

APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

ARTURO ROMERO SALVADOR *

* Departamento de Ingeniería Química, Universidad Complutense de Madrid. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Valverde 22, 28004 Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

La carestía de los combustibles fósiles, la preocupación por su agotamiento, la protección ambiental (CO_2 principalmente) y la dependencia energética de países con escasos recursos energéticos convencionales impulsan el desarrollo de las energías renovables. Según la Agencia Internacional de la Energía, la energía renovable es la que deriva de procesos naturales que se reponen constantemente, es decir, la que se obtiene de las continuas corrientes de energía recurrentes en el entorno natural. El sol es el origen de la mayoría de las fuentes de energía renovable que están disponibles con abundancia y variedad para que la humanidad pueda utilizarlas. En nuestro planeta incide una cantidad de energía solar que es, aproximadamente, cuatro órdenes de magnitud mayor que nuestra actual tasa de uso de combustibles fósiles y nucleares. La radiación solar puede emplearse directamente para proporcionar calefacción, alumbrado y agua caliente en edificios; y para generar electricidad. El sol también mueve los sistemas climáticos mundiales y es por tanto la fuente indirecta de la energía hidráulica, eólica y mareomotriz. Como la fotosíntesis es un proceso que utiliza la energía solar para transformar dióxido de carbono y agua en carbohidratos, es la fuente subyacente de los biocombustibles en sus distintas formas.

Las plantas transforman la energía luminosa en energía química y retienen el dióxido de carbono para formar la biomasa. Toda la alimentación de las especies animales depende de un modo o de otro de esta biomasa. Además, puede utilizarse directamente

como materia orgánica en el tratamiento de suelos (por ejemplo, el uso de estiércol o de coberturas vegetales). La madera, residuos agrícolas y estiércol continúan siendo la fuente principal de energía y, en parte, de materias primas para muchas actividades en países poco industrializados. Sin embargo, en los países industrializados el petróleo y otros combustibles fósiles no sólo constituyen la principal fuente energética sino que también son los sustratos casi exclusivos de la industria química. Por ello, la biomasa, como base material de dicha industria, es también una alternativa potencial a los combustibles fósiles. Probablemente la viabilidad práctica de los combustibles derivados de la biomasa depende en gran medida de esta segunda aplicación. Idealmente las futuras biorrefinerías deberán abordar el procesamiento integrado de la biomasa para atender ambos usos, la obtención de combustibles y la de productos básicos para la industria química.

Tanto la propia biomasa como el bioetanol y el biodiesel obtenidos mediante su transformación tienen la ventaja de que pueden emplearse sin necesidad de introducir grandes modificaciones en los sistemas energéticos implantados para productos derivados de los combustibles fósiles. La biomasa puede usarse en lugar de carbón mineral en diversos tipos de instalaciones térmicas, paliando así el impacto ambiental de este combustible fósil. Lo mismo ocurre con el etanol y el biodiesel que pueden sustituir a gasolinas y gasóleos derivados del petróleo en distintos tipos de motores. Actualmente la biomasa proporciona una fuente de energía, adicional a la de combustibles

fósiles y a las otras fuentes disponibles, para obtener calor, electricidad y carburantes empleados en el sector transporte.

Al quemar una planta se devuelve a la atmósfera el CO₂ que había fijado previamente y por ello, este proceso no da lugar, a diferencia de lo que ocurre con un combustible fósil, a un aumento de este gas de efecto invernadero. Pero en la obtención de energía a partir de biomasa tienen lugar bastantes más procesos que pueden invalidar esta afirmación. Si la biomasa se quema después de cortarla con una herramienta a motor, recolectarla y transportarla en un tractor que funcione con energía fósil, acondicionarla y compactarla (astillas, pelets o briquetas) en una instalación industrial, distribuirla a gran distancia, habrá que tener en consideración las emisiones de CO₂ del tractor, del funcionamiento de la maquinaria de la instalación y del transporte, por lo que la operación energética real ya no merecerá, en parte o en absoluto, el adjetivo de renovable. En algunos casos, la operación puede occasionar una emisión de CO₂ superior a la que resultaría de consumir energía fósil y en otros, podría ocurrir que la aportación de energía para su obtención sea mayor que la obtenida en el lugar de destino a partir del producto derivado de la biomasa.

2. LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA

Con el nombre de biomasa se designa a un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza y composición, que puede emplearse para obtener energía. Esta fuente energética se basa en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o en los productos derivados de esta. En consecuencia, también tiene consideración de biomasa la materia orgánica de las aguas residuales, los lodos de depuradora y la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos, aunque dadas las características específicas de estos residuos se suelen considerar como un grupo aparte. La biomasa como materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, tiene carácter de energía renovable porque su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Al romper los enlaces de los

compuestos orgánicos, por combustión directa de biomasa o por combustión de productos obtenidos de ella mediante transformaciones físicas o químicas, para dar dióxido de carbono y agua como productos finales, se libera energía. La biomasa puede proporcionar energía mediante su transformación en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan, en general, biocombustibles y específicamente, a todos aquellos, generalmente sólidos y gases, que se aplican con fines térmicos y eléctricos.

El nombre de biocarburantes se reserva para los productos, normalmente líquidos, que proceden de la biomasa y se destinan a la automoción. Este tipo de productos tienen una importancia especial debido al gran consumo de carburantes derivados del petróleo para el transporte. Los actuales motores, Diesel y Otto, requieren combustibles líquidos cuyo comportamiento sea similar al del gasóleo y al de la gasolina.

Se utilizan diferentes criterios para clasificar los biocombustibles que pueden obtenerse a partir de la biomasa. Considerando el proceso de transformación de la biomasa en biocombustible, existen varias opciones como las que se comentan en los siguientes ejemplos. Únicamente transformaciones físicas antes de la combustión, caso de la madera, de la paja o de residuos procedentes de otras actividades que emplean biomasa (poda de árboles, restos de carpintería, etc.). Fermentación anaeróbica de una mezcla de azúcares y agua para obtener una mezcla de alcohol y agua con emisión de dióxido de carbono. Esta mezcla se destila para eliminar el agua y obtener el alcohol con la concentración de agua que exige su empleo como carburante. Transesterificación de los triglicéridos procedentes de aceites vegetales y grasas animales con metanol para obtener una mezcla de ésteres, previa separación de la glicerina, cuyo comportamiento como carburante es similar al diesel procedente del petróleo. Metanización de residuos orgánicos para obtener biogás y un sólido que puede utilizarse como abono de los suelos. Otro criterio clasifica los biocarburantes en generaciones lo que permite incluir en cada una de ellas varios elementos para establecer diferencias entre los distintos productos. Los biocarburantes de primera generación utilizan materias primas de uso alimentario (caña de azúcar, maíz, soja, girasol) y fermentación

(para obtener etanol) o transesterificación (para biodiesel) como tecnologías de proceso. Los de segunda generación utilizan materias primas de tipo herbáceo o leñoso (celulosa) en el caso de etanol y semillas oleaginosas no comestibles (jatrofa, cardo), algas y aceites usados para biodiesel, que se diferencian de la primera generación porque esta biomasa no tiene usos en alimentación. Los procesos empleados son la fermentación, la transesterificación, ambos adaptados a las nuevas materias primas, y métodos termoquímicos para la obtención de biocombustibles sintéticos líquidos. A los carburantes obtenidos a partir de cultivos bioenergéticos, cultivos específicamente diseñados o "adaptados" (técnicas de biología molecular) para mejorar la conversión de biomasa (p.e. árboles de menor contenido en lignina) en biocarburantes, se les denomina de tercera generación. Cuando a estos objetivos se suma la capacidad, tanto de la materia prima como del proceso de transformación, de mejorar la captura y almacenamiento de dióxido de carbono, se considera que los carburantes son de cuarta generación.

Ante la crisis de la energía fósil —carestía del petróleo, vulnerabilidad del suministro de estas materias primas o amenazas del calentamiento global— el empleo de la biomasa como fuente de energía aporta una serie de posibles ventajas como el balance positivo CO₂ y de energía, la utilidad de suelos anteriormente no productivos, la creación de empleo rural o las mejoras en la balanza de pagos de los países deficitarios en energía.

Cuando las emisiones de CO₂ (y las de otros gases de efecto invernadero) producidas como consecuencia del empleo de los biocombustibles con fines energéticos equivalen al carbono que previamente habían absorbido en el proceso de fotosíntesis, se igualan la retención y la liberación de dióxido de carbono equivalente. El uso de biomasa o de sus derivados puede considerarse neutro en términos de emisiones sólo si se emplea en cantidades a lo sumo iguales a la producción neta de biomasa del ecosistema que se explota. Tal es el caso de los usos tradicionales (uso de los restos de poda como leña, cocinas, calefacción, etc.) si no se supera la capacidad de carga del territorio.

En los procesos industriales, puesto que resulta inevitable el empleo de otras fuentes de energía (en la

construcción de la maquinaria, en el transporte de materiales, en el empleo de maquinaria agrícola durante el cultivo de materia prima, en la fabricación de fertilizantes y pesticidas, en las operaciones necesarias para las transformaciones, etc.), hay que contabilizar las emisiones producidas por cada una de ellas. Además, puede producirse la emisión de otros gases de efecto invernadero como óxido nitroso o metano, en cuyo caso hay que incluir su contribución como CO₂ equivale a las emisiones de este gas.

El balance neto de energía (BNE) de los biocombustibles, relación entre el contenido energético del producto y energía gastada en su producción, es muy variable e inferior al de los combustibles fósiles (valores de 50). Mientras que esta relación es elevada cuando se obtiene energía directamente de la biomasa (valores superiores a 10), disminuye significativamente cuando se trata de biodiesel (valores próximos a 2) y bioalcohol. Todos estos valores son orientativos porque dependen de la materia prima y de la tecnología empleada. Por ejemplo, el bioalcohol puede tener valores de 1,5 si procede de maíz, de 12 si se obtiene de caña de azúcar y superiores si procede de los azucres fermentables liberados de la pared celular.

El análisis de emisiones de CO₂ y del balance energético de los biocombustibles puede ampliarse a otros efectos ambientales como el impacto sobre la biodiversidad, el funcionamiento hidrológico o la protección del suelo. Debido a las dificultades e incertidumbres de estos estudios, existe una gran disparidad de conclusiones sobre el comportamiento ambiental de la biomasa. Las siguientes referencias (Fargione, 2008 y Searchinger, 2008) muestran resultados del balance energético y de los efectos ambientales del aprovechamiento de distintos tipos de biomasa.

La biomasa natural, leña procedente de árboles crecidos espontáneamente en tierras no cultivadas, ha sido utilizada tradicionalmente por el hombre para calentarse y cocinar. Sin embargo, este tipo de biomasa no es la más adecuada para su aprovechamiento energético masivo ya que es una reserva de valor incalculable para la humanidad. Al ser esta biomasa natural la base del consumo energético de muchos pueblos en vías de desarrollo, se produce un aumento de la presión sobre los ecosistemas naturales, llegando, al aumentar su población y demanda de energía, a un

sobreconsumo que puede ocasionar situaciones de desertización. En su lugar se pueden aprovechar, manteniendo el equilibrio y la estabilidad de los ecosistemas, los residuos de las partes muertas o los restos de podas y aclareos- evitando, además, posibles incendios de las masas forestales.

Cualquier proceso que utilice biomasa para obtener productos destinados al consumo generara biomasa residual. Las explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, industrias de productos vegetales y núcleos urbanos son generadores de biomasa residual. Su utilización es atractiva pero limitada; en general, en el tratamiento de estos materiales es más importante el efecto ambiental que implica su gestión que su valorización energética. A pesar de ello, las instalaciones que aprovechan la energía de sus propios residuos tales como granjas, industrias papeleras, serrerías o depuradoras urbanas, pueden ser energéticamente autosuficientes.

Los cultivos energéticos, realizados con la finalidad de producir biomasa en lugar de producir alimentos (como ha sido la actividad tradicional de la agricultura) son una realidad en países como Brasil y Estados Unidos. Brasil orienta la producción de caña de azúcar hacia la obtención de bioetanol mientras que Estados Unidos cumple el mismo objetivo con el maíz. En Europa, el etanol procedente de remolacha o de cereales y los ésteres derivados de aceites de colza o de girasol constituyen los biocarburantes de mayor desarrollo. El excedente de tierras de cultivo hace atractiva una actividad agraria, adicional a la que tradicionalmente se destina a fines alimentarios, dedicada a la producción de energía. Los cultivos más prometedores a corto plazo son los de mayor productividad de biomasa lignocelulósica, eucaliptos, acacias, chopos, ciertas variedades de cardos, etc. También los excedentes de algunos productos agrícolas se destinan a su transformación en biocarburantes, aunque sólo por razones sociales o estratégicas o por el elevado precio de los carburantes, es rentable su empleo con fines energéticos.

A pesar de la gran variedad de materias primas que pueden emplearse para fabricar estos carburantes, la tecnología actual sólo los obtiene a partir de productos vegetales que también se utilizan en alimentación. Esta peculiaridad hace que la comercialización de los bio-

carburantes participe en dos mercados, cada uno de ellos suficientemente complejo, el agrícola y el energético.

3. BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Los biocombustibles sólidos más importantes, combustibles de tipo primario, son los constituidos por materiales lignocelulósicos procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen este tipo de residuos. La paja, los restos de poda de vid, olivo o frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son materia empleada en la elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario. Cáscaras de frutos secos, huesos de aceitunas y de otros frutos, residuos procedentes de la extracción del aceite de orujo en las almazaras, restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una materia prima de calidad para utilizarla como biocombustible sólido. Mediante la combustión de esta biomasa se obtiene energía que se aprovecha directamente como energía térmica o se transforma en energía eléctrica. El poder calorífico inferior, variable con la humedad del combustible, es la característica más representativa de su calidad. En la **tabla 1** se muestran valores del poder calorífico de algunas biomasas con distinta humedad. Otras características importantes para su comercialización son la densidad, la dispersión en el terreno y la distancia al lugar de aprovechamiento.

Aunque una parte importante de la biomasa se utiliza directamente, como por ejemplo la leña en hogares y chimeneas, las nuevas aplicaciones de los biocombustibles sólidos se basan en un tratamiento capaz de acondicionarla a los requerimientos de la demanda. Las formas más generalizadas de utilización de este tipo de combustible son astillas, serrín, pellets y briquetas.

Las astillas constituyen un material adecuado para ser empleado en hornos cerámicos, de panadería, viviendas individuales, calefacción centralizada de núcleos rurales o pequeñas industrias. Se obtienen a partir de los restos leñosos de los tratamientos silvícolas, de las operaciones de corte de madera o de las podas de árboles de cultivos leñosos. Cuando las astillas se van a utilizar en quemadores específicos

BIOMASA	SECA	10% Humedad	15% Humedad
Paja cereal	4.000	3.600	3.300
Sarmientos de vid	4.200	3.300	2.300
Ramas coníferas	4.600	3.600	2.500
Ramas frondosas	4.200	3.300	2.300
Cortezas coníferas	4.700	3.600	2.600
Cáscara de almendra	4.400	3.900	3.700
Cáscara de cacahuete	3.900	3.500	3.300
Serrín/viruta, conífera	4.900	4.500	3.800
Serrín/viruta, frondosas	4.700	4.300	3.600

Tabla 1. Poder calorífico inferior (kcal/kg) de distintos tipos de biomasa con varios contenidos de humedad.

(que necesitan inyectores, por ejemplo), es preciso moler la biomasa para obtener un combustible más fino y eliminar restos (arena, piedras, vidrios) que puedan acompañar al material hidrocarbonado.

Para aumentar la densidad de la biomasa se transforma en briquetas. Este biocombustible suele presentarse en forma de cilindros de 50 a 130 mm de diámetro y de 5 a 30 mm de longitud con una densidad entre 1.000 y 1.300 kg/m³. Su fabricación se realiza con prensas en las que el material se calienta y se somete a altas presiones con el fin de que en su interior se desarrolle procesos termoquímicos capaces de generar los productos adherentes que favorecen la cohesión del material. Este mismo objetivo se puede conseguir a menores presiones pero añadiendo adherentes. El serrín procedente de las industrias del mueble y la madera es un buen candidato para fabricar briquetas.

Los pellets son similares a las briquetas pero más pequeños. Estos cilindros se preparan con prensas de granulación, similares a las utilizadas para la fabricación de piensos para animales. La compactación se consigue de forma natural o mediante la adición de compuestos químicos que no contengan aquellos elementos que pueden originar problemas ambientales,

aparición de contaminantes en la corriente de gases de escape ajenos a los propios de la biomasa, durante el proceso de combustión. La materia prima, al igual que en el caso de las briquetas, debe tener poca humedad y baja granulometría. Este producto puede manejarse con facilidad y puede emplearse en instalaciones automatizadas de pequeño o mediano tamaño.

Otro grupo de biocombustibles sólidos lo constituye el carbón vegetal que procede de un tratamiento térmico de la biomasa leñosa en atmósferas de bajo contenido en oxígeno. Al ser el resultado de una alteración termoquímica de la biomasa primaria, se considera un biocombustible de naturaleza secundaria. El carbón vegetal se obtiene mediante la combustión lenta y parcial de biomasa leñosa con un cierto contenido en humedad a una temperatura variable entre 250 y 600°C. El poder calorífico del producto obtenido varía entre 6.000 y 8.000 kcal/kg, dependiendo del contenido en cenizas de la madera.

4. BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La denominación de biocombustibles líquidos o biocarburantes se aplica a una serie de productos de origen biológico utilizables como combustibles de sus-

tución de los derivados de petróleo o como aditivos de éstos para su uso en motores. Actualmente sólo son comerciales los de primera generación, etanol (y etil-terbutil éter obtenido a partir de él) y biodiesel. En ambos casos las materias primas de las que proceden tienen también uso alimentario. Evitar que la obtención de biocarburantes compita con las fuentes de alimentación y aprovechar la mayor parte del vegetal es la razón que guía el trabajo para disponer de biocarburantes de segunda generación. Tanto la ruta bioquímica como la ruta termoquímica ofrecen caminos apropiados para transformar el material lignocelulósico en productos destinados a sustituir los carburantes derivados de los combustibles fósiles para lo que es preciso superar varias dificultades antes de implantar esta tecnología.

4.1. Bioetanol

Las complejas moléculas orgánicas —azúcares, hidratos de carbono, celulosa, hemicelulosa, lignina— que sintetizan las plantas a partir de CO_2 , H_2O y nutrientes se concentran en la parte fibrosa. El bioetanol se obtiene por fermentación de los azúcares procedentes, principalmente, de caña de azúcar y maíz, siendo el biocarburante que se produce en mayor cantidad en el mundo. El producto resultante del proceso de fermentación de los azúcares contiene una gran cantidad de agua que es preciso eliminar para poder utilizarlo como carburante.

Se emplean tres familias de materias primas para la obtención del etanol. Azúcares procedentes de la caña o de la remolacha. Almidones procedentes de cereales como maíz, cebada o trigo. Celulosa y hemicelulosa procedentes del material lignocelulósico de los vegetales. En la **figura 1** se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención de bioetanol, en el que pueden observarse las etapas específicas y las comunes a los productos de las tres familias.

Las sustancias azucaradas liberan fácilmente los azúcares fermentables. La caña de azúcar se transforma en azúcares solubles en agua (jugo de caña) y lignina insoluble (bagazo) que se emplea como combustible sólido. La remolacha azucarera también libera los azúcares en contacto con agua, quedando un residuo que puede destinarse a la alimentación animal o a la obtención de productos químicos.

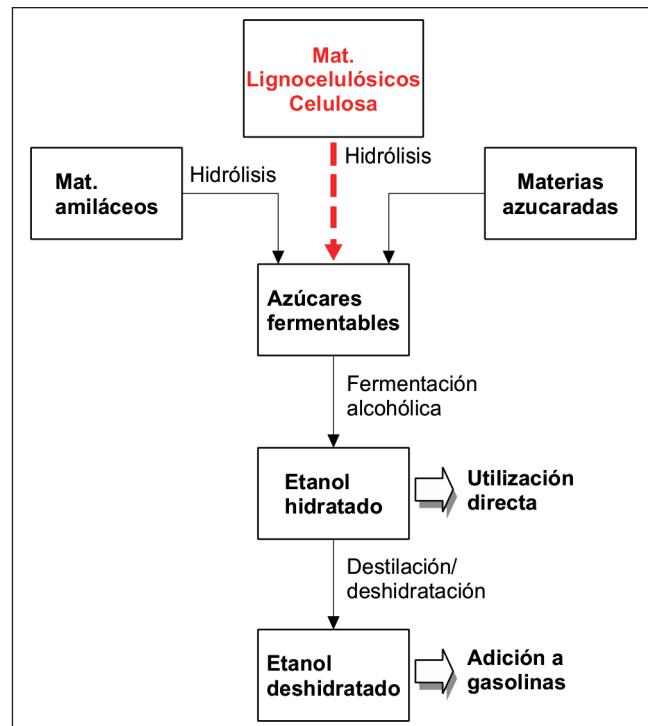


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de obtención de bioetanol a partir de diferentes materias primas.

El almidón es la principal sustancia de reserva de las semillas amiláceas que es preciso liberar y transformar en azúcares fermentables. En el proceso de molido en seco es preciso limpiar y moler los granos hasta reducirlos a finas partículas, harina, que contienen el germen, la fibra y la fécula del maíz. La harina se transforma por hidrólisis ácida o enzimática en una disolución azucarada que contiene sacarosa. El otro proceso empleado para liberar los azúcares es el proceso húmedo que se aplica en instalaciones con grandes producciones de bioalcohol. Con esta tecnología, la más empleada, se obtienen otros subproductos, sirope, fructosa, dextrosa, etc., además de la producción de alcohol. Mediante el tratamiento de maíz con agua caliente se logra ablandar el grano y se favorece la ruptura de las proteínas y la liberación del almidón; al moler el grano se obtiene el germen, la fibra y la fécula que se separan mediante las correspondientes operaciones para disponer de los polisacáridos del almidón. Por hidrólisis ácida o enzimática (gluco-amilasa) se obtiene glucosa que es un azúcar biodegradable.

Los componentes lignocelulósicos son los que ofrecen mayor potencial para la producción de bioe-

tanol. Una gran parte de los materiales con alto contenido en celulosa, susceptibles de ser utilizados para estos fines, se generan como residuos en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial. Los residuos de biomasa contienen mezclas complejas de carbohidratos, llamados celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa no se puede fermentar directamente; es necesario transformarla en azúcares más sencillos para su posterior conversión en alcohol. Tres son los principales métodos para extraer estos azúcares: la hidrólisis con ácidos concentrados, la hidrólisis con ácidos diluidos y la hidrólisis enzimática. Las complejas estructuras de la celulosa se van fragmentando por hidrólisis —con ácidos concentradas a baja temperatura, con ácidos diluidos a alta temperatura o mediante procesos enzimáticos— hasta obtener una solución que contiene azúcares fermentables, como glucosa, celobiosa o xilosa.

La última etapa del proceso consiste en la fermentación anaeróbica de las disoluciones azucaradas para transformarlas en etanol y dióxido de carbono:



la reacción es exotérmica (25,5 kcal) y permite obtener como máximo 0,51 kg de alcohol por kg de azúcar fermentado —el resto se libera como dióxido de carbono— aunque la concentración de alcohol en la disolución no puede superar los valores (12-15%) que son tóxicos para las levaduras.

Un avance muy importante en el proceso de obtención de etanol fue la realización simultánea de los tratamientos de sacarificación (transformación de celulosas y hemicelulosas en azúcares) y de fermentación. Este proceso reduce el número de reactores necesarios durante la producción y, más importante aún, evita el problema de la producción de agentes inhibidores asociados a los enzimas. A la vez que se libera el azúcar por vía enzimática, la fermentación lo transforma en alcohol. Este proceso se ha mejorado incluyendo la fermentación de múltiples sustratos de azúcar.

El alcohol producido por fermentación contiene una parte significativa de agua que debe ser eliminada para su uso como combustible. Dado que el etanol tiene un punto de ebullición menor (78,3°C) que el agua (100°C), se calienta la mezcla de fermentación

BALANCE ENERGÉTICO DE ETANOL A PARTIR DE MAÍZ

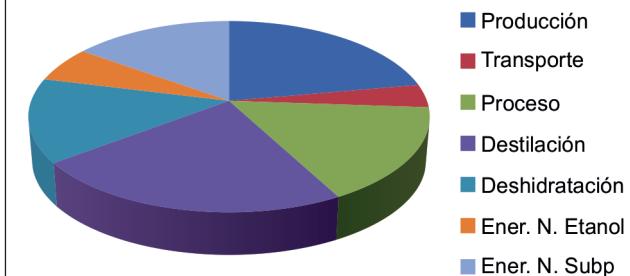


Figura 2. Balance energético de la producción de etanol a partir de maíz.

para evaporar y, posteriormente, condensar el etanol. Una de las claves en la economía de los procesos de obtención de bioetanol es la destilación y la deshidratación del producto destilado. Estas operaciones son responsables, en buena medida, del rendimiento energético del etanol. En un estudio hecho para el bioetanol a partir de maíz, se ha comprobado que sólo el 6% de la energía necesaria para obtener bioetanol corresponde a energía contenida en el carburante; el resto se pierde en las diferentes etapas del proceso. En la **figura 2** se muestra el balance energético de la obtención de etanol a partir de maíz. Como puede observarse, casi el 40% de la energía corresponde a la consumida en las operaciones de destilación y deshidratación, mientras que la producción de maíz apenas supera el 20% y el transporte de materias primas y distribución de etanol supone el 4%. También se observa que la energía neta de los subproductos es 2,5 veces mayor que la energía neta del etanol.

Los motores de explosión ciclo Otto pueden funcionar con mezclas de hasta el 25% de alcohol deshidratado sin que sea necesario realizar modificaciones significativas, aunque su rendimiento es diferente al que se obtiene con el combustible convencional. Para mezclas del 15% se produce una reducción del 2% de la potencia del motor, un aumento del 4% del consumo y un aumento de la corrosión en las partes metálicas y componentes de caucho. Sin embargo, si se emplea una mezcla del 20% y se ajusta el motor aumentando la relación de compresión y adaptando la carburación a la nueva relación estequiométrica, se consigue un aumento del 9% de potencia, una reducción del 7% de

consumo y una mejor combustión que se traduce en un menor índice de carbonización y menor emisión de gases reductores.

Brasil es el país que más ha experimentado con la mezcla de alcohol y gasolina llegando a aumentar su proporción hasta el 25%. Sin embargo, en la Unión Europea el límite máximo de etanol está limitado por la especificación del contenido en oxígeno de 2,7%, que equivale a no superar el 7,8% de etanol en el carburante. En algunos países europeos se utiliza normalmente una mezcla con 5% de etanol. Para reducir drásticamente la energía gastada en el proceso de destilación y deshidratación del bioetanol es preciso poder realizar la combustión de etanol en el motor con contenidos de agua superiores al 30%. Por ejemplo, en la destilación de un litro de etanol al 88% se necesita doble cantidad de energía que en la destilación de un litro de etanol al 60%.

Las dos principales barreras para el uso del bioetanol son la afinidad por el agua y la presión de vapor. Pequeñas cantidades de agua en las mezclas etanol-gasolina pueden dar lugar a la formación de dos fases, en cuyo caso se reduce el rendimiento del vehículo. El motor HCCI (Carga Homogénea Encendido por Compresión) es un híbrido entre los Diesel y los de gasolina que puede utilizar etanol con elevado contenido de agua. La combustión en este motor se realiza por compresión como en los Diesel, pero la mezcla del combustible con el aire tiene lugar fuera de la cámara de combustión como ocurre en los motores de gasolina de inyección indirecta. Aunque el etanol tiene una presión de vapor relativamente baja, cuando se utiliza como aditivo de la gasolina su presión de vapor efectiva es muy alta, llegando a un valor RVP (Reid Vapor Pressure) de 122 Kpa, lo cual representa una desventaja para su uso. La adición de etanol a una gasolina puede implicar la necesidad de reducir la cantidad de hidrocarburos de bajo punto de ebullición, como butanos o incluso isopentanos, para cumplir las especificaciones de presión de vapor.

Otra forma de utilizar bioetanol como carburante es transformarlo en un producto cuyas propiedades sean adecuadas para emplearlo como aditivo de la gasolina. Con la introducción de las gasolinas sin plomo —necesarias para el uso de catalizadores capaces de disminuir las emisiones de hidrocarburos, monóxido de

carbono o óxidos de nitrógeno— se vio afectado el número de octano de la gasolina. La necesidad de recuperar el octanaje y de reducir las emisiones contaminantes obligó a añadir aditivos oxigenantes tales como metanol, tercbutil alcohol (TBA) o metil-tecbutil éter (MTBE).

El etil-tercbutil éter (ETBE) se obtiene por reacción catalítica de isobuteno y etanol. En los últimos años este compuesto se está imponiendo sobre los otros aditivos por sus ventajas ambientales y por su comportamiento en el carburante. Las emisiones de este aditivo son menos perjudiciales para el medioambiente tanto por la menor cantidad de contaminantes emitidos —se reduce la emisión de monóxido de carbono y de hidrocarburos in quemados— como por el tipo de contaminantes minoritarios, el acetaldehído es menos tóxico que el formaldehído. El ETBE es mucho menos soluble en agua que el MTBE, lo que disminuye la posibilidad de contaminar el medio acuático. En el proceso de fabricación se utiliza una materia prima renovable, etanol, en lugar de emplear materias primas derivadas del petróleo como ocurre, actualmente, con el MTBE.

Las ventajas del ETBE frente a otros aditivos, MTBE y alcoholes, derivan de su menor contenido de oxígeno (15 frente a 18,2 en MTBE), menor poder corrosivo que los alcoholes, menor RVP (27 Kpa frente a 54 Kpa del MTBE y 122 Kpa del etanol), mayor poder calorífico, menor afinidad por el agua y mayor resistencia a la formación de dos fases que el MTBE, etc. Por estas razones su uso se está imponiendo en Europa, prevaleciendo sobre la mezcla de etanol con la gasolina. En España todo el etanol dedicado a la automoción es convertido a ETBE.

También puede emplearse el etanol como sustituto del gasóleo en motores Otto. El carburante conocido como E-diesel es una mezcla etanol-diesel (contiene hasta un 15% de etanol) que reduce perceptiblemente las emisiones de partículas y otros contaminantes y mejora el comportamiento en el arranque en frío. Actualmente se está desarrollando este carburante y se está trabajando para eliminar las principales barreras técnicas como el bajo punto de inflamación y la volatilidad en el tanque, la inestabilidad de la microemulsión que determina la separación en dos fases, etanol y diesel a bajas temperaturas, etc.

4.2. Biodiesel

La naturaleza de los aceites vegetales plantea una serie de inconvenientes, debidos principalmente a su elevada viscosidad, a la hora de utilizarlos directamente en los vehículos actuales. Es necesario realizar una serie de transformaciones en los motores convencionales, o bien utilizar motores Elsbett, para que los triglicéridos puedan emplearse como carburantes. Cuando no se introducen estos cambios se deben transformar los aceites en ésteres metílicos o etílicos y glicerina, con el fin de mejorar sus características como combustible. De esta manera se consigue que las moléculas de largas cadenas ramificadas iniciales, de elevada viscosidad, se transformen en otras moléculas de cadena lineal, de menor viscosidad y de características fisicoquímicas y energéticas más parecidas a las del gasóleo de automoción.

El biodiesel es un biocarburante líquido que está constituido por ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales y que se emplean en motores de ignición por compresión. Los ésteres más utilizados son los de metanol y, en mucha menor medida, etanol. El biodiesel es un combustible de automoción muy similar al gasóleo, lo que no ocurre con el aceite sin modificar. Por ejemplo, la viscosidad del los ésteres es dos veces superior a la del gasóleo mientras que la del aceite crudo es diez veces superior. Otras propiedades como índice de cetano, densidad o punto de infamación, son similares en ambos carburantes lo que permite utilizar el biodiesel puro o mezclado en distintas proporciones con el gasóleo de automoción en los motores convencionales. ASTM ha especificado distintas pruebas que se deben realizar a los combustibles para asegurar su correcto funcionamiento.

En la producción de biodiesel se ha utilizado aceite procedente de una gran variedad de semillas oleaginosas como el girasol y la colza (Europa), la soja (Estados Unidos) y el coco (Filipinas) y de frutos oleaginosos como la palma (Malasia e Indonesia). Por razones climatológicas, la colza se produce principalmente en el norte de Europa y el girasol en los países mediterráneos del sur, como España e Italia. La Política Agraria Común ha impulsado que las tierras de retirada se dediquen a la producción de este tipo de

materias primas. En nuestro país el uso de cultivos tradicionales con fines energéticos está condicionado por la producción de aceite por hectárea, normalmente demasiado baja para que el agricultor se interese por estos cultivos destinados a obtener materias primas para biocarburantes. Además de los aceites convencionales existen otras especies, más adaptadas a las condiciones del terreno en el que se desarrollan, que pueden ofrecer ventajas como cultivo energético.

Los aceites y las grasas procedentes de diferentes vegetales o animales se diferencian, principalmente, en los ácidos grasos que contienen: palmítico, oleico, linoleico, linolénico, etc. Dependiendo de la longitud de la cadena del ácido graso, del número de dobles enlaces y de su posición se obtendrán carburantes con diferente comportamiento. Las moléculas más largas hacen que aumente la viscosidad del aceite lo que implica una mayor dificultad de bombeo y atomización del combustible en los inyectores que se traduce en un descenso del rendimiento. La presencia de dobles enlaces mejora su comportamiento a bajas temperaturas pero son más sensibles al proceso de oxidación. Los ácidos grasos poliinsaturados tienen una elevada reactividad que es responsable de su tendencia a la polimerización y formación de gomas por oxidación durante el almacenamiento en los tanques y depósitos. El aceite de girasol se caracteriza por la elevada proporción de ácidos grasos insaturados por lo que se modifica genéticamente para reducir esta proporción y obtener un aceite, aceite de girasol de alto oleico, adecuado como materia prima para este fin.

La obtención de biodiesel se basa en la reacción de moléculas de triglicéridos (el número de átomos de carbono de los ácidos está comprendido entre 14 y 24, siendo el más habitual el de 18) con alcoholes de bajo peso molecular (metanol, etanol, propanol, butanol) para producir ésteres y glicerina. En la **figura 3** se muestra el diagrama de flujo del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales.

En una primera etapa se prensan las semillas calientes en presencia de un disolvente para separar el aceite de la torta. De este modo se logran rendimientos de extracción próximos al 100%. El aceite se trata para eliminar gomas, impurezas y sustancias en suspensión. La torta que se obtiene como subproducto tiene un alto contenido en proteína por lo que es posible su comer-

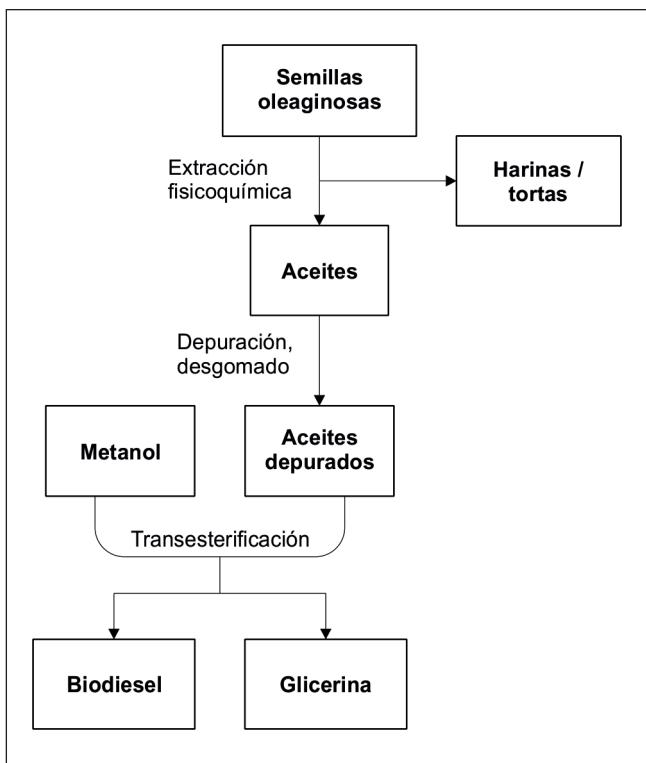
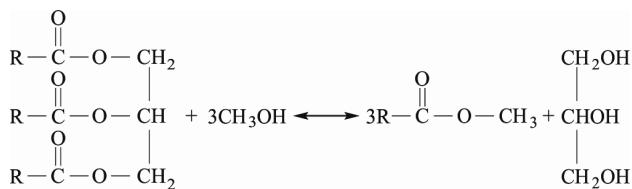


Figura 3. Etapas en la obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales.

cialización para alimentación animal, en cuyo caso se abaratan los costes del proceso de extracción.

El triglicérido es el principal componente del aceite vegetal o de la grasa animal y debe transformarse en ésteres de ácidos grasos y glicerina. La relación estequiométrica requiere tres moles de alcohol y un mol de triglicérido para producir tres moles de éster y un mol de glicerina,



Es decir, se necesitan unos 1000kg de triglicérido y 110 de metanol para obtener 1000kg de ester y 110kg de glicerina.

En la transesterificación se producen tres reacciones reversibles y consecutivas. El triglicérido se convierte en la primera reacción en diglicérido, en la segunda en monoglicérido y en la tercera en glicerina.

En cada una de estas tres reacciones se libera un mol de éster.

Como estas reacciones son reversibles es preciso desplazar los equilibrios hacia la derecha para lograr la transformación completa del triglicérido. Este objetivo se logra empleando un exceso de alcohol, por ejemplo una relación alcohol/éster 6:1 en lugar de la relación estequiométrica. De manera simultánea a la formación de los ésteres tiene lugar la de glicerina. Este coproducto de la reacción es inmiscible con los ésteres por lo que esta propiedad de la mezcla contribuye al desplazamiento, siempre que el exceso de alcohol no aumente la solubilidad de estos productos.

Estas reacciones de transesterificación son demasiado lentas en las condiciones de operación, es preciso aumentar la velocidad incorporando un catalizador a la mezcla de reactivos. Los catalizadores pueden ser básicos homogéneos (KOH, NaOH), ácidos homogéneos (H_2SO_4 , HCl, H_3PO_4), básicos heterogéneos (MgO , CaO , $\text{Na}/\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$), ácidos heterogéneos (zeolitas, resinas sulfónicas, SO_4/ZrO_2 , WO_3/ZrO_2), e incluso enzimas (lipasas). La mayor parte de los procesos comercializados utilizan catalizadores homogéneos básicos porque debido a su elevada actividad permiten operar en condiciones moderadas y tiempos de reacción cortos. Cuando se utilizan catalizadores ácidos se requieren temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos. Sin embargo, la utilización de álcalis tiene algunos inconvenientes debido a las potenciales reacciones secundarias de saponificación y neutralización.

Para evitar que se produzcan reacciones de saponificación es necesario que los triglicéridos y el alcohol sean anhidros ($<0,06\% \text{ v/v}$). El triglicérido en presencia de agua da lugar a la formación de jabones mediante la reacción de saponificación. Esta reacción está favorecida por hidróxido potásico o sódico —sus moléculas contienen los grupos OH responsables de esta reacción— la temperatura y concentración de catalizador. Este problema se reduce si se emplean alcoholes como catalizadores ya que sólo contienen el grupo OH como impureza y, por ello, no producen prácticamente jabones por saponificación.

También es necesario que los triglicéridos tengan una baja proporción de ácidos grasos libres con el fin

de evitar que reaccionen con el catalizador y formen los correspondientes jabones por neutralización. Unas veces se realiza la neutralización previa con NaOH y otras se eliminan los ácidos grasos libres mediante una reacción de esterificación con un catalizador ácido para formar los correspondientes ésteres.

De los diferentes alcoholes que pueden utilizarse para la transesterificación de los triglicéridos el metanol es el que se emplea en la mayor parte de las instalaciones, aunque no sea una materia prima renovable. Al mezclar el metanol o el etanol con los triglicéridos se forman dos fases por lo que es preciso, agitando la mezcla, aumentar la velocidad de transferencia de materia entre las fases y lograr que los reactivos estén en contacto. Durante la reacción se forma una emulsión, causada en parte por la formación de monoglicéridos y diglicéridos intermedios, que contiene grupos hidroxilo, que son polares, y cadenas de hidrocarburos, que son no polares, **figura 4**.

En la metanolisis esta emulsión desciende rápidamente al formar una capa rica en glicerina y otra, en la parte superior, formada por los ésteres metílicos. La formación de los ésteres etílicos es más difícil que la formación de los ésteres metílicos porque la inestabilidad de su emulsión complica mucho el proceso de separación de las fases y la purificación del producto final.

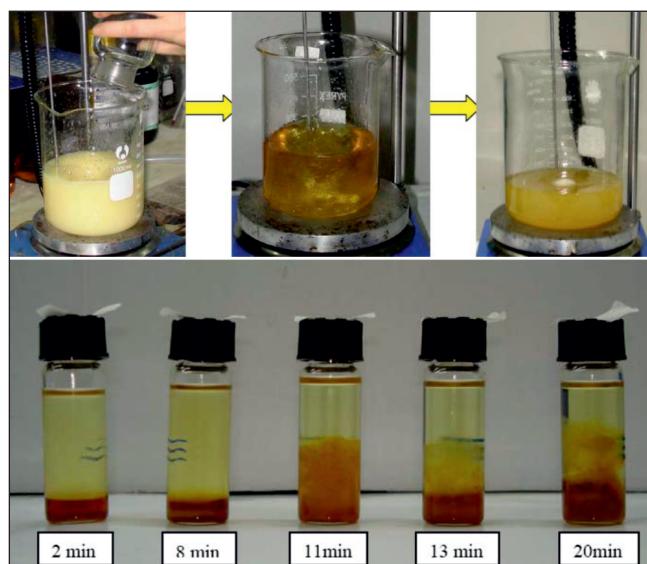


Figura 4. Evolución de la mezcla de reacción durante la transesterificación de un aceite de soja con metanol catalizada por hidróxido sódico.

La mayor parte del biodiesel procede de aceites vegetales, metanol y un catalizador alcalino. Sin embargo, hay muchos aceites de bajo coste y grasas animales que pueden servir como nuevas fuentes de triglicéridos. Estas materias primas alternativas contienen gran cantidad de ácidos grasos libres que causan el problema comentado anteriormente con los catalizadores alcalinos. En estos casos es preciso realizar la esterificación en dos etapas: inicialmente se efectúa un pretratamiento para convertir los ácidos grasos en ésteres metílicos con un catalizador ácido, y a continuación se realiza la transesterificación con un catalizador alcalino.

Aunque todos los procesos de producción de biodiesel tienen en común el comportamiento fenomenológico de la transesterificación, existen múltiples opciones de operación que son viables industrialmente. La elección de la tecnología se realiza en función de la capacidad de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol, catalizador, procedimiento de purificación del producto, etc. El proceso más simple es el discontinuo que suele operar a relaciones de 4:1 (alcohol/triglicérido). Son reactores con agitación mecánica para mezclar aceite, alcohol y catalizador, equipados con un condensador de reflujo, que operan en el intervalo de 25°C a 85°C de temperatura, habitualmente 65°C. El catalizador más utilizado es el hidróxido en concentraciones que varían entre el 0,3% y el 1,5% dependiendo de que sea hidróxido sódico o potásico. Cuando se aproxima el tiempo necesario para completar la reacción se reduce la agitación con el fin de facilitar la separación de fases. En los procesos continuos se utilizan uno o varios reactores tanque de mezcla completa diseñados para que la composición en el reactor sea prácticamente constante. La formación de fases y su evolución con el transcurso de la reacción de transesterificación permite diseñar un sistema de reactores mezcladores/sedimentadores en el que se produce la alimentación de reactivos—aceite y alcohol/catalizador—y la extracción de fases—la apolar en la que se encuentran los ésteres y la polar en la que encuentra la glicerina—de forma separada (en distintas unidades del sistema).

En la síntesis de biodiesel se forman los ésteres en una proporción del 90% y un 10% de glicerina. La glicerina es un subproducto que puede refinarse hasta lograr el grado farmacológico o emplearse de calidad industrial para distintas aplicaciones. Como su comer-

cialización forma parte de la viabilidad económica del biodiesel, la creciente oferta de glicerina está provocando una disminución del precio de venta y el consiguiente descenso de rentabilidad. Se deben buscar nuevas aplicaciones y procesos en los que se utilice la glicerina como materia prima de interés para la industria química con el fin de mejorar la economía de este biocarburante.

Los ésteres metílicos derivados de los aceites vegetales poseen unas características físicas y fisicoquímicas tan parecidas al gasóleo que permite mezclarlos en cualquier proporción y usarlos en los vehículos diesel convencionales, sin realizar modificaciones en el diseño básico del motor. Para garantizar el correcto funcionamiento del biodiesel es preciso contar con una especificación del carburante que se ofrece al público. La especificación vigente para estos combustibles se basa en la norma europea EN-590 transcrita a la legislación española en el Real Decreto RD398/1996. El biodiesel mezclado con gasóleo se ha extendido en Europa desde los últimos 10-15 años como combustible de automoción. Comparando estas mezclas con el gasóleo, se observan ventajas ambientales derivadas de la reducción de emisiones de monóxido de carbono, partículas, hidrocarburos, dióxido de carbono, óxidos de azufre, de la biodegradabilidad (98,3% en 21 días) y de la toxicidad. Las ventajas técnicas se deben a su mayor poder lubrificante —con lo cual se alarga la vida del motor y se reduce el ruido— y al mayor poder disolvente —evita la producción de carbonilla, la obstrucción de los conductos y mantiene limpio el motor— y los inconvenientes, a su punto de congelación y a su poder disolvente que afecta a la duración de los filtros.

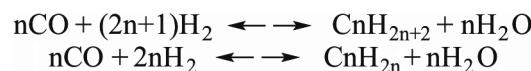
4.3. Otros biocarburantes líquidos

Los carburantes de primera generación, bioetanol y biodiesel, son válidos para sustituir a los carburantes derivados del petróleo pero dependen de materias primas que se utilizan con fines alimenticios y, además, en su fabricación sólo aprovechan una pequeña parte de la biomasa. Para que los carburantes derivados de la biomasa tengan una contribución significativa al consumo energético del transporte por carretera es necesario obtenerlos a partir de sus principales constituyentes, celulosa y lignina.

La pirolisis es un tratamiento de la biomasa a elevada temperatura y en ausencia de oxígeno que permite obtener productos gaseosos y líquidos de elevado poder calorífico. Se denomina bio-oil al producto líquido obtenido por pirolisis rápida de la biomasa, a baja temperatura (450-550°C), con elevada velocidad de calentamiento (1.000-10.000 K/s), pequeños tiempos de residencia (<1s) y alta velocidad de enfriamiento de los gases que salen del reactor. El bio-oil es un líquido marrón constituido por agua (25%) y compuestos oxigenados (45-50% de oxígeno) formados por despolimerización y fragmentación de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Además de polar, es un producto inestable debido a la reactividad de sus constituyentes. Puede considerarse una microemulsión de productos de descomposición de la lignina en una disolución acuosa de otros compuestos orgánicos formados en la pirolisis. La composición es compleja y depende del tipo de biomasa, de la tecnología utilizada y de las condiciones de operación.

El bio-oil tiene varias dificultades para que pueda utilizarse directamente como combustible: elevado contenido en agua, bajo poder calorífico, bajo índice de cetano, elevada viscosidad, acidez e inestabilidad (Mohan, 2006). Para sus aplicaciones como carburante o materia prima es necesario disponer de técnicas analíticas normalizadas que permitan su caracterización para estos fines.

La síntesis de Fischer-Tropsch es un proceso catalítico, conocido desde los años 20 del pasado siglo, que transforma el gas de síntesis (CO e H₂) en una mezcla de hidrocarburos líquidos de la que puede obtenerse gasolina y gasóleo. Las principales reacciones que conducen a la formación de estos hidrocarburos son:



Estas reacciones van acompañadas de una serie de reacciones secundarias que dan lugar a la aparición de metano, carbono, alcoholes, etc.

El resultado de la transformación es una mezcla de hidrocarburos cuya naturaleza y proporción dependen del procedimiento empleado, del sistema catalítico y de las condiciones de en la que se efectúa la transformación (Liu, 2011) Normalmente, este producto se somete a una etapa de hidrotratamiento para que

cumpla las especificaciones del mercado. Es un procedimiento empleado industrialmente con gas de síntesis procedente de carbón o de gas natural. El gasoil sintético obtenido con el método Fischer-Tropsch tiene el comportamiento ambiental de un biocarburante si el gas de síntesis procede de la biomasa.

5. BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS

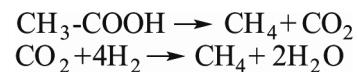
A partir de la biomasa se pueden obtener varios combustibles gaseosos como biogás, gas de gasógeno y gas de síntesis e hidrógeno. El hidrógeno es un vector energético que se presenta como una alternativa a la estructura energética actual debido fundamentalmente a sus ventajas ambientales y a su aplicación en pilas de combustible. Su combustión produce agua y una gran cantidad de energía (27.000 kcal/kg) por lo que resulta idóneo para múltiples aplicaciones industriales, domésticas y de transporte. La obtención de hidrógeno a partir de compuestos orgánicos se realiza mediante un proceso, denominado “reformado”, que consiste en romper las moléculas hidrocarbonadas mediante reacciones con vapor de agua en presencia de un catalizador. Este combustible, hidrógeno, presenta importantes problemas logísticos debido a su inflamabilidad y baja densidad. La alternativa de licuar el gas tropieza con el elevado consumo energético y las grandes inversiones necesarias para la distribución directa. Debido a que su utilización se justifica fundamentalmente por razones ambientales, las fuentes de energía renovables constituyen la materia prima ideal para obtenerlo. Entre las moléculas orgánicas procedentes de la biomasa con posibilidades para ser fuente de hidrógeno, el bioetanol es la opción que presenta menores costes y mayor versatilidad. Es adecuado para satisfacer diferentes aplicaciones porque la generación de hidrógeno a partir de etanol puede oscilar entre pocos kW y varios MW. La producción de hidrógeno utilizando etanol in-situ como materia prima tiene la misma logística que la existente para los combustibles fósiles lo que supone un importante descenso de los costes de distribución del hidrógeno.

5.1. Fermentación anaeróbica: biogás

La digestión anaeróbica es un proceso empleado en la depuración de aguas residuales y efluentes orgánicos de industrias agrarias o de explotaciones gana-

deras. Este tipo de transformación se produce de manera espontánea en pantanos o fondos de lagunas y lagos en los que haya depósitos de materia orgánica. El metano, denominado “gas de los pantanos”, también se produce en los vertederos de RSU, pudiéndose extraer mediante perforaciones y redes de transporte adecuadas. La aplicación de este procedimiento a la biomasa da lugar a biogás, en cantidades de unos 300 m³ por tonelada de materia seca, con un poder calorífico de unos 5.500 kcal/m³. El biogás está formado principalmente por metano (55-65%) y CO₂ (35-45%); y, en menor proporción, por nitrógeno (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas). El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (9.500 kcal/m³). Para aumentar este parámetro es necesario eliminar todo o parte del CO₂ que le acompaña.

El proceso de fermentación anaeróbica de la materia orgánica se realiza en cuatro etapas en las que intervienen diferentes tipos de bacterias. En la etapa de hidrólisis, las bacterias hidrolíticas son responsables de degradar las complejas moléculas orgánicas en fragmentos más sencillos como ácidos grasos y glicerina de los lípidos, péptidos y aminoácidos de proteínas y monosacáridos de los polisacáridos. Sobre estos compuestos actúan las bacterias acidogénicas para transformarlos en ácidos de cadena corta (acético, propiónico, butírico, etc.), alcoholes, amoniaco, hidrógeno y dióxido de carbono. La tercera etapa, acetogénica, es responsable de la transformación de los productos intermedios de la etapa anterior (propiónico, butírico), que no pueden ser metabolizados por los organismos metanogénicos, en acético, hidrógeno y dióxido de carbono. En la última etapa, etapa metanogénica, unas bacterias transforman el ácido acético en metano y dióxido de carbono (el 70% del metano procede de esta vía) y otras, el dióxido de carbono e hidrógeno en metano y agua:



Esta cuarta etapa es la más lenta de las cuatro y controla la degradación anaeróbica, excepto en aquellos casos en los que hay partículas sólidas cuya hidrólisis es muy lenta.

Hay muchos factores físicos y químicos que afectan el comportamiento del proceso y que es

preciso controlar para conseguir una operación correcta. En el medio debe haber una relación adecuada de nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. Se puede operar en un amplio intervalo de temperatura siendo el mesofílico el más empleado por su menor sensibilidad a las variaciones de temperatura y porque compagina productividad con rendimiento energético. Los microorganismos que intervienen en cada una de las etapas operan en un intervalo óptimo de pH que es preciso controlar. Otras variables que deben valorarse y controlarse son: el contenido de sólidos que afecta a la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato, la presencia de inhibidores, como oxígeno, que dificultan la operación, la agitación que es responsable de la uniformidad de la mezcla, de la transferencia de materia gas-líquido, de la formación de espumas, de la sedimentación o de los agregados de bacterias, etc.

El biogás se puede utilizar en las mismas aplicaciones que el gas natural, generación de calor, de electricidad (principal destino), combustible para vehículos, para pilas o integrarlo en la red de gas natural, y lo mismo que éste se puede emplear como materia prima para la industria química. En el caso de los vertederos, su uso con fines energéticos tiene como ventaja añadida la combustión de metano y su transformación en CO_2 y agua. De esta forma se reduce el efecto invernadero (su potencial de absorción de la radiación infrarroja es muy superior al del CO_2).

Previamente a cualquiera de sus aplicaciones energéticas, el biogás debe someterse a un proceso de refinado cuya complejidad depende de su procedencia y de su uso. El objetivo de la purificación es la eliminación de ciertos compuestos que acompañan al metano en cantidades variables como CO_2 , SH_2 , NH_3 , H_2O , partículas sólidas, etc.

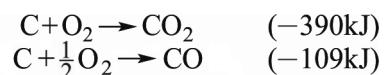
5.2. Gasificación: gas de síntesis

En la Segunda Guerra Mundial algunos países que no disponían de petróleo utilizaban la madera para transformarla en un gas que servía de carburante a los motores de gasolina. El equipo en el que se producía la gasificación de la madera se denominaba gasógeno, al gas resultante gas de gasógeno, y estaba formado por tres etapas: gasificación del sólido en un horno al que

se alimenta aire en una proporción muy inferior a la necesaria para la combustión completa; el gas de enfriá y se depura para eliminar cenizas volantes y alquitrances; y combustión del gas en un motor de explosión de gasolina con una relación aire/gas de 1/1, o en un motor de gas que opere bajo un ciclo Otto.

La gasificación es un proceso termoquímico que convierte un combustible sólido, por oxidación parcial a elevada temperatura, en un gas portador de energía. Al someter la biomasa a altas temperaturas y con defecto de oxígeno se producen reacciones de pirolisis, de oxidación y de reducción que originan productos gaseosos, N_2 , CO , H_2 ; CH_4 , CO_2 , cuyo poder calorífico es bajo (algo mayor de 1.000 kcal/ Nm^3) y su destino, la producción de calor por combustión directa en un quemador o la generación de energía eléctrica o mecánica por medio de un motor o una turbina. En la actualidad los procesos de gasificación avanzada, basados en sistemas de lecho fluidizado, son los más prometedores para la generación de electricidad con una alta eficiencia mediante a ciclos combinados de turbina de gas y ciclo de vapor. Para esta finalidad es muy importante la obtención de gases limpios.

En el proceso de gasificación tiene lugar un gran número de reacciones que determinan el comportamiento térmico, la composición del gas y las impurezas que acompañan a los compuestos mayoritarios. Por ejemplo, las reacciones exotérmicas:



son las principales responsables de aportar el calor necesario para compensar la absorción de calor de las reacciones endotérmicas más significativas:

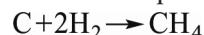


La reacción reversible



es la que establece la relación CO/H_2

Finalmente, reacciones del tipo:



son las responsables de la formación de impurezas.

El proceso de gasificación se puede llevar a cabo con aire, con oxígeno, vapor de agua, dióxido de

carbono o mezclas de estos gases. El empleo de aire y de oxígeno permite conseguir que el proceso sea auto térmico. Utilizando vapor de agua como agente de gasificación aumenta el contenido de hidrógeno y si se emplea CO₂ el contenido de CO. El empleo de estos gases requiere aporte energético en la gasificación de la biomasa y la necesidad de transformar los compuestos orgánicos condensables (“Tar”) que se forman como subproducto.

A la mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno con la que puede obtenerse diferentes productos —hidrocarburos, metanol, etanol, etilercbutileter— destinados a sustituir carburantes derivados del petróleo o a materias primas para la industria química, se denomina gas de síntesis. Su obtención y posterior transformación en combustibles, por ejemplo mediante la síntesis de Fischer-Tropsch, constituye un procedimiento de valorización de biomasa con fines energéticos.

6. CONCLUSIÓN

Los problemas que plantea el uso de combustibles fósiles para satisfacer la creciente demanda de energía han obligado a buscar otras fuentes de aprovisionamiento. Las sociedades deben hacer frente a la carestía del petróleo, la vulnerabilidad del suministro o las amenazas del calentamiento global y el agotamiento de

estos combustibles. La biomasa es un recurso renovable que se produce de forma descentralizada y su empleo con fines energéticos puede dar utilidad al suelo laborable que progresivamente se está dejando baldío. A partir de ella se puede obtener una gran variedad de productos que se adaptan a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Mediante procesos específicos se obtiene toda una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden utilizarse para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocina, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fargione, J. et al. (2008): “Land clearing and the biofuel carbon debt”, *Science*, 319, 1235-1238
2. Liu, G. et al. (2011): “Making Fischer-Tropsch Fuels and Electricity from Coal and Biomass: Performance and Cost Analysis”, *Energy&Fuels*, 25, 415-437
3. Mohan, D. et al. (2006): “Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review”, *Energy&Fuels*, 20, 848-889
4. Searchinger, T. et al. (2008): “Use of US croplands for biofuels increase greenhouse gases through emissions from land-use change”, *Science* 319, 1238-1240