ester.

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.





*Fuente: Fuente: Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006
 Diagrama de bloques de un proceso de transesterificación en discontinuo.*

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 la glicerina en el decantador la reacción en un segundo CSTR es mucho más rápida, con un porcentaje del 98% de producto de reacción.

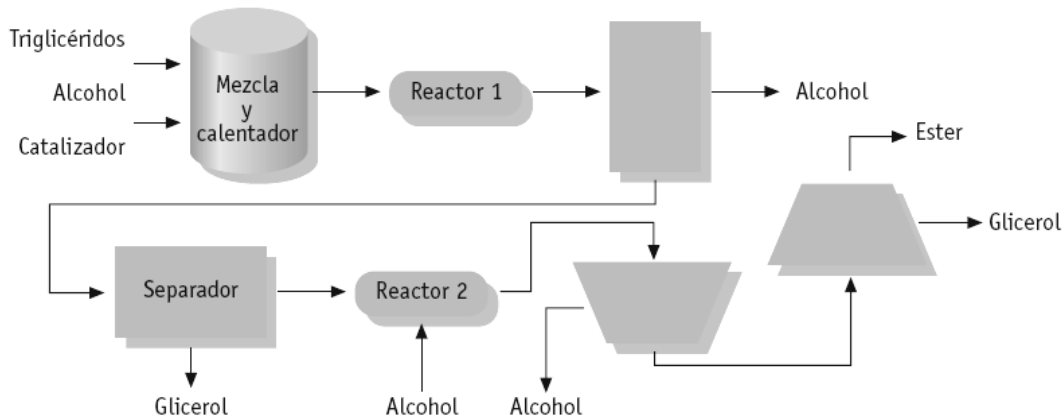
Un elemento esencial para el diseño de los reactores es que la mezcla se realice adecuadamente para que la composición en el reactor sea prácticamente constante. Esto tiene el efecto de aumentar la dispersión de la glicerina en la fase éster, de forma que el tiempo requerido para la separación de fases es superior.

El reactor que se utiliza en este tipo de mezclas 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, para la realización de la reacción. Este tipo de reactor puede operar a elevada temperatura y presión para aumentar el porcentaje de conversión.

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.





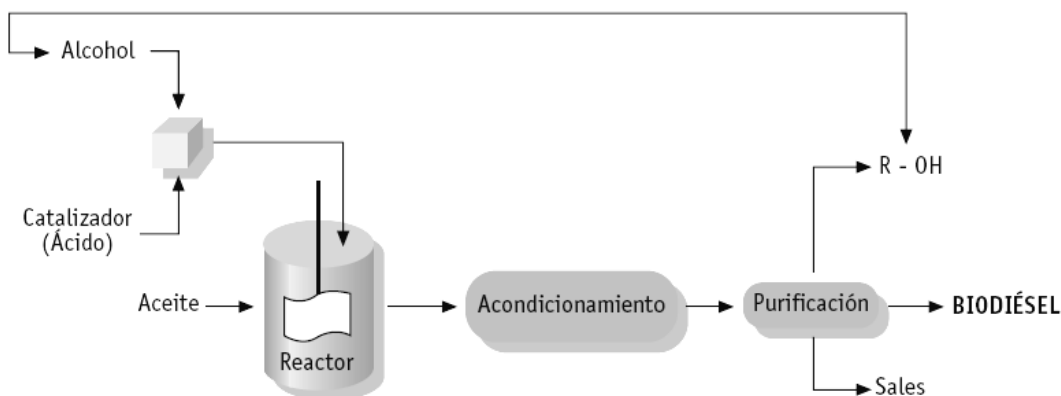
Fuente: Fuente: *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006*
Diagrama de bloques de un proceso de transesterificación mediante reactores de flujo pistón.

Proceso de esterificación

Este proceso consiste en el calentamiento de una mezcla de alcohol y del ácido correspondiente, ya que en la esterificación se suelen utilizar catalizadores ácidos, siendo el más común el ácido sulfúrico. El reactivo más económico se utiliza en exceso para aumentar el rendimiento de la reacción y desplazar el equilibrio hacia la derecha (esterificación de Fischer).

El ácido sulfúrico, además de cómo catalizador, actúa como sustancia higroscópica absorbiendo el agua formada durante la reacción y evitando así la formación de jabones. En ocasiones, este ácido puede ser sustituido por ácido fosfórico concentrado.

Este proceso presenta ciertos inconvenientes, por un lado el alcohol puede sufrir reacciones de eliminación formando olefinas, esterificación con el propio ácido sulfúrico o de formación del éter, y por otro lado el ácido puede sufrir decarboxilación.



Fuente: Fuente: *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006*
Proceso de esterificación.

Proceso combinado esterificación – transesterificación

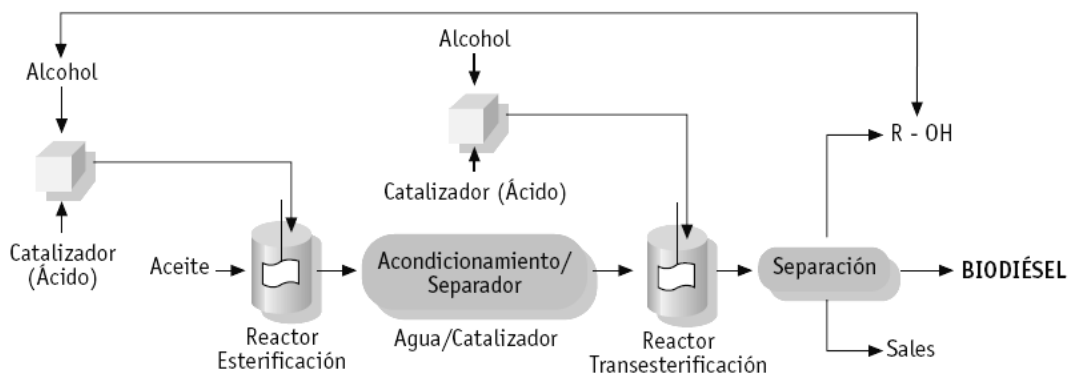
La combinación de ambos procesos, esterificación y transesterificación, se realiza para obtener un proceso mejorado. El objetivo es neutralizar los ácidos grasos libres procedentes de los triglicéridos, materia prima para la obtención de biodiésel, evitando así la formación de jabones y aumentando la producción de biodiésel.



Proceso esterificación – transesterificación.

En esta combinación la primera actuación es el refinamiento de los ácidos grasos mediante un tratamiento diferenciado anterior al sistema de alimentación. Se utilizan catalizadores cáusticos y el producto de la reacción se separa mediante centrifugación (proceso llamado Caustic Stripping).

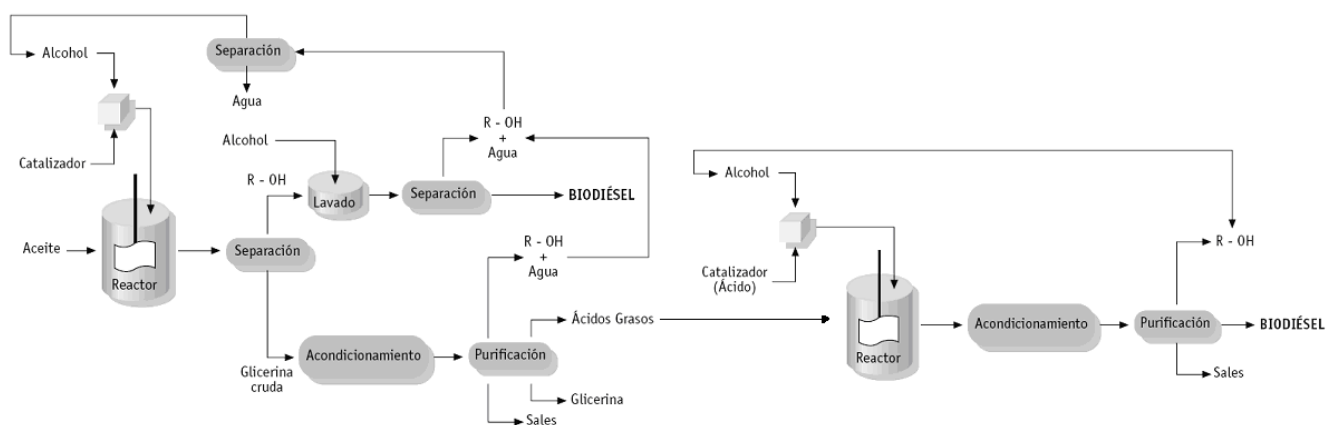
Por un lado tendremos ácidos grasos que serán transformados por esterificación ácida en ésteres metílicos. Por otro lado los aceites refinados serán convenientemente separados y acondicionados para alimentar la unidad de transesterificación.



Fuente: Fuente: *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006*
Proceso esterificación – transesterificación.

Proceso transesterificación – esterificación.

En este caso no se realiza el refinamiento de aceites con anterioridad al proceso de transesterificación. Por el contrario, se realiza la transesterificación en primer lugar y los ácidos grasos obtenidos como subproductos de dicha reacción son reutilizados para alimentar un proceso de esterificación.



Fuente: Fuente: *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006*
Proceso transesterificación – esterificación.

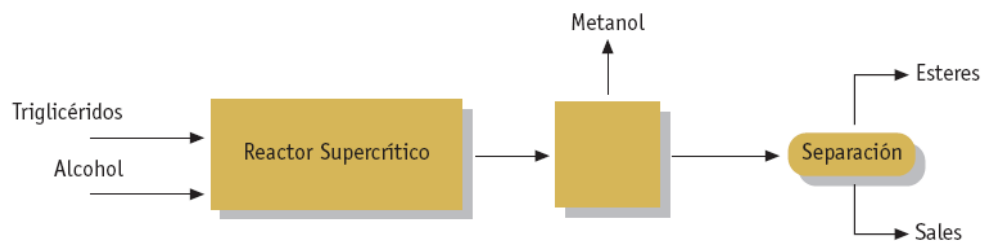
Proceso en condiciones supercríticas.

Cuando un fluido o gas es sometido a temperaturas y presiones que exceden su punto crítico, aparecen una serie de propiedades inusuales. Desaparece la diferencia entre la fase líquida y



vapor, existiendo sólo una fase de fluido presente. Además, los disolventes que contienen grupos OH, como el agua o alcoholes primarios, toman las propiedades de superácidos.

Un ejemplo de sistema sin catalizadores es el que utiliza un elevado ratio de alcohol (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 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.



Fuente: Fuente: Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006 . Proceso supercrítico sin necesidad de catalizadores.

TECNOLOGÍAS COMERCIALIZADAS PARA BIODIESEL

El biodiésel ha alcanzado un considerable nivel de éxito en Europa, mientras que los mayores productores de bioetanol se encuentran en el continente americano (Estados Unidos y Brasil).por ese motivo vamos a centrarnos en las tecnologías del biodiésel a nivel europeo y nos centraremos en el ámbito internacional para las tecnologías de producción de bioetanol.

El biodiésel es producido, en Europa, principalmente a partir del aceite de la semilla de colza y el metanol, denominado comercialmente como RME (Rapeseed Methyl Ester), el cual es utilizado en las máquinas diésel puro o mezclado con aceite diésel, en proporciones que van desde un 5% hasta un 20%, generalmente. En Alemania y Austria se usa puro para máximo beneficio ambiental.

Además de la colza, en los últimos años se ha producido biodiésel a partir de soya, girasol y palma, siendo esta última la principal fuente vegetal utilizada en Malasia para la producción de biodiésel PME y PEE (Palm Methyl Ester y Palm Ethyl Ester).

A continuación se describen las tecnologías existentes a nivel industrial para la obtención de biodiésel a partir de aceites vegetales. Estas consideran aspectos técnicos para la selección de una tecnología que se acondicione a las características de la materia prima a emplear.

Tecnología Henkel para transesterificación

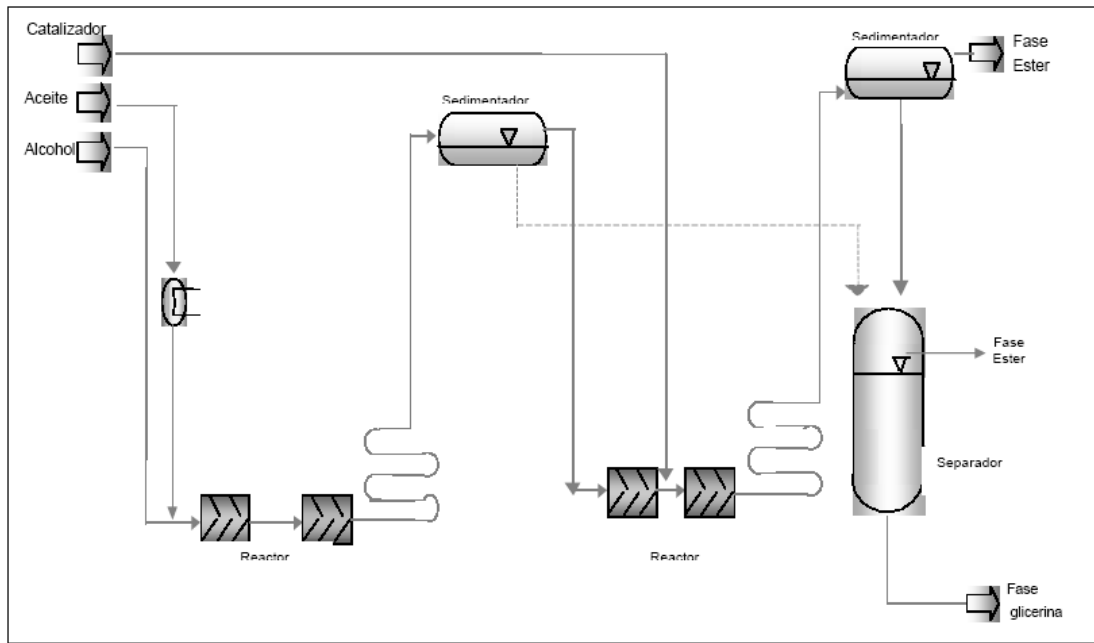
Este proceso fue diseñado de forma general generales, para diferentes cantidades de aceite y emplea un único paso de destilación. El proceso contiene dos reactores tubulares seguidos de tanques de sedimentación; la presión de operación se encuentra entre 400,000 – 500,000 Pa y la temperatura 343-353°C.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

La glicerina se retiene en los separadores y el éster se purifica por destilación. La calidad del éster resultante es buena, buen color, alta pureza, bajo porcentaje de glicéridos, así como la calidad de la glicerina cerca del 92%.



Actualmente están operando dos plantas de 170 mil toneladas anuales en Europa.

El contenido de glicerina libre en el biodiésel es muy alto (>0.02%) para su uso como combustible, por tal razón, se pierde un residuo entre el 4% y 5% del biodiésel obtenido.



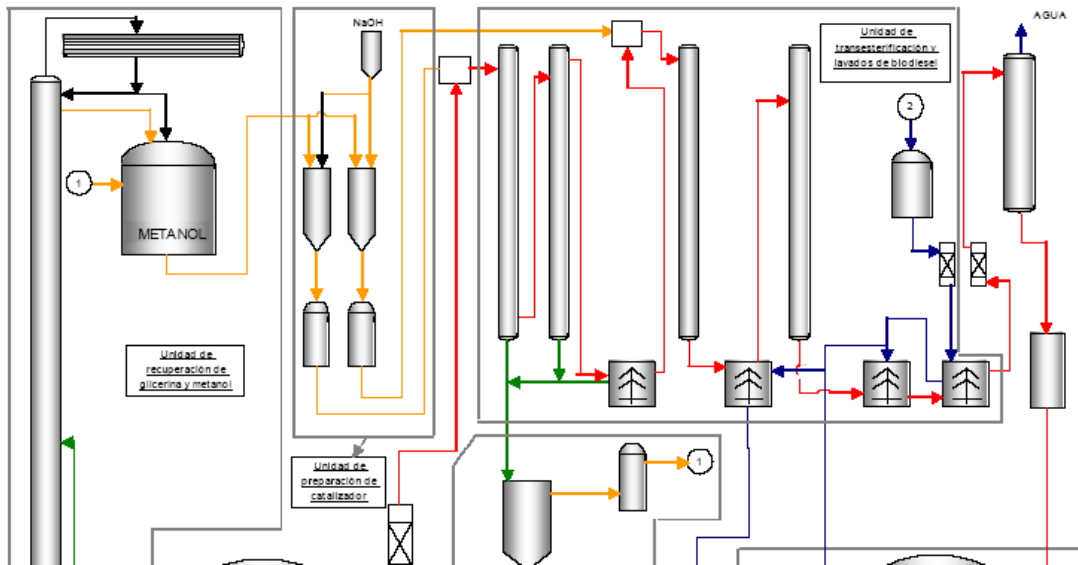
Fuente: Programa Estratégico para la producción de Biodiésel Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y la producción limpia. Proceso Henkel

Proceso de deglicerolización continua (CD) para transesterificación

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

Esta planta para la producción de 80 mil toneladas por año trabaja a máxima capacidad. Lo nuevo en este proceso es el manejo eficiente del flujo a contracorriente en los reactores de transesterificación, que normalmente se lleva a condiciones anhidras.





Fuente: Programa Estratégico para la producción de Biodiésel Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y la producción limpia.

Proceso de glicerolización continua (CD) para transesterificación.

El biodiésel procedente de la reacción de transesterificación entre el metanol, la oleaginoso (aceite vegetal) y el catalizador (KOH), se lleva a una etapa de separación y lavado en la cual se retiran las trazas de catalizador que no alcanzan a reaccionar, así como el metanol que tampoco reaccionó.

En la fase siguiente se continúa separando el biodiésel que se lleva a almacenamiento y la glicerina se lleva a un proceso de purificación. El biodiésel así obtenido es sometido a pruebas de control de calidad. Este proceso alcanzó un mayor grado de transesterificación.

Actualmente con esta tecnología está operando una planta de 100 mil toneladas/día en Hamburgo. Las ventajas de esta tecnología son:

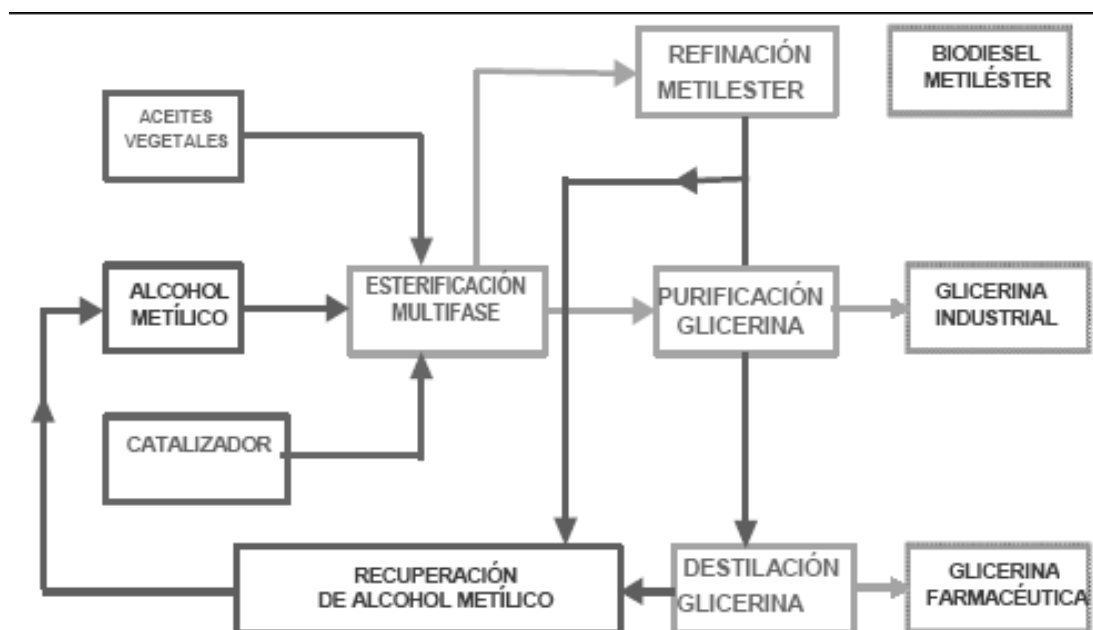
- Planta compacta
- Menor inversión
- Opera a presión ambiente y temperatura entre 338 K y 343 K
- Capacidades de 8,000 a 150,000 toneladas/ año
- Bajo consumo de energía
- Excelente calidad del producto
- Alta consistencia y estándares de calidad.
- No conveniente para materias primas ácidas (> 2 %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



Proceso continuo para la producción de metil éster – Estereco

Estereco es una compañía italiana dedicada a la investigación de combustibles biológicos o renovables. La compañía ha sido productora y comercializadora del biodiésel desde 1992.

El aceite vegetal obtenido de las oleaginosas se somete a una esterificación multifase junto con el catalizador y alcohol metílico o etílico. De este primer reactor se producen dos fases: un diésel sin refinar y la glicerina. El primero se lleva a un proceso de refinación del metil éster o etil éster del cual se obtiene el combustible listo para su consumo. En esta misma etapa se separa el alcohol que no reaccionó y se lleva a un sistema de recuperación para recircularlo al proceso. Por otra parte la glicerina se lleva a un proceso de purificación para obtener un producto de grado industrial o pasa a una destilación junto con parte del alcohol recuperado para obtener una glicerina de grado farmacéutico.



Fuente: Programa Estratégico para la producción de Biodiésel Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y la producción limpia. Tecnología y transesterificación Estereco.

Las ventajas de estas tecnologías son las siguientes:

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



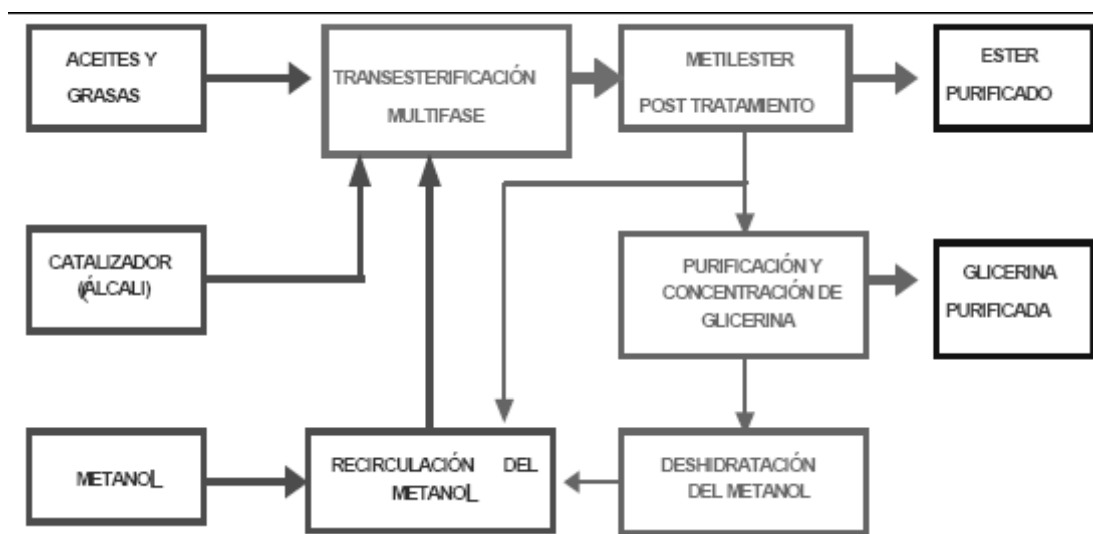
Proceso continuo para la producción de biodiésel – Ballestra

Ballestra es una empresa italiana fundada en el año de 1960. Ballestra produce plantas y maquinaria en el sector de la industria química para el proceso de aceites y grasas, sistemas de integración y control para plantas industriales, producción y comercialización de biodiésel.

Esta empresa ha desarrollado un proceso continuo de transesterificación de aceites vegetales (colza, girasol, palma, etc.). La reacción de transesterificación comprende 3 fases con un exceso de metanol con respecto a la cantidad estequiométrica, se emplea un álcali metilado en una solución anhidra de metanol como catalizador. El metanol y el catalizador se dosifican y se reciclan en los tres pasos de la reacción dentro de las condiciones establecidas.

La temperatura de la reacción es menor 50°C y la presión es de máximo 0.5 bar. El tiempo de residencia es inferior a 2 horas. En el final del proceso de transesterificación se separan las dos fases. La fase liviana contiene principalmente metil éster; su proceso de separación consiste en lavar el metanol sin reaccionar con soluciones acuosas.

La fase pesada contiene principalmente glicerina; su proceso de purificación comprende neutralización, separación del metanol que no ha reaccionado, dilución con las aguas del lavado del proceso de purificación del metil éster, separación de jabones formados en el proceso de neutralización y concentración final por encima del 80%. La glicerina parcialmente refinada se puede entregar como tal a los destiladores especializados. En forma opcional, la planta puede incluir pre-tratamiento de la materia prima y el procesamiento de la glicerina al grado farmacéutico (> 99.7%).



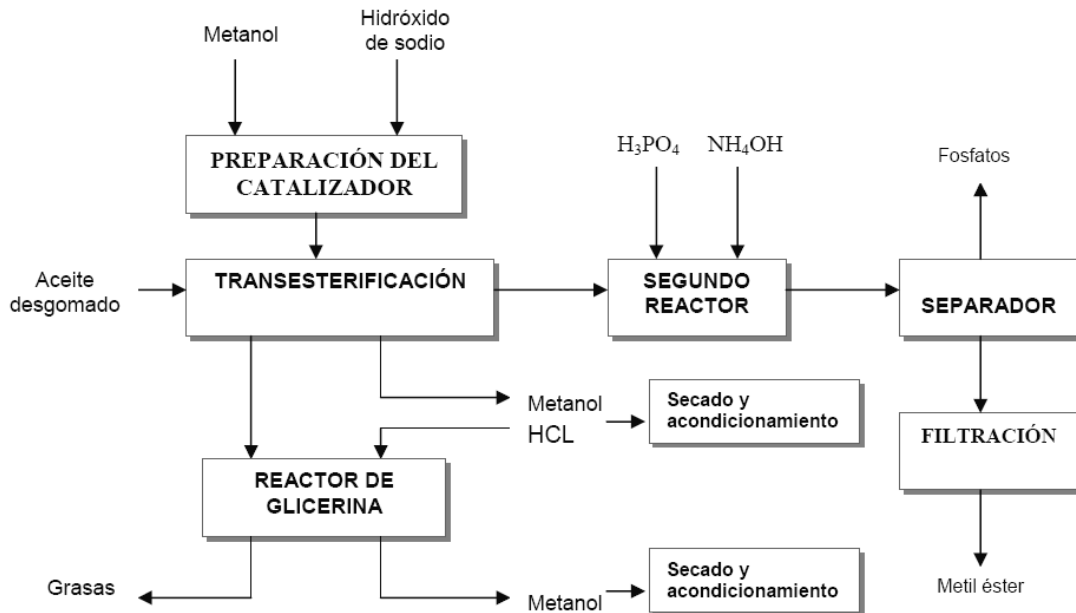
Fuente: Programa Estratégico para la producción de Biodiésel Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y la producción limpia. Tecnología Ballestra

Existen otras tecnologías que pueden operar con diferentes tipos de materias primas simultáneamente.



Proceso batch-discontinuo

Muchas plantas en el mundo con capacidades de 500 –10 mil toneladas/año son diseñadas empleando procesos por tandas (batch) de dos etapas. Cada etapa consta de un tanque reactor y un tanque sedimentador, llamado sistema mezclador / sedimentador.



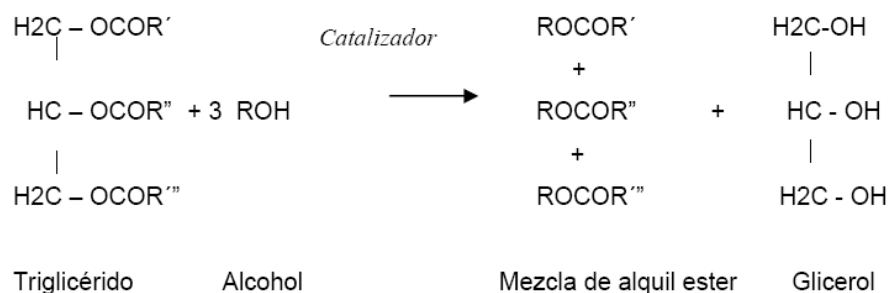
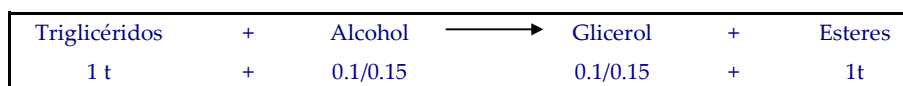
Fuente: Programa Estratégico para la producción de Biodiésel Corporación para el desarrollo industrial de la biotecnología y la producción limpia.
 Flujo del proceso batch

Este procedimiento no resulta costoso y alcanza buenas calidades en los productos. Asistido por control de procesos, es versátil en cuanto al cambio de materias primas en pequeñas cantidades.

Proceso ESTERFIP

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

La reacción producida es una transesterificación general, donde el alcohol es etanol o metanol. La estequiometría de la reacción también se muestra a continuación.



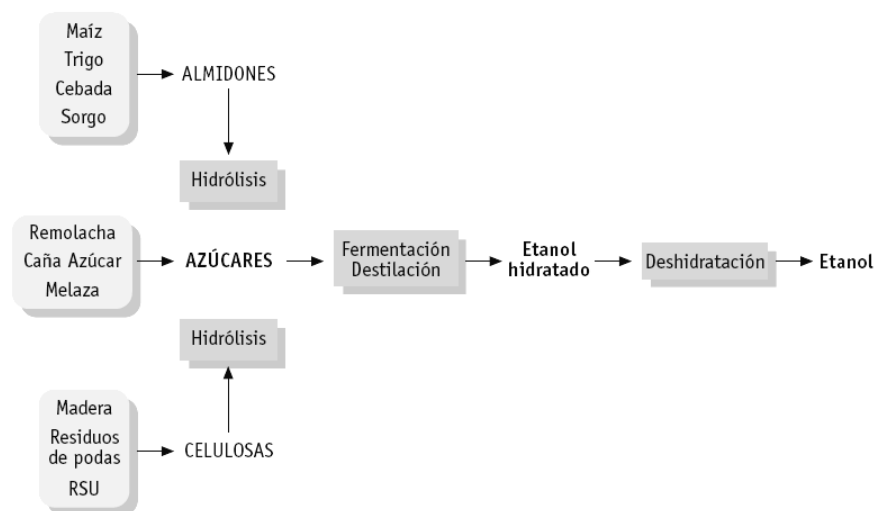
Donde R: cadena de hidrocarbonos de 11 –17 átomos de carbono.

ESTERFIP 1 (catálisis básica) se usa principalmente cuando se necesita desgomificar los aceites con bajo contenido ácido (índice por debajo de 3) mientras que el ESTERFIP 2 (ácido y catálisis básica) es más conveniente para aceites ácidos y etanol 190 proof¹⁵. Los ésteres son producidos después de remover el alcohol, mientras el glicerol purificado puede ser procesado a grado comercial (> 99.9%).

La experiencia del Instituto Francés del Petróleo está basada en el proceso batch a gran escala para la producción de metil y etil éster con una gran variedad de material graso. El objetivo del proceso es producir diésel a bajo costo. El precio estimado de la planta oscila entre los US\$360 mil y los US\$620 mil para una producción de 20 mil toneladas / año. Las plantas están ubicadas en las ciudades de Rouen y Compiègne.

5.2 BIOETANOL

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. En el proceso de fermentación se obtiene alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible.



*Fuente: Fuente: Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006
 Proceso de producción de bioetanol*

Se utilizan tres familias de productos para la obtención del alcohol:

- Plantas ricas en azúcares: caña de azúcar o remolacha azucarera entre otros.
- Cereales: como trigo, cebada o maíz, mediante la fermentación de los azúcares del almidón.
- Biomasa lignocelulosa, por la fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa y hemicelulosa procedente de hierba, madera, residuos forestales.

¹⁵ Equivalentes a 92.42%

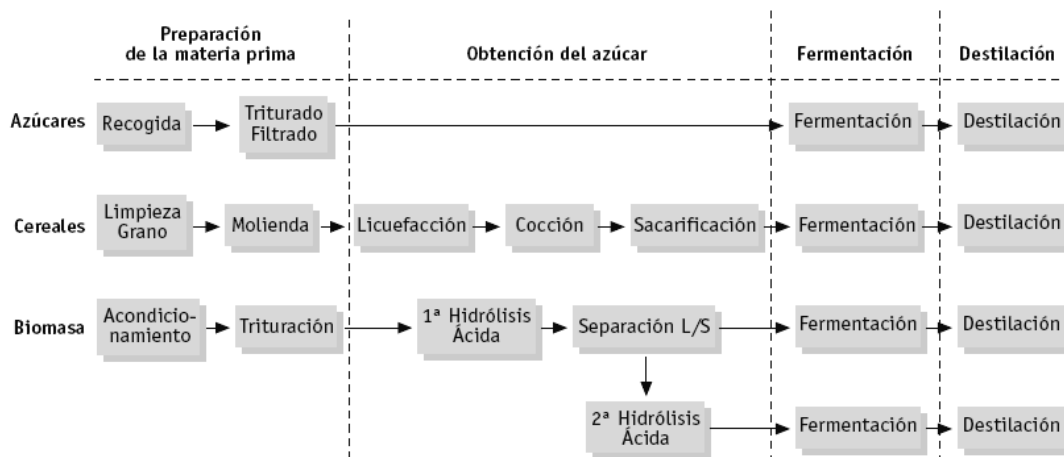


El orden en que se presenta esta lista está establecido según la facilidad de fermentación en el proceso productivo, relacionado directamente con la disponibilidad de los azúcares en la materia prima, ya que la reacción fundamental para obtener bioetanol es por oxidación (fermentación) de soluciones ricas en monosacáridos: glucosa, fructosa, etc.

Las plantas ricas en azúcares contienen monosacáridos liberados y fácilmente accesibles. En los cereales, sin embargo, éstos se encuentran en forma de almidón (polisacárido), que es necesario “romper” (hidrolizar) en forma de los azúcares simples que lo componen. Las tecnologías de obtención de bioetanol están actualmente desarrolladas y en fase de explotación industrial para estos dos casos.

Los materiales lignocelulósicos son los que ofrecen un mayor potencial para la producción de bioetanol. La mayoría de los materiales con alto contenido en celulosa, susceptibles de ser utilizados para la producción de bioetanol, se generan como residuos en los procesos productivos de los sectores agrícolas, forestal e industrial.

Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina que forman parte del tejido estructural de las plantas. Para obtener los azúcares de la biomasa es precisa una hidrólisis de una mayor intensidad, el material lignocelulósico es tratado con ácidos o enzimas que facilitan su obtención. La celulosa y hemicelulosa son hidrolizadas por enzimas o diluidas por ácidos para obtener sacarosa, que posteriormente es fermentada. Tres son los principales métodos para extraer estos azúcares: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática. Existen diferentes tecnologías de producción de bioetanol dependiendo del origen de la materia prima (ver gráfico adjunto).



Fuente: Fuente: *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006*
Procesos de producción de bioetanol

En general, el proceso de obtención de bioetanol, independientemente del origen de la materia prima, se puede dividir en 4 fases.

Fase 1.- Pre tratamiento. Preparación de la materia prima. Los tratamientos serán diferentes dependiendo del tipo de materia prima utilizada.

Fase 2.- Obtención de los azúcares procedentes de la materia prima. En esta fase también se diferencian distintas tecnologías dependiendo del origen de la materia prima. En el caso de

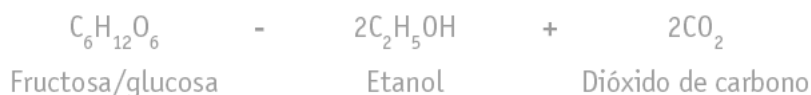


azúcares (sacarosa procedente de remolacha o caña de azúcar) no es necesaria esta etapa ya que tras el pre tratamiento de la materia prima se obtienen directamente estos azúcares simples, que sólo necesitan ser fermentados para la obtención del bioetanol.

Fase 3.- Fermentación. Obtención de una mezcla de alcohol diluida en agua. Este proceso es común para todas las tecnologías, ya que parte de un punto común; azúcares simples como la sacarosa. Se trata de la fermentación por levadura de los azúcares procedentes de la materia prima. La levadura contiene una enzima llamada invertasa, que actúa como catalizador ayudando a convertir los azúcares en glucosa y fructosa (ambos C₆H₁₂O₆). 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.



Fase 4.- Destilación. Separación del alcohol por evaporación. Este proceso también es común para todas las tecnologías. El alcohol producido por la fermentación 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 evapora, tras la separación, el alcohol vuelve a ser condensado.

A continuación, se describen las diferentes tecnologías más relevantes para la elaboración del alcohol según el origen de la materia prima.

Producción de bioetanol a partir de azúcares.

Fase 1.- Pre tratamiento. Recogida de la materia prima (caña de azúcar, remolacha) y trituración de la misma. Posteriormente se filtra el líquido que contiene el azúcar. El residuo sólido puede ser reutilizado como combustible.

Fase 2.- Obtención de los azúcares. No se necesita realizar ningún proceso químico, ni enzimático para la obtención de azúcar.

Fase 3.- Fermentación. Este proceso ha sido explicado anteriormente de forma general.

Fase 4.- Destilación. Este proceso ha sido explicado anteriormente de forma general.

Producción de bioetanol a partir de cereales.

Para la obtención de los azúcares a partir de cereales se utilizan principalmente dos tecnologías: proceso de molido húmedo y proceso de molido seco.



Wet Milling processes. Proceso de molido húmedo.

Esta tecnología se aplica normalmente en plantas con grandes producciones de alcohol. Este sistema es elegido cuando se quieren obtener otros subproductos, tales como el sirope, fructosa, dextrosa, etc., además de la producción del alcohol. Se trata de un proceso complejo, debido al elevado número de pasos a seguir en el pre tratamiento del cereal y su separación en sus diferentes componentes.

Fase 1.- Pre tratamiento. El proceso comienza con el secado de los granos, posteriormente se inspecciona automáticamente y se limpian las piedras, trozos de caña o paja y cualquier otra impureza.

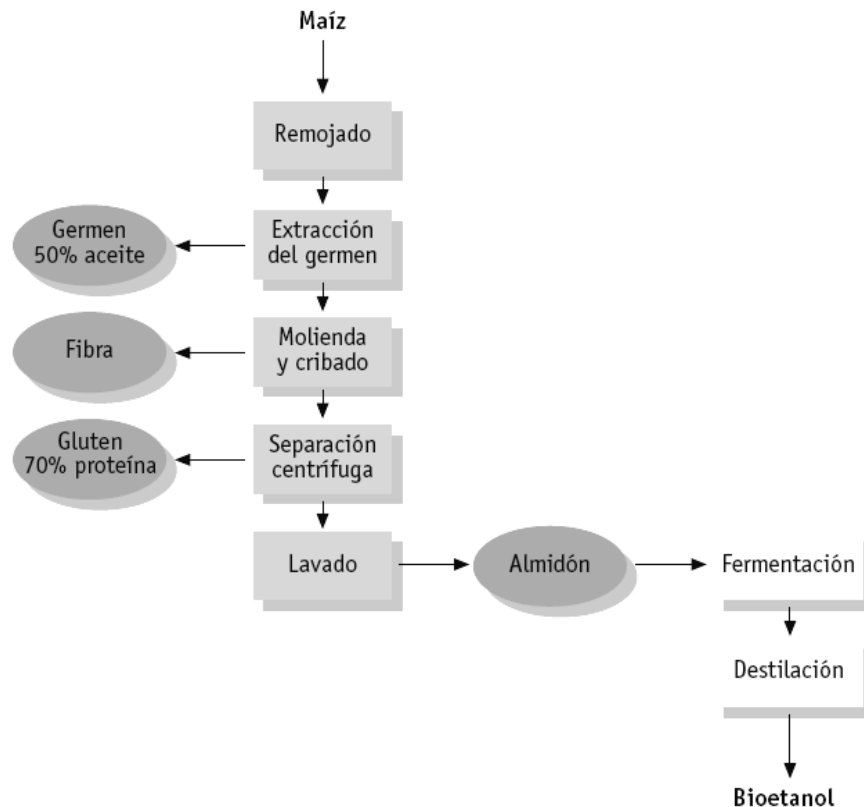
Fase 2.- Obtención de azúcares. El grano se remoja en grandes tanques en una solución que contiene pequeñas cantidades de dióxido de azufre y ácido láctico. Estos productos químicos, en agua a una temperatura de unos 50°C, y ayudan a ablandar los granos, este proceso puede durar entre uno y dos días. Durante esta etapa el maíz se hincha, luego se ablanda y debido a las condiciones ligeramente ácidas de la disolución se libera el almidón.

A continuación se pasa la mezcla obtenida a través de un separador que, principalmente, hace que el germen de los granos flote en la parte superior de la mezcla, debido a su contenido en aceite, y sea posible recogerlos fácilmente. Una vez extraído el germen, del grano restante se obtiene la parte fibrosa mediante molienda y posteriormente se separa el almidón de las proteínas por un proceso de centrifugación.

El almidón debe ser tratado con enzimas a altas temperaturas (99-110°C) para liberar los azúcares que están contenidos en él.

Las fases 3 (fermentación) y 4 (destilación) son comunes a los explicados anteriormente de forma general.





*Fuente: Fuente: Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006
 Proceso de molido húmedo*

Dry milling. Proceso de molido seco.

Esta tecnología se usa en plantas de pequeño y medio tamaño.

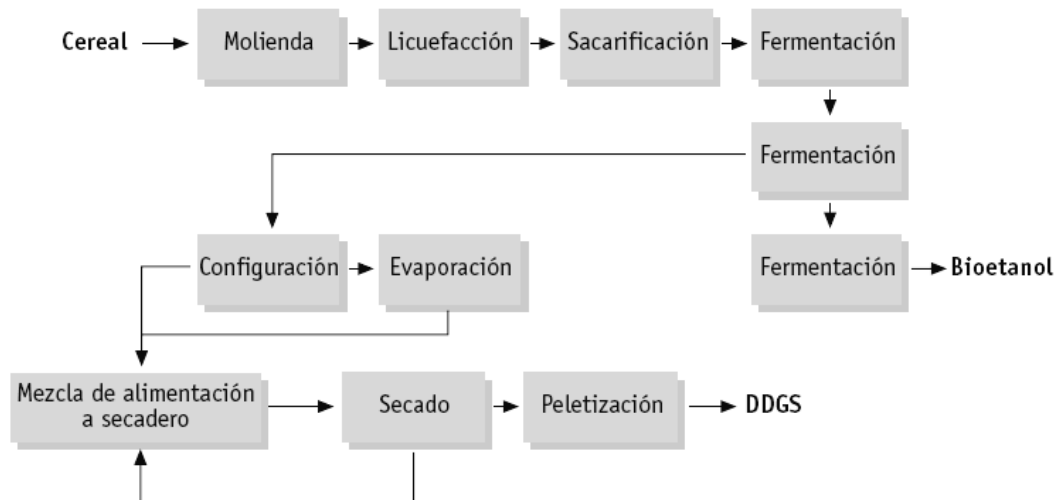
Fase 1.- Pre tratamiento. El proceso consiste en limpiar y moler los granos de cereal hasta reducirlos a finas partículas mediante un sistema mecánico. Se produce una harina con el germen, la fibra y la fécula de la semilla.

Fase 2.- Obtención de azúcares. La harina es hidrolizada o convertida en sacarosa usando enzimas o una disolución ácida de forma que obtenemos una solución azucarada.

Fase 3.- Fermentación. La mezcla es enfriada y se le añade la levadura para que comience a fermentar.

Fase 4.- Destilación. Una vez obtenido el alcohol, tras la fermentación, se obtiene un subproducto que se puede utilizar como alimentación para ganado. Se trata de granos secos, solubles, de destilería que se distribuyen en forma de pellets, su nombre procede del inglés; DDGS, Dried Distiller Grains of Solubles.





Fuente: Fuente: *Biocarburos líquidos: biodiésel y bioetanol*, CINTTEC – Universidad Rey Juan Carlos, 2006
 Proceso de molido seco

Producción de bioetanol a partir de la biomasa.

Las celulosas procedentes de la biomasa no pueden ser fermentadas directamente, es necesario convertirlas en azúcares más sencillos para su conversión en alcohol.

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 dificultar el proceso de fermentación.

Fase 1.- Pre tratamiento. Acondicionamiento y trituración de la materia prima.

Fase 2.- Obtención de azúcares. La conversión de la celulosa en azúcares sencillos se realiza mediante hidrólisis, proceso que divide la molécula de celulosa por la acción de la molécula de agua. Existen diferentes tipos de hidrólisis dependiendo del agente utilizado y de la temperatura de trabajo:

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 100°C. El gel producido en este proceso se prensa para obtener la mezcla de ácido y azúcar, que finalmente son separados. Este es un proceso del que se obtienen rendimientos muy elevados pero a un coste igualmente muy elevado, por lo que no se realiza industrialmente.

Hidrólisis con ácidos diluidos. Es uno de los procesos de hidrólisis más antiguos, simples y eficientes para la producción de 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 precolación.

Hidrólisis enzimática. El proceso consiste en descomponer la celulosa y hemicelulosa del residuo en azúcares sencillos y transformarlos en etanol por fermentación. La descomposición

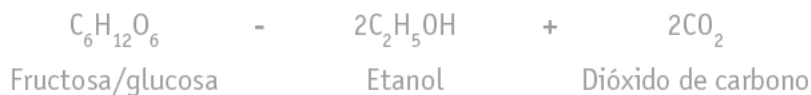


de la celulosa y hemicelulosa se lleva a cabo mediante la acción de determinadas enzimas complejas especializadas en descomponer celulosa, transformándola en glucosa. Estas enzimas se conocen con el nombre de celulasas. Estos azúcares ya pueden ser fermentados por levaduras o bacterias para producir etanol. Como paso previo a la actuación de las enzimas, se realiza un pretratamiento del residuo cuyo objetivo es alcanzar los mejores resultados en las etapas siguientes (hidrólisis y fermentación). Gran parte del coste total del proceso recae sobre esta primera etapa. Como resultado del pretratamiento se obtienen 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 mayores rendimientos, no necesita utilizar agentes químicos y menores costes de equipamiento, debido a que se realiza a presión atmosférica y a temperatura próxima a la ambiental.

Fase 3.- Fermentación. Fermentación por levadura de los azúcares obtenidos en la hidrólisis. La enzima invertasa, actúa como catalizador ayudando a convertir los azúcares en glucosa y fructosa. La reacción química es la siguiente:



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



Un avance muy importante en este proceso es 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. 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.

Fase 4.- Destilación. Proceso general. Separación del alcohol por evaporación. Este proceso también es común para todas las tecnologías. El alcohol producido por la fermentación 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 tienen un punto de ebullición menor (78.3°C) que el agua (100°C), la mezcla se calienta hasta que el alcohol se evapora, tras la separación, el alcohol vuelve a ser condensado.

Fermentación discontinua

Una fermentación discontinua (en batch) puede ser considerada como un "sistema cerrado". Al inicio de la operación se añade la disolución azucarada y se inocula con el microorganismo, permitiendo que se lleve a cabo la incubación en condiciones óptimas de fermentación. A lo largo de toda la fermentación no se añade nada, excepto oxígeno (en forma de aire), un agente antiespumante y ácidos o bases para controlar el pH.



Fermentación alimentada (fed-batch)

En los procesos convencionales discontinuos que acabamos de describir, todos los sustratos se añaden al principio de la fermentación. Una mejora del proceso cerrado discontinuo es la fermentación alimentada. En los procesos alimentados, los sustratos se añaden escalonadamente a medida que progresa la fermentación.

Fermentación continua

En la fermentación continua se establece un sistema abierto. La sustancia a fermentar se añade continuamente al biorreactor y una cantidad equivalente de solución utilizada de los nutrientes, con los microorganismos, se saca simultáneamente del sistema.

El objetivo fundamental de la industria de las fermentaciones es minimizar costes e incrementar los rendimientos. Este objetivo puede alcanzarse si se desarrolla el tipo de fermentación más adecuado para cada paso en particular. Por ejemplo:

El Fed-batch es el método más utilizado en Brasil y con este sistema se han observado incrementos en productividad entre el 10-14% de bioetanol. La forma en que el oxígeno es suministrado y el tipo de levadura usada (floculante o no floculante) en el sistema fed-batch es también de suma importancia.

El proceso continuo tiene las ventajas de bajos costos de construcción de los fermentadores, bajo mantenimiento, mejor control del proceso y altas productividad comparada con sistemas discontinuos (batch).

En Brasil, un 30% de las plantas de producción de bioetanol usan el sistema continuo. La mayor desventaja del sistema continuo es que las levaduras al estar expuestas por mucho tiempo bajo condiciones de ausencia de oxígeno, pierden capacidad para producir bioetanol.

6 NUEVAS MATERIAS PRIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCARBURANTES

Aprovechamiento integral de la biomasa de cardo (Cynara cardunculus) para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos.

Programa: Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Investigación.

Participantes: CIEMAT, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Rovira y Virgili.

El Proyecto contempla el desarrollo del cultivo energético de *Cynara cardunculus* L. desde la perspectiva del aprovechamiento integral de su biomasa aérea optimizando las aplicaciones finales, principalmente biocombustibles líquidos, biocombustibles sólidos y otros productos de interés económico. Se considera un sistema de cultivo perenne con cosecha anual de la biomasa aérea con diversas aplicaciones: por una parte las semillas oleaginosas, que presentan aptitud para la producción de biodiésel, y por otra, la biomasa lignocelulósica, cuya composición sugiere su aplicación como biocombustible sólido y otros usos como materia prima para la producción de bioetanol, tableros libres de resinas fósiles y biopolímeros. El Proyecto aborda la cadena total del cultivo, desde producción a uso final. Las grandes áreas de trabajo que se contemplan en el Proyecto son: Producción Vegetal, Biocombustibles líquidos, Biocombustibles sólidos y Química Aplicada.



Centro de estudios para el aprovechamiento del aceite de *Jatropha Curcas* para la fabricación de biodiésel (CEJATROP)

Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología (CYTED). Subprograma: Iberoeka.

Participantes: Bioenergética española 2020, S.L, biodiésel Perú Internacional S.A.C

El objetivo de este proyecto es la obtención de información tecnológica necesaria para el uso de *Jatropha curcas* como materia prima en el proceso de producción de biocombustibles, especialmente biodiésel, desde el proceso de producción de las semillas hasta el estudio de alternativas de posibles usos finales de los productos y subproductos obtenidos a lo largo del proceso, pasando por los procesos de recolección, extracción y transesterificación de los ácidos grasos.

El plan de trabajo consistirá en la identificación de diversos parámetros operaciones que permitan una evaluación técnico-económica del proceso como son:

Estudio para el desarrollo de cultivos de la especie vegetal *Jatropha curcas*, con evaluaciones bajo condiciones de campo del comportamiento agronómico de la especie. Así será necesario establecer las condiciones climáticas más propicias para su desarrollo junto con las características del suelo, época de siembra, marco de plantaciones o espaciamiento, labores de cultivo, enemigos naturales, necesidades de riego, fertilización, posibilidad de asociación con otros cultivos, propagación, etcétera.

Estudios sobre manejo, procesos de limpieza, transporte y condiciones de almacenamiento. Así como de los procesos de extracción del aceite procedente de la semilla *Jatropha curcas*, ya sea por el empleo de técnicas de prensado mecánico únicamente o por combinación con extracción por solventes para aumentar los rendimientos en aceite. También se estudiarán procesos de extracción de la torta obtenida para retirar los compuestos tóxicos contenidos en la misma y así facilitar su incorporación al mercado agropecuario y/o biotecnológico.

Estudios para la correlación y establecimiento de los parámetros de calidad del aceite obtenido de las semillas de *Jatropha curcas* cultivado para su uso en la producción de biodiésel.

Conocimiento de las condiciones de manejo, transporte y almacenamiento para evitar las degradaciones principalmente oxidativas del aceite extraído por la aplicación de antioxidantes y/o atmósferas inertes que aseguren la calidad de esta materia prima.

Estudio para la producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas* mediante la realización de pruebas de transesterificación con metanol y diferentes catalizadores para la determinación de rendimientos de productos y la calidad de los mismos. Así como de pruebas de pretratamiento y acondicionamientos previos a la transesterificación, como pruebas de filtrado de impurezas, secado y neutralización de ácidos grasos libres.

Realización de pruebas para la determinación de las condiciones de manejabilidad, operación y uso del biodiésel obtenido por la transesterificación de los ácidos grasos del aceite de *Jatropha*. Para ello se realizarán ensayos donde se determinen las características de biocombustible obtenido como densidad, viscosidad, punto de inflamación, índice de acidez, índice de yodo, punto de enturbiamiento, punto de fluidez, número de cetano, estabilidad a la oxidación... y el resto de parámetros necesarios para la caracterización de este producto.

Además se determinarán las condiciones de mezclado con otros compuestos biodiésel obtenidos de otras variedades vegetales que mejoren y proporcionen productos de las



características deseadas y necesarios para maximizar los rendimientos de los motores en los que van a ser empleados.

Estudio para la obtención y evaluación de alternativas para el aprovechamiento de la glicerina generada en el proceso de fabricación de biodiésel obtenido a partir de *Jatropha curcas*.

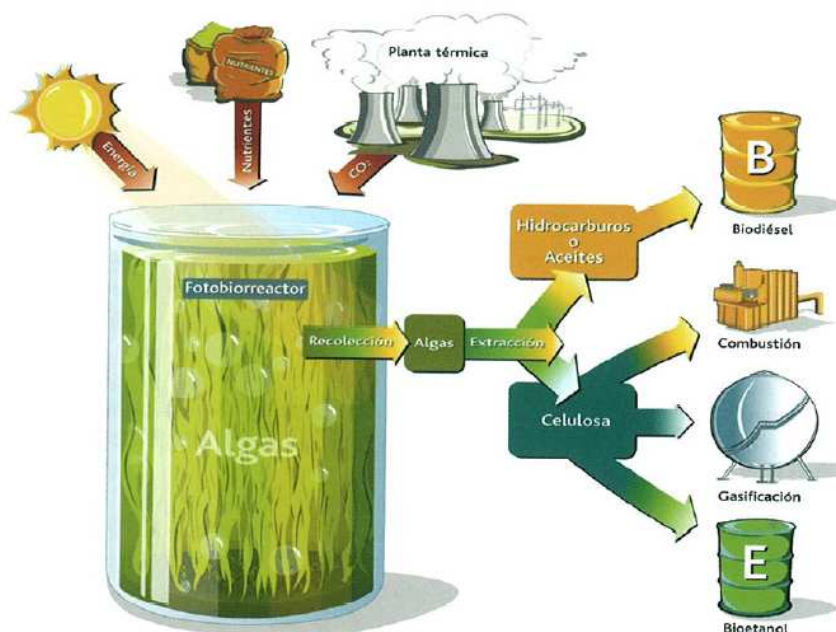
6.1.1.1 MATERIALES CON ELEVADA CAPACIDAD DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO Y DE AHORRO ENERGÉTICO. LAS MICROALGAS

Según estudios previos de laboratorio, las algas podrían llegar a alcanzar unos rendimientos de producción superiores en 50 veces a los cultivos tradicionales, con el consiguiente ahorro energético y de emisiones de gases efecto invernadero.

Estos estudios se encuentran todavía en una fase inicial de desarrollo temprana para demostrar su efectividad y viabilidad a escala industrial.

Las algas, como todos los vegetales, necesitan para desarrollarse tres componentes esenciales: luz, anhídrido carbónico y agua. A través de la fotosíntesis convierten en energía química la que captan de la luz solar, utilizándola posteriormente para convertir sustancias inorgánicas en hidratos de carbono, ácidos grasos, proteínas y vitaminas, destacando en esta función las algas unicelulares. En sus membranas contienen lípidos y ácidos grasos, productos de reserva y metabolitos.

El ciclo de las algas



Fuente: Física y Sociedad, Revista del Colegio Oficial de Físicos, 2008
 Ciclo de las algas



No es difícil encontrar algas de crecimiento rápido. Sí lo es, en cambio, seleccionar aquellas especies capaces de proporcionar una alta producción de aceite, más del 50% sobre su materia seca, y que al mismo tiempo no se contaminen fácilmente con especies indeseables, pues habitualmente las especies de mayor contenido graso no son precisamente las que se reproducen con mayor rapidez. Aunque no puede decirse que haya una especie de algas que sea la mejor en cuanto a la obtención de biodiésel se refiere, sí puede afirmarse que las diatomeas y las algas verdes son las que resultan más prometedoras. En cualquier caso, lo más óptimo, es seleccionarla entre las especies locales y tener siempre en cuenta el medio en el que se pretenden cultivar.

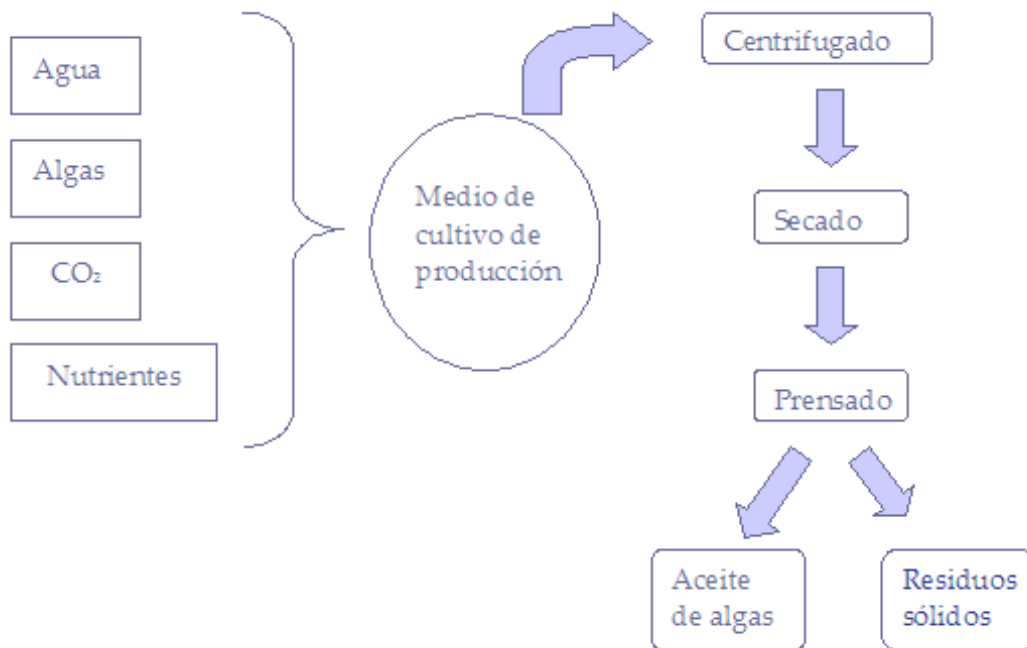
La infraestructura más elemental para el cultivo de algas la constituyen las balsas, habitualmente construidas en forma de canal. Las algas, el agua y los nutrientes circulan a lo largo del canal en el que una rueda de paletas asegura su flujo, manteniéndose las algas en suspensión. Son de escasa profundidad para que penetre hasta el fondo la luz del sol. Funcionan de forma continua, proporcionándose a las algas constantemente CO_2 y nutrientes mientras el conjunto del agua con las algas se va desplazando hacia el extremo opuesto de la balsa.

Un avance en la intensificación del cultivo consiste en cubrir las balsas con un invernadero, lo que supone una notable mejoría en el control de la temperatura del agua, del CO_2 y de la iluminación, por lo que se puede ampliar considerablemente la lista de especies cultivables. Así mismo, se alarga el período de cultivo, especialmente si se cuenta con calefacción, con el consiguiente incremento de la producción.

Finalmente están los llamados fotobiorreactores, que permiten el cultivo en un sistema cerrado que al mismo tiempo que dificulta la contaminación de las algas facilita el control de los distintos factores de producción. Existen varios tipos de fotobiorreactores según se construyan con tubos de plástico o de cristal, con tanques o con bolsas o sacas de plástico. Evidentemente, los fotobiorreactores exigen una inversión considerablemente más alta que las balsas pero su eficiencia y mayor productividad permiten una rápida amortización. Si se ubican en las proximidades de emisores de CO_2 y se pone este gas a disposición de las algas se obtiene una productividad mayor al mismo tiempo que se mejora el medioambiente. Independientemente del sistema de producción de algas, tras su generación hay que proceder a la cosecha (separación de agua y algas), ésta puede efectuarse mediante centrifugación o filtrado. En condiciones óptimas es posible cosechar cada 3, 4 ó 5 horas. Las algas pueden ser secadas al sol, mediante vacío, centrifugas o en invernaderos.

El alga seca retiene sus aceites que pueden extraerse mediante prensado y en combinación con solventes como hexano, benceno o éter. A partir de estos aceites extraídos se obtendrá el biodiésel. En ocasiones, los residuos sólidos obtenidos tras el prensado de las algas pueden ser ricos en almidón o azúcares, de modo que también se podría utilizar para la obtención de bioetanol. El gráfico siguiente muestra el modo de extracción del aceite de las algas.





Extracción del aceite de algas

El reto más importante para la producción sostenible de algas con alto contenido en grasas estriba en la selección de las especies y/o variedades óptimas para cada caso concreto. Se pueden cultivar algas con aguas muy diferentes: saladas, dulces, limpias, residuales, etc. También puede variar la temperatura del agua y la fluctuación de esa temperatura a lo largo del período de cultivo. Encontrar una respuesta para cada caso concreto exige un gran esfuerzo de investigación, especialmente en el campo de la biotecnología, y un desarrollo que garantice el éxito de las nuevas tecnologías.

7 CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD PARA BIOCARBURANTES Y BIOLÍQUIDOS

El sector de los biocarburantes ha motivado la mayor controversia experimentada, por una fuente de energía renovable jamás conocida hasta este momento. De ser inicialmente la mejor opción medioambiental, estratégica, económica y socialmente aceptada para la diversificación con fuentes renovables en el sector transporte, pasó a ser duramente cuestionada en todas y cada una de sus ventajas, en muchos casos con poco o nulo rigor científico.

La comisión europea siempre ha estado muy segura de la necesidad de fomento de los biocarburantes, aunque, consciente de la preocupación de que el desarrollo de determinados biocarburantes lleve aparejado consecuencias negativas para el medioambiente y el bienestar social, de tal magnitud que en ningún caso puedan ser asumibles su producción y uso.

Por ello, y de manera pionera para una fuente renovable e incluso para una commodity se han establecido unos criterios en directiva 2009/28/ce del parlamento europeo y del consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables para su producción, fabricación, transporte, almacenamiento y uso final, que garanticen la sostenibilidad del biocarburante. Dichos criterios deben ser cumplidos por los biolíquidos, para evitar que aquellos que no demuestren su sostenibilidad puedan ser empleados para contabilizar objetivos en usos eléctricos o térmicos.



Un gran desafío con el que se han encontrado las Instituciones Europeas ha sido establecer criterios de sostenibilidad para las materias primas procedentes de terceros países sin que éstos se traduzcan en barreras al libre comercio que incumplan las normas de la Organización Mundial del Comercio (OMC).

¿Para qué se exigirán los criterios de sostenibilidad?

La energía procedente de biocarburantes y biolíquidos que se tengan en cuenta para:

- evaluar el cumplimiento de los requisitos de la directiva 28/2009 en relación con los objetivos nacionales;
- evaluar el cumplimiento de las obligaciones de utilizar energías renovables;
- determinar la posibilidad de optar a una ayuda financiera al consumo de biocarburantes y biolíquidos.

¿Cuáles son los criterios de sostenibilidad?

1. Exigencias de reducción mínima de gases de efecto invernadero (GEI)
2. Protección de la biodiversidad
3. Protección de las reservas de carbono
4. Condicionalidad agraria
5. Consecuencias sobre la sostenibilidad social
6. sostenibilidad de otros usos energéticos de la biomasa

Estos criterios de sostenibilidad tendrán una repercusión directa sobre el proceso productivo de los biocarburantes desde el cultivo de la biomasa energética hasta su transformación en las plantas de producción y uso final.

7.1 CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Los biocarburantes y biolíquidos deberán reducir como mínimo un determinado % la emisión de GEI en comparación con los carburantes fósiles a los que sustituyen según la siguiente tabla:

CALENDARIO ESTABLECIDO	% MÍNIMO DE REDUCCIÓN DE GEI
26 de diciembre de 2009 (Entrada en vigor) 1 de abril de 2013 para plantas operativas anteriores a 23/01/2008	35%
1 de enero de 2017	50%
1 de enero de 2018 para plantas posteriores a 01/01/2017	60%

Este es el único criterio exigido a los biocarburantes procedentes de aceites usados, y grasas animales.



Protección de la biodiversidad

Los biocarburantes y biolíquidos no se producirán a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad, es decir tierras que a partir de enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías, con independencia de que sigan encontrándose en la misma situación:

- a) bosques primarios y otras superficies boscosas, es decir, bosques y otras superficies boscosas de especies nativas.
- b) zonas designadas por ley o por las autoridades competentes pertinentes con fines de protección de la naturaleza, o para la protección de las especies o los ecosistemas raros, amenazados o en peligro, a menos que se demuestre que la producción de tales materias primas no ha interferido con dichos fines de protección de la naturaleza;
- c) prados y pastizales con una rica biodiversidad:
 - naturales, es decir, prados y pastizales que seguirían siéndolo a falta de intervención humana.
 - no naturales, es decir, prados y pastizales que dejarían de serlo a falta de intervención humana, que son ricos en especies y no están degradados, salvo que se demuestre que la explotación de las materias primas es necesaria para preservar su condición de prados y pastizales.

Protección reservas de carbono

Si las zonas con grandes reservas de carbono, en el suelo o en la vegetación, se reconvierten para cultivar materias primas para producir biocarburantes y biolíquidos, una parte del carbono almacenado se liberará normalmente a la atmósfera, formando dióxido de carbono.

Para impedirlo Los biocarburantes no se fabricarán a partir de materias primas procedentes de tierras que en enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías pero que ya no se encuentran en dicha situación:

- A) Humedales,
- B) Zonas arboladas continuas, es decir tierras con una extensión superior a una hectárea, con árboles de una altura superior a cinco metros y una cubierta de copas superior al
 - 30 %.
 - 10 % y el 30 %, salvo si se aportan pruebas de que las reservas de carbono de la zona en cuestión antes y después de la conversión son tales que cumplen las condiciones establecidas de mantenimiento de reservas de carbono.
- C) Turberas, a no ser que se aporten pruebas de que el cultivo y la recolección de esta materia prima no implican el drenaje de suelos no drenados con anterioridad.

Condicionalidad agraria:

Las materias primas agrarias obtenidas en la comunidad deben de cumplir los mismos requisitos de buenas condiciones agrarias y medioambientales exigidas a los cultivos agrícolas de la política agraria comunitaria (condicionalidad agrícola)

Sostenibilidad social:

La Comisión, deberá estudiar el impacto de la demanda de biocarburantes sobre la sostenibilidad social de la Comunidad Europea y en terceros países, y el impacto de la política



Europea de biocarburantes sobre la disponibilidad de productos alimentarios a precios asequibles, especialmente en los países en vías de desarrollo.

Para ello la Comisión deberá remitir un informe al Consejo y Parlamento Europeos cada dos años y a partir de 2012, que deberá incluir información sobre si los principales países productores de materias primas han ratificado e implementado toda una serie de tratados internacionales sobre los derechos de los trabajadores. Sobre estas cuestiones, la Comisión deberá proponer acciones correctivas, en caso que sean necesarias

Asimismo, respecto a los terceros países que constituyan una fuente importante de biocarburantes o materia prima la comisión emitirá un informe cada dos años respecto a los criterios de sostenibilidad adoptados por dichos países para proteger suelo, aire y agua. El 1º informe será en 2012

Sostenibilidad de la biomasa para usos energéticos

La Comisión propondrá en su caso, sobre los requisitos de un sistema de sostenibilidad para los usos energéticos de la biomasa, distintos de los biocarburantes y biolíquidos. Hasta la fecha se ha realizado un informe en el que por el momento no se determina la necesidad de llevarlo a cabo por el momento

7.2 VERIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD PARA BIOCARBURANTES Y BIOLÍQUIDOS

Los Estados Miembros requerirán a los agentes económicos que demuestren el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad a través de un sistema de balance de masas y una auditoría independiente. Dicho sistema deberá cumplir que:

- Permita mezclar las partidas de materias primas o biocarburantes con características diferentes de sostenibilidad;
- Exija la información relativa a las características de sostenibilidad ambiental y al volumen de las partidas a que se refiere el punto anterior para que permanezcan asociadas a la mezcla.
- Prevea que la suma de todas las partidas retiradas de la mezcla tenga las mismas características de sostenibilidad, en las mismas cantidades, que la suma de todas las partidas añadidas a la mezcla.

Con el objetivo de aliviar la carga económica y burocrática que este sistema de certificación puede suponer, la directiva permite a la Comisión declarar acuerdos bi o multilaterales con terceros países que contengan disposiciones sobre criterios de sostenibilidad equivalentes a los de la directiva 28/2009. De esta manera la Comisión podrá decidir que estos acuerdos demuestran que los biocarburantes producidos a partir de materias primas cultivadas en estos países cumplen los criterios de sostenibilidad ahorrando a los productores la carga burocrática y económica de tener que certificar su biocarburante.

Asimismo la Comisión podrá decidir que esquemas voluntarios, nacionales, multinacionales o internacionales, que establecen estándares para la producción sostenible de biomasa o para el cálculo de emisiones de GEI contienen información suficiente para demostrar que los biocarburantes producidos bajo estos esquemas cumplen con los criterios de la directiva. Varias compañías involucradas en la producción y comercialización de biocarburantes, se han



iniciado en el desarrollo de sistemas de certificación. Mientras que las naciones y organismos internacionales tienden a tener una visión más amplia de la certificación, las iniciativas de compañías privadas tienden a centrarse en sus sectores de actividad a la hora de definir criterios y principios.

Las compañías están canalizando sus esfuerzos de certificación mediante la colaboración. Proyectos desarrollados Abengoa, por el grupo de trabajo holandés como el RSPO (*Roundtable on Sustainable Palm Oil*) o el RSB (*Roundtable on Sustainable Biofuels*), son un buen ejemplo de ello. British Petroleum (BP) por ejemplo, ha colaborado con el Gobierno de Reino Unido en la formulación del RTFO (Renewable Transport Fuel Obligation) y participa en el Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB). Electrabel, compañía de energía Europea, ha desarrollado una certificación para sus importaciones de biomasa. Esta certificación debe ser cumplida por sus suministradores y verificada por la compañía certificadora SGS.

Las empresas y compañías entienden que la certificación de criterios y principios implica la participación y colaboración con todos los grupos de interés. A pesar de esta tendencia, algunas compañías continúan en la definición de estándares en solitario.

7.3 CÁLCULO DEL EFECTO DE LOS BIOCARBURANTES Y BIOLÍQUIDOS EN LAS EMISIONES DE GEI

Para el cálculo de las emisiones generadas por los biocarburos la directiva incorpora, en su anexo V, valores de reducción de emisiones GEI para los biocarburos, en función de la materia prima de la que proceden y del método de producción. Estos valores se incorporan bajo el concepto de **valores típicos**.

No obstante, para incentivar una mayor eficiencia de los procesos productivos, la directiva añade los llamados **valores por defecto**, que resultan de aplicar una penalización del 40% en el balance de emisiones de la etapa de producción del biocarburo.

Así, el Anexo V se divide en tres secciones:

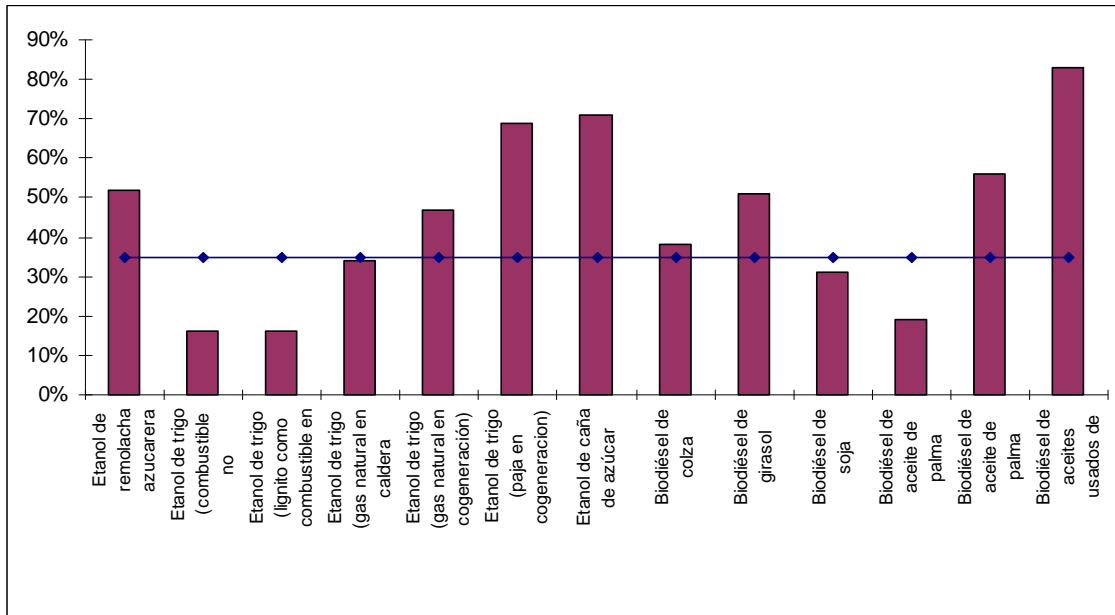
- A: una tabla general con los valores de reducción típicos y por defecto de cada tipo de biocarburo en función de la materia prima y proceso productivo
- B: la metodología para el cálculo real de emisiones en ciclo de vida;
- C: una tabla con los valores, típicos y por defecto, de emisiones para cada etapa del proceso de producción de cada biocarburo (cultivo, producción, y transporte y distribución.).

Los productores de biocarburos, para demostrar que alcanzan la reducción mínima exigida, podrán

- utilizar los valores por defecto
- calcular su balance real de emisiones en ciclo de vida
- calcular las emisiones de una etapa específica de su proceso.

El siguiente gráfico muestra los valores por defecto de reducción de GEI para los biocarburos usualmente comercializados en la actualidad





Ahora bien, solo será posible emplear los valores establecidos por defecto si las materias primas se cultivan fuera de la comunidad o en el caso de los aceites usados y grasas animales.

Esto quiere decir, que los biocarburantes fabricados con materias primas de la comunidad (nacional o andaluza) deberán calcular el valor real de las emisiones generadas por el biocarburante, al menos en la fase de producción agrícola.

