

Máster Universitario en Energías Renovables Fundamentos de la Biomasa

Temario:

- Tema 1: Biomasa y energía.
- Tema 2: Fuentes de energía de la biomasa, (1): Residuos.
- Tema 3: Fuentes de energía de la biomasa, (2): Cultivos energéticos.
- Tema 4: Procesos de transformación, (1): Clasificación. Extracción directa.
- Tema 5: Procesos de transformación, (2): Procesos termoquímicos.
- Tema 6: Procesos de transformación, (3): Procesos bioquímicos.

Bibliografía:

- Jarabo, F. y otros;** *Energías renovables*, 2ª ed., S.A.P.T Publicaciones Técnicas, Madrid (2000).
- Jarabo, F. y otros;** *La energía de la biomasa*, 2ª ed., S.A.P.T Publicaciones Técnicas, Madrid (1999).
- Jarabo, F. y Fernández, J.;** *Energías alternativas renovables. ¿Un futuro para Canarias?*, Secretariado de Publicaciones, Universidad de La Laguna, La Laguna (1983).

TEMA 1: BIOMASA Y ENERGÍA

EL SER HUMANO Y LA ENERGÍA

De alguna forma toda la energía de que el ser humano ha dispuesto en el pasado y dispondrá en el futuro tiene un origen común: **la energía solar**.

Cuando se piensa en las energías alternativas para sustituir a los combustibles de origen fósil, generalmente lo primero que se tiene en cuenta es la posibilidad de utilizar la energía solar, ya que la cantidad total de energía que recibe la Tierra procedente del Sol supera en más de 10.000 veces la demanda energética total de la Humanidad.

Si bien esta cantidad de energía solar es considerable, si se tiene en cuenta la superficie total de la Tierra, se observa que su dispersión es muy alta, con lo que el principal problema a resolver, si se quiere utilizar la energía solar, es establecer sistemas que la concentren y la transformen en otro tipo que sea de fácil utilización para la actividad humana.

Hasta ahora la mayoría de los sistemas desarrollados por los seres humanos con este fin, si bien han representado un notable esfuerzo investigador, adolecen de unas perspectivas económicamente rentables para aprovechar la energía solar en forma masiva. Precisamente por ésto se está intentando volver al modelo básico de captación y acumulación de energía solar, seleccionado por la Naturaleza a lo largo de un proceso de evolución de más de 3.000 millones de años, manteniendo la vida en la Tierra hasta nuestros días: la fijación de la energía solar por las plantas verdes.

Esta forma de energía es la única fuente renovable que se almacena automáticamente, lo que la distingue de la energía solar directa, la eólica u otras que han de concentrarse y almacenarse artificialmente, a menudo con dificultad. Así pues, la materia orgánica constituye energía solar almacenada. La llamaremos **energía de la biomasa** y es precisamente la que se libera cuando se quema madera y la que proporciona alimento a los animales y al ser humano.

EL ORIGEN DE LA BIOMASA: LA FOTOSÍNTESIS

La formación de materia viva o **biomasa** a partir de la luz solar se lleva a cabo por el proceso denominado **fotosíntesis** gracias al cual se producen grandes moléculas de alto contenido energético (en forma de energía química), cuyo coste de almacenamiento es nulo y, en principio, sin pérdidas.

La originalidad de esta tecnología es el hecho de que *toma prestadas* del medio ambiente natural la energía (fotones de luz) y las materias primas consumidas (carbono, hidrógeno, nitrógeno, potasio y fósforo). La acción de construir unos *edificios ordenados* (macromoléculas de glucosa, principalmente) a partir de elementos suministrados en *desorden* por la naturaleza (carbono, hidrógeno, oxígeno) exige, de acuerdo a las leyes de la Termodinámica, cantidades muy importantes de energía, de las cuales, la mayor parte es *desechada a la atmósfera*. Pero, a pesar de que el rendimiento termodinámico de la fotosíntesis es particularmente bajo, la operación resulta, no obstante, *rentable*, debido a la gratuidad de la energía solar y de la *utilidad* de los productos finales (principalmente alimentos).

LA EFICACIA DEL PROCESO FOTOSINTÉTICO

En todo proceso de conversión energética un importante factor a considerar es el rendimiento con que éste tiene lugar, es decir, la fracción del total de energía incidente (energía solar) que queda convertida en la forma de energía de interés (energía de la biomasa).

Teniendo en cuenta las ecuaciones que gobiernan la fotosíntesis, se puede obtener el valor teórico del 1% como media para el caso de plantas de cosecha anual. Aunque el rendimiento del proceso de conversión biológica de la energía solar pueda parecer bajo, se ha de considerar que los sistemas vivos que captan y convierten la energía solar se encuentran ampliamente distribuidos sobre tierras y agua del planeta, cubriendo una enorme superficie y representando, pues, el único tipo de colector solar que, hoy por hoy, está repartido por toda la Tierra, operando a gran escala.

El que la superficie colectora sea tan extensa determina que, pese a la baja eficacia, la cantidad de energía almacenada anualmente por fotosíntesis sea inmensa. de hecho, unas diez veces más que el total de energía que consume actualmente la Humanidad.

A pesar del bajo rendimiento de conversión de la energía solar en energía de

la biomasa, la cantidad producida de ésta es lo suficientemente elevada como para constituir una fuente de energía utilizable. Sin embargo, aunque las cifras que se obtienen obedecen a estimaciones realistas, no deben conducir a un exagerado optimismo, puesto que para el uso de esta cantidad ingente de biomasa como fuente energética existen varias limitaciones.

Efectivamente, cerca del 40% de la biomasa que se produce en el mundo es de tipo acuático, localizada en los océanos y, por tanto, de difícil recolección. Por otro lado, de la biomasa terrestre, gran parte se encuentra muy dispersa, lo que hace que los costes energéticos de recolección y transporte restrinjan también el posible aprovechamiento de la biomasa producida en lugares relativamente alejados de los centros de utilización.

Finalmente, la existencia de vastos eriales, la extensión limitada de las zonas cultivables y el tipo de materias primas energéticas en que la civilización actual basa su funcionamiento, imponen serios condicionantes, tanto a la producción de biomasa aprovechable, como al estado en que ésta puede utilizarse.

A pesar de todo, mediante el desarrollo de una adecuada tecnología, parece evidente que podría utilizarse el potencial energético de la biomasa para cubrir un considerable porcentaje de la demanda energética actual.

LA BIOMASA Y SUS FORMAS

Como consecuencia de la actividad fotosintética de los vegetales, se forma una masa viviente que hemos denominado *biomasa*. Sin embargo, ésta es transformada posteriormente en los distintos niveles de seres vivos que conocemos. Por tanto, se puede hablar de **biomasa vegetal** cuando ésta se produce directamente como consecuencia de la fotosíntesis, mientras que aquella biomasa que producen los seres que no son capaces de elaborar los productos químicos sólo con la ayuda de la energía solar, es decir, que utilizan en su alimentación la biomasa vegetal, la podríamos denominar **biomasa animal**.

Así pues, en un sentido amplio del término, se puede definir como *biomasa* al conjunto de materiales orgánicos generados a partir de la fotosíntesis o bien evolucionados en la cadena biológica.

Los seres humanos y los animales utilizan sólo una parte de la biomasa a su

disposición, constituyendo el resto un residuo en gran medida no utilizado. Incluso en gran porcentaje de la parte utilizada es devuelta a la naturaleza como residuo. Tanto el primer caso, residuos de producción, como en el segundo, residuos de consumo o transformación, son fundamentalmente orgánicos, lo que permite definir el término **biomasa residual** como la originada de la forma expuesta.

Finalmente, a nadie se le oculta que lo que hoy se conoce como combustibles fósiles, carbón, gas natural y petróleo, no es otra cosa que biomasa (**biomasa fósil**), que se produjo en determinados períodos geológicos y, una vez enterrada, bien a través de mecanismos bioquímicos o bien por condiciones físico-químicas o por la conjunción de ambos tipos de acciones, generaron aquéllos.

Digamos como resumen que se puede definir el concepto de biomasa como *el conjunto de plantas terrestres y acuáticas; sus residuos o subproductos; los residuos o subproductos derivados de la transformación de dichas plantas, bien por los animales que se alimentan de ellas o por los procesos tecnológicos de las industrias alimentarias.*

LA TRANSFORMACIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA ÚTIL

La obtención de energía a partir de la biomasa puede conseguirse indirectamente mediante su transformación en productos industriales que sustituyan a otros, costosos en energía fósil, o directamente, utilizándola como combustible. En este último caso, que es el que nos interesa aquí, se presentan dos soluciones posibles:

Utilizar como fuente de biomasa los **residuos** agrarios, industriales y urbanos.

Utilizar como fuente de biomasa los denominados **cultivos energéticos**, es decir, cultivos o plantaciones destinados exclusivamente a producir energía en la forma mejor adaptada a sus características.

Una vez considerada la fuente de biomasa, se puede pensar en utilizarla para obtener energía útil.

Así, los métodos o procesos de tratamiento de la biomasa para su transformación en energía pueden clasificarse globalmente en tres grandes grupos:

- Procesos de extracción directa y modificación química

- Procesos termoquímicos o de vía seca.
- Procesos bioquímicos o de vía húmeda.

En principio, y prescindiendo de consideraciones técnico-económicas, todos estos procesos son aplicables a cualquier biomasa, pero es la naturaleza de ésta y su composición intrínseca la que condiciona su modo de tratamiento y los productos a obtener.

Aunque la biomasa puede contribuir al abastecimiento de energía (la historia lo demuestra y se conocen las principales técnicas que puede aplicarse para conseguirlo), se trata sólo de un complemento parcial en un esquema energético global, y sería un error pensar que sólo la biomasa fuera capaz de asegurar la autonomía energética. Por lo tanto, conviene ser relativamente prudente en relación con la utilización energética de la biomasa, ya que la explotación de esta fuente de energía está unida a condiciones económicas particulares.

En consecuencia, es preciso tener un pleno conocimiento de las posibilidades y de los límites de la biomasa como fuente de energía. Con este fin es indispensable mantener y perfeccionar las tecnologías que permitan su utilización para estar preparados para desarrollarlas rápidamente, cuando sea posible o a más largo plazo, si fuese necesario.

TEMA 2: FUENTES DE ENERGÍA DE LA BIOMASA, (1): LOS RESIDUOS

LOS RESIDUOS COMO PROBLEMA

Es de sobra conocido el hecho de que se producen diariamente ingentes cantidades de desperdicios, tanto en las ciudades como en las zonas rurales. Teniendo en cuenta que la mayor parte de estos residuos son de carácter orgánico, es decir, constituyen la denominada **biomasa residual**, se puede llegar a comprender el hecho de que las grandes cantidades de residuos que no se aprovechan y contaminan el ambiente puedan constituir un enorme potencial para la producción de energía.

En líneas generales, si se considera de forma conjunta toda la actividad humana, se puede estimar aproximadamente que se producen unas 2 toneladas de residuos de todo tipo por habitante y año, con un poder energético de unos 9.000 kW.h/año, equivalente a unos 800 litros de gasolina. Por otro lado, y con respecto a las basuras urbanas, es de destacar que cerca de la mitad de su peso está constituido por materia orgánica, y su producción media por habitante y año oscila entre los 600 y los 800 kg, con un valor energético de unos 2.500 kW.h/año. Obsérvese que una familia media gasta al año sólo en electricidad unos 3.000 kW.h.

TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS

El tratamiento de los residuos, en general, es una actividad costosa y tanto las instituciones públicas como las empresas privadas no han llevado a cabo esta labor con eficacia, bien por falta de una legislación adecuada o por carencia de medios económicos. Todo ello está contribuyendo, evidentemente, al deterioro del medio ambiente en grandes zonas de muchos países.

Un estudio detenido del posible aprovechamiento de los residuos con fines energéticos en los lugares en que se producen, arroja bastantes ventajas, algunas de las cuales se enumeran a continuación:

- Los residuos forman parte de un tipo de biomasa que ya existe (no hay que

- producirla) y cuya eliminación es un problema grave y de solución costosa.
- En muchos casos, la biomasa residual está concentrada en lugares determinados por lo que, si se utiliza cerca del sitio de acumulación genera unos costes de transporte muy reducidos.
 - La utilización de los residuos para producir energía presenta como sistema de eliminación unas ventajas de carácter ambiental, como son una considerable reducción de su volumen, eliminación de plagas, incendios forestales y olores, mejora del paisaje y reducción de la contaminación del aire, agua y suelo.
 - Algunos métodos de aprovechamiento de la biomasa residual presentan la ventaja adicional de generar productos ricos en nutrientes y, por tanto, susceptibles de ser utilizables como fertilizantes para fines agrícolas, lo que supone un ahorro de consumo de energía, materias primas y divisas.

TIPOS DE RESIDUOS

En general, se pueden definir los residuos como *aquellos materiales generados en las actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado en el contexto en que son generados, ningún valor económico.*

Se siguen varios criterios para clasificar los distintos tipos de residuos, entre los que cabe destacar la naturaleza de su origen (agrarios, industriales, urbanos) o los tipos de materiales que los constituyen (orgánicos, plásticos, metálicos, etc.). Sin embargo, y teniendo en cuenta que nuestro interés aquí se centra en los residuos orgánicos, por ser biomasa, se pueden considerar tres grandes sectores de actividad que los producen: agrario, transformación y urbano.

LOS RESIDUOS AGRARIOS: RESIDUOS AGRÍCOLAS

Se puede denominar **residuo agrícola** a la *planta o a la porción de ella cultivada que es preciso separar para obtener el fruto o para facilitar el cultivo propio o posterior.*

Existe una gran cantidad de residuos con potencial interés industrial y energético, que localmente pueden tener alguna utilidad, pero cuya eliminación constituye un problema en las labores de explotación agrícola.

Esta categoría de residuos se produce principalmente en los siguientes cultivos:

- Cereales grano, originando pajas.
- Frutales y viñedo, cuya poda anual es una fuente considerable de material combustible.
- Algunos cultivos industriales, como los textiles y oleaginosas, que producen como residuo los tallos.

LOS RESIDUOS AGRARIOS: RESIDUOS FORESTALES

El monte supone un medio considerable de transformación de la energía solar. Sin embargo, los seres humanos no utilizan íntegramente toda la riqueza que suministra el monte y desperdician una parte considerable en forma de ramas, cortezas, serrín, etc. Este menor aprovechamiento energético se ha acusado en los últimos años con la aparición de combustibles gaseosos derivados del petróleo. El relativo bajo precio y, sobre todo, la comodidad de su uso, han originado un descenso en el consumo de residuos de madera como fuente energética.

Realmente, los residuos forestales son los que, durante siglos, han constituido la fuente energética más importante de la Humanidad.

Los residuos forestales están constituidos por ramas, cortezas, virutas, serrín, hojas, tocones y raíces. Según los valores medios internacionales para varias especies, las diferentes partes del árbol se distribuyen en:

- Tronco : 67%
- Ramas : 16%
- Hojas : 3%
- Tocones : 14%

Por otro lado, los residuos que se producen en el bosque se dividirán en dos grandes grupos, para facilitar su estudio:

- Residuos de corte y elaboración de madera.
- Residuos de tratamientos selvícolas.

LOS RESIDUOS AGRARIOS: RESIDUOS GANADEROS

Tradicionalmente, los residuos producidos por el ganado constituían la única

fuerza fertilizante de los suelos agrícolas. Con la aparición de los fertilizantes, lamentablemente los estiércoles dejan de utilizarse en gran número de explotaciones, pues empieza a haber una separación entre agricultura y ganadería.

Actualmente, en aquellas explotaciones intensivas que no disponen de terrenos suficientes, se tiende a recoger las deyecciones en diferentes tipos de depósitos y, mediante tratamientos diversos, eliminarlas o llevarlas a lugares en que puedan tener alguna utilidad.

Aquí es donde puede contemplarse la inclusión de la tecnología energética, que podría atender a las necesidades locales de la granja o explotación ganadera.

Al tratarse de residuos de alto contenido en humedad, no es conveniente para su tratamiento utilizar procesos termoquímicos, por su bajísimo rendimiento en este caso. Sin embargo, la tecnología de la digestión anaerobia, proceso de tipo bioquímico que se discutirá más adelante, presenta grandes ventajas para su aplicación a este tipo de biomasa por varios motivos:

- Se trata de residuos localizados.
- Los residuos tienen gran cantidad de agua.
- Aportan un alto contenido en nutrientes para el crecimiento bacteriano.
- El efluente del proceso mejora notablemente la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo) respecto al residuo original, lo que supone una gran ventaja para su utilización posterior en la agricultura.

Este último punto permite recalcar que la obtención de energía (en forma de gas combustible) por medio de digestión anaerobia no supone la eliminación de estos residuos y privación de emplearlos en el medio agrícola, sino que, por el contrario, el residuo ganadero, una vez digerido, se encuentra enriquecido en elementos fertilizantes.

LOS RESIDUOS INDUSTRIALES

Sólo se consideran de interés como fuente energética los residuos de sectores industriales que, en principio, pueden generar mayor cantidad de residuos de naturaleza orgánica, en los que su eliminación supone un coste adicional en la

empresa, que su valor sea escaso y se encuentren distribuidos en todo el territorio nacional.

Las industrias que cumplen aproximadamente estas condiciones, son las siguientes:

- Conservas vegetales.
- Extracción de aceites.
- Extracción de vinos.
- Frutos secos.

La utilización de estos residuos y, por tanto, las disponibilidades de la fracción no utilizada varían considerablemente según las circunstancias socioeconómicas de cada zona.

LOS RESIDUOS URBANOS

Los núcleos de población producen diariamente grandes cantidades de residuos, que se pueden considerar incluidos dentro de dos grandes grupos: los **residuos sólidos urbanos** y las **aguas residuales urbanas**.

El tratamiento y eliminación de estos residuos constituye día a día un problema más agobiante debido a su incesante crecimiento, a medida que aumenta la población y el nivel de vida de la misma.

Los residuos urbanos se caracterizan por su carácter localizado, por lo que parece evidente que sean los más aptos para un tratamiento a gran escala, debido a la menor incidencia del factor transporte en el coste de los procesos de transformación.

Estos procesos han de ser básicamente diferentes para los residuos sólidos y para las aguas residuales, debido al diferente estado físico en que se encuentran sendos productos residuales; además, la recolección de los mismos presenta diferentes problemáticas.

Los residuos sólidos

Se denominan *residuos sólidos urbanos* a aquellos materiales resultantes de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza, cuando su poseedor o productor los destina al abandono. La composición de estos residuos es función de varios factores, entre los que destacan el nivel de vida de la población, el

período estacional, tipo de hábitat y clima.

Por otro lado, la producción media estimada de residuos sólidos urbanos en España se sitúa en los 1,0 kg/hab.día, variando la distribución de estos valores en función del tamaño de los núcleos urbanos.

Las aguas residuales

Se denominan *aguas residuales* a los líquidos procedentes de la actividad humana que llevan en su composición gran parte de agua y que, generalmente, son vertidos a los ríos o al mar. Su composición es tanto inorgánica (sales, arenas, etc.) como orgánica (materiales biodegradables), por lo que su fracción sólida contiene una apreciable cantidad de biomasa residual.

Por lo tanto, el proceso de depuración de un agua residual no debe considerarse completo, simplemente por haber obtenido un agua depurada. Es preciso, además, eliminar los lodos generados, con un coste lo más reducido posible y sin impacto ambiental negativo apreciable.

El tratamiento de estos lodos con vistas a su aprovechamiento energético más conocido y utilizado en todo el mundo en numerosas plantas de tratamiento de aguas residuales es la digestión anaerobia para producir gas combustible.

Así, pues, con objeto de evaluar la cantidad de energía que se podría obtener a partir de esta fuente de biomasa residual, es necesario conocer previamente la cantidad de lodos generados por las plantas depuradoras actualmente en funcionamiento.

TEMA 3: FUENTES DE ENERGÍA DE LA BIOMASA, (2): LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS

LA AGROENERGÉTICA

El cultivo de cosechas atendiendo al valor que poseen como combustible, es decir, con la directriz de su potencial energético, es lo que se conoce como *cultivos energéticos*.

Recientemente, y como consecuencia de la crisis energética, se ha empezado a considerar seriamente la posibilidad de producir biomasa vegetal transformable en energía, conociéndose esta nueva faceta agrícola como *Agroenergética*, sobre la cual, por falta de datos experimentales, existen todavía interrogantes acerca de su rentabilidad e impactos social y ecológico. Actualmente sólo se obtienen pequeñas cantidades de energía procedentes de esta fuente; el conocer su rentabilidad económica y energética debe ser objeto de investigación para que se pueda llevar a cabo esta actividad de forma masiva en un futuro no muy lejano.

BALANCE DE ENERGÍA EN CULTIVOS ENERGÉTICOS

Un aspecto que necesita una consideración especial en los cultivos energéticos es el balance de energía. Cuando se realiza un cultivo de este tipo, además de la energía solar, indispensable para el desarrollo de los vegetales, aunque gratuita, se necesita una cierta cantidad de energía exterior que proviene de diversas fuentes, desde el trabajo muscular a la electricidad, pasando por el petróleo y sus derivados. En el análisis del balance energético de la producción agrícola hay que tener en cuenta estos dos tipos de fuentes de energía (solar por un lado y convencional por otro) de forma separada, como integrantes de las magnitudes energéticas de entrada del proceso productivo.

Cuando se analiza un cultivo energético, es necesario tener en cuenta que éste

debe aportar más energía de la que recibe del agricultor, siendo, pues, una premisa básica del cultivo energético el hecho de que su balance energético sea positivo.

La estimación del consumo energético en el proceso de producción lleva a la asignación de un equivalente energético para cada uno de los siguientes componentes:

- El trabajo humano, considerando al agricultor como una máquina que consume biomasa del propio proceso. Obsérvese que la asignación de un valor energético a cada hora de la vida del agricultor en el medio rural, como máquina destinada para trabajar en el cultivo energético, puede ser aleatoria porque influyen muchos factores.
- El trabajo de animales de labor, que se utilizan sólo en ciertas épocas, pero hay que mantenerlos todo el año.
- Los abonos y productos químicos, en los que hay que considerar además de su energía interna, la energía consumida en su fabricación, transporte, y aplicación.
- Las semillas. Cuando se utilizan semillas cosechadas en la producción normal, el consumo energético debido a ellas sería el equivalente a su energía interna. En el caso de semillas híbridas o seleccionadas, habría que considerar la energía gastada en su producción.
- La maquinaria agrícola, en la que hay que valorar aperos de labranza, tractores, motores y otras máquinas, de los que no sólo hay que considerar su consumo de combustible, sino también los gastos energéticos de su fabricación, conservación y mantenimiento.
- El material de construcción, al que se le suelen asignar valores fijos preestablecidos.
- El material de instalación y funcionamiento del riego con la valoración energética de los embalses y canales implicados en el mismo.

SELECCIÓN DE CULTIVOS Y EFECTOS AMBIENTALES

Los cultivos susceptibles de ser utilizados como productores de energía deben ser seleccionados de acuerdo a la premisa general de obtener la máxima cantidad

posible de energía neta compatible con las condiciones climáticas y del suelo de cada zona.

El impacto ambiental de los cultivos energéticos requiere una especial atención. La práctica agrícola reduce considerablemente el número de especies vegetales, aunque en conjunto se aumenta la productividad; esta disminución del número de especies reduce la estabilidad de cualquier ecosistema y lo hace más vulnerable a las alteraciones del medio ambiente, pero es de esperar que éstas sean muy inferiores a las producidas por los cultivos alimentarios o industriales. Las razones que se pueden aducir en apoyo de esta tesis son:

- Los cultivos energéticos se implantarían en zonas marginales de escasa productividad natural, en las que los cultivos protegerían el suelo contra la erosión y aumentarían su contenido en materia orgánica.
- Por ser cultivos poco exigentes en cuanto a labores y tratamientos químicos, no serían tan contaminantes como los cultivos agrícolas tradicionales.
- Al no ser necesaria la mono-especificidad de los cultivos, se podría aumentar la variabilidad de las especies, con lo que aumentaría la estabilidad del ecosistema agroenergético y como consecuencia éste tendría una mayor aptitud para mantener una elevada productividad ante las posibles variaciones climáticas del año agrícola.
- La reutilización de los residuos del proceso de producción y transformación de la biomasa como fertilizante de las plantaciones, haría mejorar sensiblemente las propiedades del suelo al aumentar su contenido en materia orgánica.

No obstante, antes de abordar masivamente los cultivos energéticos en una zona, sería necesario realizar los estudios ecológicos para evaluar el impacto ambiental que produciría su establecimiento y tomar las medidas oportunas para que dicho impacto fuese lo menos perjudicial posible.

CULTIVOS TRADICIONALES

Los cultivos tradicionales son aquéllos que el ser humano ha venido utilizando desde hace mucho tiempo, no sólo para la producción de alimentos, indispensables para su subsistencia, sino también para la obtención de productos de interés industrial.

Tratándose de utilizar algunos de estos cultivos con fines energéticos, es

necesario distinguir aquéllos que puedan destinarse exclusivamente a la producción de energía por haber decaído su interés en su ámbito tradicional, de los que puedan ser competitivos con la producción de alimentos. La viabilidad de estos últimos podría ser muy discutible, ya que esta competitividad tendería a ofrecer más dificultades que ventajas cara al futuro, salvo que se usen como fuente energética los excedentes de cosechas.

En un plano ideal, los cultivos energéticos se deberían de localizar sobre terrenos marginales; sin embargo, el concepto de marginalidad es relativo y, exceptuando las zonas desérticas donde ningún vegetal puede ser cultivado, los límites para el aprovechamiento de la tierra vienen marcados por imperativos económicos.

La **cebada** y el **trigo** son cultivos que, junto con la caña de azúcar, son los más populares bajo el punto de vista de la obtención de energía, ya que su fermentación a alcohol es conocida y practicada hace cientos de años.

La **caña de azúcar** (*Saccharum officinarum*) es la especie agroenergética ideal para los climas que permitan su cultivo, pudiéndose obtener cosechas de 40 a 65 Tm/ha de peso seco cada año. Se estima que su rendimiento energético oscila entre 3.700 y 13.000 litros de etanol por hectárea y año.

El **sorgo dulce** (*Sorghum bicolor*) es una planta parecida al maíz, pero no posee mazorca, sino semillas agrupadas y, al igual que la caña de azúcar, es capaz de rebrotar, permitiendo cortes sucesivos sin necesidad de ser sembrada cada temporada. Sus rendimientos en peso fresco pueden llegar a ser hasta de 112 Tm/ha·año.

El **maíz de tallo azucarado** (*Zea mays*) se encuentra también en esta línea, y de él se pretende el doble aprovechamiento del almidón de la semilla y del azúcar del tallo. Se han obtenido rendimientos de 2,4 Tm/ha·año de azúcar procedente del tallo.

La **remolacha** (*Beta vulgaris*), tanto azucarera como forrajera ha sido considerada por Nueva Zelanda como la materia prima con mayores posibilidades para la obtención de alcohol como combustible para automóviles. La remolacha azucarera puede tener rendimientos de hasta 56 Tm/ha·año de biomasa fresca y producir hasta 4.000 litros de etanol por hectárea y año.

La **mandioca** o yuca (*Manihot esculenta*) es otro de los cultivos tradicionales del que se conocen varios proyectos para su transformación en alcohol por fermentación (en Brasil y Sudáfrica). Es un componente básico de la dieta de muchos países

tropicales subdesarrollados y, por tanto, su uso como cultivo energético debe ser cuidadosamente estudiado. A partir de 1 Tm de mandioca se pueden obtener 180 litros de etanol.

Los **cítricos** en general, poseen en sus cáscaras una pequeña proporción de un aceite denominado *citrolina*, que tiene la misma potencia energética que el gas-oil (44 MJ/kg), al que puede reemplazar.

El **girasol** (*Heliantus annuus*) posee unas semillas que producen un aceite, actualmente utilizado como alimento, en la fabricación de jabones y pinturas, como lubricante, etc., y además la fibra residual se aprovecha para hacer papel.

Cabe destacar también dentro del grupo de los cultivos tradicionales las **plantaciones forestales**, con objeto de producir grandes cantidades de biomasa convertibles en energía, principalmente por métodos termoquímicos. Los rendimientos de estos cultivos pueden oscilar entre 11 y 27 Tm/ha·año de materia seca, con un poder energético superior a los 20 MJ/kg, pudiendo ascender mediante cuidados especiales hasta valores entre 36 y 45 Tm/ha·año.

Entre las plantaciones forestales que han sido consideradas más adecuadas para cultivos energéticos, las más importantes parecen ser las de eucalipto, álamo, sauce y acacia, destacando el primero de ellos por su resistencia a las plagas y su facilidad de adaptación a condiciones climáticas diversas. Además, la abundancia de sus especies (se conocen más de 600) es tal, que con toda seguridad debe ser posible seleccionar aquéllas que se acomoden mejor a los terrenos marginales.

CULTIVOS POCO FRECUENTES

Desde que se ha empezado a considerar la posibilidad de utilizar cultivos con fines energéticos, se han iniciado diversos proyectos de prospección de especies silvestres. Algunas de ellas ya se cultivaban en sitios aislados, pero nunca con la intención de obtener energía.

La principal ventaja de estos cultivos sería su posible adaptación a zonas marginales o áreas no aprovechables para fines alimentarios o industriales.

Los **cardos** *Onopordum nervosum* (toba), *O. illyricum* y *O. acanthum* han sido sometidos a ensayos en España. Todos ellos presentan un gran desarrollo, pudiéndose encontrar ejemplares de hasta 4 m y siendo normal un desarrollo entre 2,5 y 3 m.

La **pataca** o tupinambo (*Heliantus tuberosus*) es una planta que posee tallos de dos clases: unos subterráneos o tubérculos, formados por acumulación de sustancias de reserva (alrededor del 20% de materia seca, casi en su totalidad hidratos de carbono), y unos tallos aéreos, que pueden alcanzar alturas de hasta 3 m. Tolera fuertes calores y sequías intensas y se adapta bien a todo tipo de suelos. Los tubérculos rebrotan de los rastrojos de la cosecha, por lo que no es necesaria la siembra anual.

Las **chumberas** o tuneras (*Opuntia ficus-Índica*) crecen espontáneamente en terrenos marginales de las regiones meridionales y levantinas españolas, así como en Canarias. En zonas áridas como el sur de EE.UU., Australia, Africa e India son objeto de cultivo como plantas forrajeras.

Los **ágaves**, pitas o piteras (*Agave americana*) tienen en su haber un cierto historial por su aprovechamiento en zonas marginales. Distintas especies de ágaves se han aprovechado como fuente de fibras para la industria, ensayándose asimismo su posible utilización como fuente de celulosa y azúcares fermentables a alcohol.

La **caña de Provenza** o caña común gigante (*Arundo donax*) es una planta espontánea en la mayoría de las regiones, crece vegetativamente por rizoma y se extiende superficialmente, emitiendo tallos aéreos que pueden alcanzar de 3 a 5 m de altura con 3 cm de diámetro. Abunda en terrenos inundados, siendo éste un factor limitante fundamental para su cultivo en zonas marginales.

El **pasto elefante** (*Pennisetum purpureum*) es otro cultivo reciente, y se puede considerar una hierba invasora, dada la facilidad y abundancia de su crecimiento (hasta 313 Tm/ha·año). Puede ser usado como materia prima para la fermentación anaerobia a biogás, desconociéndose aún los rendimientos de la aplicación de dicho proceso.

Los **helechos** (*Pteridium aquilinum*) son especies a las que se han dedicado extensos estudios como cultivo energético (principalmente en Gran Bretaña), dada su abundancia natural y su facilidad de crecimiento. Los resultados obtenidos como productores de biomasa son muy variables según los investigadores, dada la cantidad de variables determinantes de su crecimiento; se ha llegado a obtener unos rendimientos de 5 a 14 Tm/ha·año de materia seca.

CULTIVOS ACUÁTICOS

Los océanos cubren aproximadamente el 70% de la superficie de la Tierra; desde el punto de vista de la captación de la energía solar poseen entre 5 y 10 veces más superficie potencialmente productiva que la tierra. Hasta el momento no se ha abordado con suficiente extensión y profundidad la creación de cultivos en explotaciones marinas, sin embargo, el incremento de la población y la demanda creciente de alimentos y productos energéticos, han vuelto en gran medida la atención científica hacia esta posible forma de producción de biomasa.

El cultivo de plantas marinas por excelencia, es el de las **algas**. *Macrocystis pyrifera* es especialmente interesante por su gran productividad ligada a una alta eficacia fotosintética. Puede alcanzar esta alga marina hasta 46 m de longitud, pudiéndose obtener en una explotación en *granjas marinas* un rendimiento aproximado de 76 Tm/ha·año de materia seca, que posee un potencial energético de unos 10,8 MJ/kg.

También entre las algas hay que destacar el cultivo de las **algas unicelulares**, principalmente de los géneros *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Spirulina*. La productividad de estos vegetales oscila alrededor de las 100 Tm/ha·año de materia seca, pudiendo alcanzar el género *Chlorella* valores de hasta 125 Tm.

La planta acuática que quizás haya recibido más atención en los últimos tiempos es el **jacinto de agua** (*Eichornia crassipes*), especie de agua dulce de origen tropical, cuyo crecimiento es óptimo entre 26 y 28 °C y nulo si la temperatura del agua baja de 10 °C. En condiciones térmicas y nutritivas adecuadas, su crecimiento y consiguiente reproducción vegetativa son extraordinariamente rápidos: una mata aumenta diariamente su peso fresco en un 10%, duplicándose el número de individuos cada 12 ó 15 días. Su productividad media se estima superior a las 30 Tm/ha·año en peso seco (del 6 al 8% del peso fresco), habiéndose obtenido en algunos casos rendimientos de hasta 150 Tm/ha·año de materia seca.

Además de las especies citadas, existen otras muchas plantas acuáticas, tanto de agua salada como de agua dulce, que podrían ser utilizadas, bien para la obtención de energía o, de forma alternativa, para la alimentación (producción de proteínas). El estudio de cada especie en su hábitat natural puede ofrecer grandes posibilidades en un futuro de cara al aprovechamiento de muchas plantas acuáticas para la obtención

de biomasa.

CULTIVO DE PLANTAS PRODUCTORAS DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

La mayor parte de los vegetales almacena su energía básicamente en forma de hidratos de carbono (azúcares, almidón, celulosa). Existen otros, en cambio, que, presentando una gran fracción de residuo leñoso, producen sustancias que, con un tratamiento sencillo, pueden ser usadas como combustibles, por sus propiedades parecidas a los derivados del petróleo, en los motores de combustión interna o diesel. Son las plantas productoras de combustibles líquidos.

La **palma africana** (*Elaeis guineensis*) presenta una gran posibilidad potencial si se consideran las enormes áreas lluviosas de Africa y Sudamérica, cuyas condiciones son idóneas para su producción. La planta tiene pocas enfermedades y resiste suelos muy ácidos; se inicia la producción a los cuatro años y tiene una vida productiva de treinta años, dando unas 5 Tm de aceite por hectárea y año.

La **palma babasu** (*Orbignya martiana*) crece sólo en Brasil. Desde hace tiempo se extrae el aceite de las nueces, pero mediante destilación seca (pirólisis) de los residuos de este proceso, se podría obtener también gas de síntesis, metanol y coque. Se han registrado rendimientos de hasta 30 Tm/ha/año de nueces, lo que representa 4,5 Tm de coque, 6,5 Tm de gas de síntesis y 4,5 Tm de metanol. Ello equivale, en valor energético a unas 9 tep.

La **palma de coco** (*Cocos nucifera*) produce los cocos, que podrían ser una importante fuente energética en muchos países tropicales, dado su alto rendimiento de materia seca, del orden de 20 Tm/ha/año. El aprovechamiento integral de esta especie lleva, por un lado, a la obtención de aceite de coco, copra y fibras, y por otro, a la conversión de los residuos en gas de síntesis, por medio de la tecnología de la gasificación.

La **tabaiba** o planta de la tusa (*Euphorbia lathyris*) es una planta de más de un metro de altura, que se encuentra dispersa en muy diversas partes del mundo, siendo propia de los climas mediterráneos templados. La planta contiene cerca de un 6% de su peso seco de hidrocarburos (con un poder energético de 42 MJ/kg), que se pueden

separar por molienda de la materia vegetal y posterior extracción con disolventes orgánicos, y más de un 10% de azúcares fermentables a alcohol. El contenido en aceite de sus semillas oscila alrededor del 50%, y al no ser aprovechable para uso alimentario por su toxicidad, puede ser muy indicado para la obtención de energía o productos químicos.

La **jojoba** o azufaifo (*Simmondsia chinensis*) es un arbusto silvestre de tamaño medio que crece en zonas desérticas de los EE.UU. y México. En pleno período productivo se han obtenido en California hasta 200 kg de aceite por hectárea y año, pero como la jojoba puede crecer en tierras donde no crece otra cosa, con sólo una productividad del 10% de la indicada ya sería considerable su rentabilidad.

El **alga elástica** (*Botryococcus braurii*) es una alga unicelular que tiene un período verde de desarrollo y una fase roja de inactividad, en la cual, el 75% de la planta seca puede estar constituido por un aceite hidrocarbonado utilizable para producir combustible líquido. Crece en agua dulce y se multiplica a una velocidad cinco veces superior a cualquier otra planta.

El **membrillo negro** (*Croton sonderianus*) crece extensamente en el norte del Brasil y por su poder invasor se considera como mala hierba, ya que incluso se adapta bien a las estaciones frías. Una extracción total de la planta mediante destilación con vapor proporciona un 1% de aceite esencial, semejante al gas-oil. De hecho, los motores diesel funcionan bien con este aceite sin ninguna modificación. La resina restante de la destilación tiene valor potencial como combustible después de su pirólisis.

El **tártago** o ricino (*Ricinus communis*) es particularmente importante en las zonas meridionales de nuestra Península y en Canarias, donde crece espontáneamente en cualquier sitio, alcanzando una altura media de hasta 2 m, aunque existen ejemplares que sobrepasan los 4 m de altura. Admite aguas salobres y no requiere ningún cuidado especial. El fruto globuloso posee tres semillas, a partir de las que se extrae un aceite por prensado mecánico y posterior extracción de este jugo con disolventes. Se obtiene alrededor del 5% de aceite respecto al peso seco de las semillas.

La **copaiba** es el nombre para un grupo de especies de la *Copaífera*. En Brasil, la *C. langsdorfii* ha proporcionado un aceite, usado como combustible para lámparas.

La *C. multijuga* es un árbol ampliamente difundido en las zonas tropicales de Sudamérica y África, que se ha estimado que rinde una 7 Tm/ha·año de aceite.

El **árbol del caucho** (*Hevea brasiliensis*) ha sido muy estudiado y sometido a mejoras genéticas para aumentar su rendimiento en caucho, siendo muy elevada la cantidad de datos disponibles a este respecto. El caucho es el resultado de la coagulación al aire del látex de esta planta, que se extrae del árbol por simple sangrado, practicando un orificio en el tronco, y su contenido en hidrocarburos es de un 10%.

El **guayule** (*Parthenium argentatum*) es un arbusto que alcanza de 60 a 70 cm de altura que crece de forma natural en las zonas desérticas norteamericanas. El rendimiento en caucho de esta especie es, después de las últimas mejoras genéticas conseguidas, superior al 20% del peso seco de la planta, con lo que su cultivo intensivo puede proporcionar hasta 800 kg/ha.año de caucho.

El **toruyo** o calabacilla amarga (*Cucurbita foetidissima*) es una planta perenne que se reproduce asexualmente, creciendo como una mala hierba en regiones de baja pluviometría. Es una especie silvestre que no ha sufrido ningún tratamiento agronómico ni ha sido sometida a un proceso de mejora genética, lo que podría elevar notablemente los rendimientos obtenidos hasta ahora (unas 3 Tm/ha·año de semillas). Una tonelada de semillas produciría aproximadamente 1 barril de crudo, 300 kg de aceite vegetal y 150 kg de proteína.

Finalmente, es importante tener en cuenta, que las plantas de las que actualmente se extraen estos combustibles líquidos, son muchas de ellas especies espontáneas, que no han sido cultivadas y, por lo tanto, no han sido sometidas a ningún tipo de selección. Cabe pensar, pues, en un incremento notable de rendimiento si se someten las especies a mejoras genéticas y se estudian las necesidades nutritivas y de cultivo. En el futuro, un adecuado programa de mejora indudablemente podrá elevar de forma sustancial los valores actuales de producción de combustibles líquidos.

VALORACIÓN DE LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS

La integración de este tipo de cultivos en el sistema económico de un país depende, como ya se ha citado, de diversos factores, principalmente agrícolas. No

obstante, a nivel social cabría citar diversos aspectos que podrían resultar positivos por la implantación de esta nueva faceta de la agricultura, resumidos en los siguientes puntos:

- Pueden liberar, en parte, a un país de su dependencia energética exterior, lo que produciría una inclinación favorable de su balanza de pagos.
- No necesita de nuevas tecnologías; basta aplicar racionalmente los conocimientos científicos y técnicos actuales con criterios adecuados a las nuevas circunstancias.
- Permite utilizar las tierras abandonadas, con su consiguiente revalorización. Podría evitar la emigración hacia las grandes urbes, fomentando un desarrollo más equilibrado de la ordenación del territorio.
- Facilita la mejora de la calidad del medio ambiente, debido al uso de combustibles más limpios.
- Los cultivos y la industria correspondiente (que no necesita estar acumulada en grandes zonas) requieren mano de obra rural, lo que permitiría generar empleo. Por otro lado, existen ciertos inconvenientes de principio que es necesario tener

en cuenta, destacando en este aspecto los siguientes puntos:

- La principal condición que debe cumplir un país para cultivar biomasa con fines energéticos es la de disponer de superficie suficiente de terrenos marginales para dedicarla a ello.
- Aunque se utilicen especies de pocas necesidades hídricas, podría ser frecuente que el agua fuese un factor limitante en la implantación de un cultivo energético.
- La Agroenergética, como faceta moderna e innovadora de la agricultura, requeriría el apoyo económico y financiero de las instituciones públicas, ya que el sector privado probablemente sería muy reacio a arriesgar su capital en un aspecto desconocido para él.

TEMA 4: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN (1): CLASIFICACIÓN. EXTRACCIÓN DIRECTA

GENERALIDADES

En general, la baja densidad física y energética de gran parte de la biomasa, tal como se recupera de los residuos o se recolecta directamente del terreno, así como su contenido en humedad, muchas veces alto, determinan que en la mayoría de los casos no sea adecuada como tal para reemplazar a los combustibles fósiles sólidos (carbón), líquidos (petróleo) o gaseosos (gas natural). Se hace necesaria, pues, la transformación previa de la biomasa en combustibles de mayor densidad energética y física, contándose para ello con diversos procedimientos, que generan una gran variedad de productos.

Los combustibles originados a partir de la biomasa presentan la mayor parte de las características favorables de los combustibles fósiles:

- Alto contenido energético por unidad de volumen.
- Facilidad de transporte y almacenamiento.
- Buena combustión.

Además, y debido a su naturaleza orgánica, la biomasa no participa de muchos de los inconvenientes de los combustibles fósiles, es decir, posee las siguientes ventajas adicionales:

- Presenta escaso contenido en azufre.
- No forma escorias en su combustión.
- Tiene bajo contenido en cenizas.
- Contribuye a mejorar la calidad del ambiente y reducir el riesgo de enfermedades pulmonares.

Así, proceda de residuos o de cultivos energéticos, la biomasa es transformada

en vectores de energía (calor, combustibles, electricidad) que conducen a la forma de energía útil requerida por un proceso determinado (energía mecánica, electricidad específica).

Algunos combustibles pueden obtenerse de la biomasa por **extracción directa** (plantas productoras de hidrocarburos). Aunque los productos así obtenidos pueden ser utilizados como combustibles en motores diesel, presentan diversos problemas, principalmente relacionados con su alta viscosidad. Por esta razón, los aceites obtenidos se modifican mediante **procesos químicos**, también aplicables a aceites residuales, siempre que su origen sea la biomasa.

Los **procesos termoquímicos** de conversión se basan en someter la biomasa a la acción de altas temperaturas y pueden dividirse en tres amplias categorías, dependiendo de que el calentamiento se lleve a cabo con exceso de aire (**combustión**), en presencia de cantidades limitadas de aire (**gasificación**) o en ausencia completa del mismo (**pirólisis**). Los materiales más idóneos para su conversión termoquímica son los de bajo contenido en humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cáscaras, etc.

La biomasa con alto grado de humedad puede transformarse mediante **procesos bioquímicos** por **fermentación alcohólica** o **digestión anaerobia** en etanol o metano, respectivamente. En la actualidad, las técnicas más desarrolladas son, por un lado, la fermentación de materiales azucarados, celulósicos o amiláceos para la producción de etanol y, por otro, la digestión anaerobia de biomasa con alto contenido en celulosa (residuos agrícolas, ganaderos, industriales y urbanos, plantas acuáticas, etc.) para la generación de metano.

PROCESOS DE EXTRACCIÓN

Existen numerosas especies vegetales que producen en su metabolismo hidrocarburos o compuestos muy hidrogenados, de elevado poder calorífico, que se pueden utilizar directamente como combustibles. Estos compuestos se pueden obtener mediante un proceso de extracción directa, aunque aún no está completamente definido el esquema de operación, debido a que éste está muy condicionado a cada tipo de especie vegetal.

EXTRACCIÓN DIRECTA Y PROCESOS QUÍMICOS

Actualmente, los procesos de extracción directa más desarrollados son aquellos que extraen aceites a partir de semillas de plantas oleaginosas (oliva, girasol, maíz, soja, colza). Los **aceites** son las reservas energéticas que las plantas acumulan en sus semillas para proporcionarles alimento suficiente durante la germinación, hasta que lo puedan obtener del entorno. Por su parte, los animales también poseen reservas energéticas de características similares, que reciben en nombre de **grasas** (sebos, mantecas).

Aceites y grasas son **lípidos**, denominación genérica que se aplica a los ésteres de glicerina (triacolol) y de ácidos grasos (ácidos orgánicos alifáticos, monobásicos, $C_{12} - C_{22}$), por lo que también reciben el nombre de **triglicéridos**. La glicerina puede ser separada de los lípidos mediante tres procesos químicos:

- **Hidrólisis:** Reacción con agua que libera la glicerina junto con los ácidos grasos de partida.
- **Saponificación:** Reacción con un hidróxido alcalino que libera la glicerina junto con las sales alcalinas de los ácidos grasos de partida (jabones).
- **Alcohólisis:** Reacción con un alcohol simple que libera la glicerina junto con los ésteres del alcohol simple y los ácidos grasos de partida.

La alcohólisis también puede denominarse **transesterificación**, ya que se trata de la sustitución en un éster (el lípido) de un alcohol (glicerina) por otro más simple (generalmente, metanol), produciendo ésteres metílicos derivados, cuyas características son similares a las del gasóleo, principalmente respecto a la viscosidad, temperatura de ebullición, residuos o autoinflamación. De ahí que estos ésteres sintéticos obtenidos a partir de ésteres naturales contenidos en la biomasa reciban el nombre genérico de “**biogasóleos**”.

Este proceso se lleva a cabo con un catalizador homogéneo (hidróxido sódico o potásico) para favorecer las condiciones de reacción y ha de estar seguido de una operación de separación de la glicerina, que es insoluble en los ésteres metílicos.

El biogasóleo obtenido suele lavarse con agua para eliminar el exceso de alcohol utilizado, el catalizador y los productos de las otras reacciones mencionadas, que también transcurren en pequeña extensión: ácidos grasos y jabones. El producto purificado se destina al uso como combustible.

La glicerina puede comercializarse como subproducto, pero su purificación es mucho más compleja.

El biogasóleo como combustible

La utilización directa de los aceites vegetales como combustibles para motores diesel requeriría la modificación de éstos en la alimentación, en la inyección y en los reglajes, lo que recomienda su transformación en biogasóleo.

Para que los ésteres metílicos puedan ser utilizados en los motores diesel, deberán observar determinadas especificaciones, principalmente:

- El éster ha de tener una pureza superior al 96,5%.
- El contenido en partículas sólidas ha de ser nulo a las temperaturas de utilización.
- No debe contener restos de catalizador, jabones o ácidos grasos libres.

Las principales propiedades físico-químicas de interés para el estudio del comportamiento de los ésteres metílicos como combustible en motores diesel se resumen a continuación, comparadas con las del gasóleo fósil y los aceites vegetales.

La **densidad** de los ésteres metílicos suele tomar valores bastante próximos a los del gasóleo convencional e inferiores a los de los aceites vegetales.

Los valores de la **viscosidad**, especialmente elevados en los aceites vegetales, se reducen a una décima parte en los ésteres metílicos, obteniéndose cifras muy próximas a las del gasóleo; esto elimina serios problemas de funcionamiento del motor, desde el bombeo del combustible hasta su atomización en la cámara de combustión.

Los ésteres metílicos poseen una **capacidad de autoignición** (índice de cetano) que puede ser ligeramente superior a la del gasóleo, muy superior a la que se logra utilizando directamente aceites vegetales.

El **poder calorífico** de los ésteres metílicos es similar al de los aceites vegetales y algo menor que el del gasóleo (un 10% como máximo); ello sólo podrá repercutir en una pequeña pérdida de potencia del motor o un aumento del consumo de combustible.

Los diversos estudios realizados hasta el momento respecto al uso como combustible del biogasóleo teniendo en cuenta las propiedades expuestas, muestran que este derivado de la biomasa puede sustituir al gasóleo en motores diesel

convencionales, tanto completamente como en mezclas de ambos. Si bien los ésteres metílicos se han obtenido directamente de aceites vegetales (principalmente colza y soja), se siguen llevando a cabo estudios para la obtención de biogasóleos de la calidad adecuada a partir de aceites residuales de la industria alimentaria.

TEMA 5: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN (2): PROCESOS TERMOQUÍMICOS

INTRODUCCIÓN

Los procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía o combustibles son aquéllos en que se encuentran implicadas reacciones químicas irreversibles, a altas temperaturas y en condiciones variables de oxidación. Los métodos disponibles en la actualidad no generan un producto único, sino que dan mezclas de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, que también poseen un elevado valor energético.

En este aspecto, si el calentamiento de la biomasa se lleva a cabo con un exceso de aire (**combustión**), se obtiene como producto final calor, pudiéndose utilizar éste, bien para la producción de vapor que mueva una turbina (generación de electricidad) o bien directamente en otros procesos.

Si la combustión de la biomasa no es completa, el proceso se denomina **gasificación**. Este proceso se puede llevar a cabo con oxígeno, lo que permite obtener gas de síntesis, combustible de gran interés actual, por la posibilidad de su transformación en metanol, o bien con aire, produciendo el denominado *gas pobre*, que puede aprovecharse en la línea calor → vapor → electricidad.

El tercer gran grupo de procesos termoquímicos se puede englobar dentro de la denominación de **pirólisis**, o calentamiento de la biomasa en ausencia total de aire. Por esta vía se obtienen combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, en función de la composición de la biomasa y de las condiciones de operación. Los procesos de pirólisis actualmente más apreciados, porque permiten la producción de combustibles líquidos, son variantes del proceso general que operan con la adición de otros reactivos químicos.

COMBUSTIÓN

Se entiende por combustión la oxidación completa de la materia para dar dióxido de carbono, vapor de agua, cenizas y, principalmente, calor, por lo que éste se convierte en el único componente energético útil del proceso.

Este esquema de combustión implica que el material combustible (biomasa) alcance unas temperaturas lo suficientemente altas como para que, en presencia del comburente (aire en exceso u oxígeno), se pueda mantener la reacción. En el transcurso de la misma se pueden distinguir tres fenómenos:

- Una fase de evaporación del agua.
- Una fase de volatilización a partir de los 200 °C.
- Una fase de formación de gases y combustión de los mismos a partir de los 500 °C.

Por otro lado, las variables que afectan principalmente al buen funcionamiento de este proceso son:

- Proporción de oxígeno en el aire de entrada.
- Temperatura de combustión.
- Características del combustible.

Los equipos de combustión

La combustión se realiza normalmente en sistemas que constan de las siguientes unidades:

- Horno.
- Equipo de recuperación de calor (generalmente una caldera).
- Sistema de utilización de la energía recuperada (red de conducción de vapor, turbogenerador, etc).

La energía obtenida puede destinarse a la producción de calor (en forma de agua o de aire caliente) para el uso doméstico o industrial, y a la producción de electricidad.

La combustión presenta una elevada eficacia térmica (calor recuperado de la biomasa en el vapor obtenido). Cuando se utiliza biomasa seca (< 20% de humedad), el rendimiento oscila entre el 80 y el 84%, mientras que en el caso más general de utilizar biomasa húmeda (> 50% de humedad), el rendimiento se encuentra entre el 65

y el 70%. No obstante, la eficacia global del proceso, considerada en sus productos finales (electricidad y vapor de baja presión), oscila alrededor del 30%, valor del mismo orden de magnitud que el de los procesos de obtención de energía a partir de combustibles fósiles.

La ventaja de la utilización de la biomasa como fuente de energía estriba en que los gases residuales producen menos contaminación y la degradación ambiental se puede reducir al mínimo si se utilizan las técnicas adecuadas. Esto hace que este método se utilice profusamente en la actualidad en las industrias azucarera, papelera y derivados de la madera, siendo cada vez más importante su aplicación a las basuras urbanas.

Al hablar de combustión no se debe olvidar el interés de este proceso a nivel doméstico. Aunque la combustión de la madera se ha venido utilizando desde hace muchísimos años en los hogares, en la actualidad está experimentando nuevamente un gran auge, debido a los nuevos diseños de estufas, calderas y cocinas lo suficientemente perfeccionados como para lograr rendimientos del orden del 75%. Así, los modernos hogares de leña proporcionan un mejor aprovechamiento del calor y una emisión de humos mucho menor que los sistemas convencionales.

GASIFICACIÓN

Bajo la denominación de *gasificación* se recogen todos aquellos procesos que llevan implícita una combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

La temperatura de operación es un factor importante en estos procesos. Para obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa resultante (contenidos altos en hidrógeno y monóxido de carbono) es necesaria una temperatura mínima de 700 a 800 °C . Para evitar problemas técnicos debidos a la fusión y la aglomeración de cenizas se impone una temperatura máxima. En general se suele trabajar a temperaturas entre 800 y 1500 °C , lo que permite desarrollar las tres fases similares a las de la combustión, pero limitando la cantidad de comburente a un 10 - 50% del teóricamente necesario para una combustión completa. La calefacción del reactor se realiza normalmente mediante la combustión del gas producido, aun cuando se están

desarrollando otros métodos como la utilización del calor de un horno solar o el calentamiento mediante un arco voltaico.

La posibilidad más importante de controlar los productos finales de la gasificación es la variación de las condiciones de entrada del comburente. La utilización como comburente de aire u oxígeno da lugar a dos procesos de gasificación sustancialmente distintos.

En efecto, la presencia o no de nitrógeno en el comburente hace que se obtengan dos tipos diferentes de gas, no sólo en cuanto a su composición y capacidad calorífica, sino bajo el punto de vista de su posible uso. Se trata del *gas pobre* o *gas de gasógeno*, obtenido por la gasificación de biomasa con aire y el *gas de síntesis*, producto de la gasificación con oxígeno.

El gas de gasógeno

El gas de gasógeno o gas pobre se obtiene mediante una gasificación de biomasa sólida (leña o residuos agrícolas, con un contenido en humedad inferior al 20%), haciendo pasar a gran velocidad una pequeña cantidad de aire a través de una gran masa en combustión.

El oxígeno del aire quema el carbono contenido en la biomasa proporcionando CO y CO₂; este último se reduce a su vez a CO en contacto con la masa incandescente. Por su parte, el vapor de agua procedente de la humedad del combustible se disocia produciendo hidrógeno y liberando oxígeno, el cual se combina con el carbono para producir más óxidos de carbono. También se obtienen hidrocarburos (principalmente metano) y, al emplearse aire, el contenido en nitrógeno del gas formado es elevado. En resumen, se obtiene un gas denominado *gas de gasógeno* o *gas pobre*, debido a su reducido poder calorífico (3,4 a 5,4 MJ/m³).

Este hecho obliga a utilizar el gas directamente en unidades de combustión, para obtener electricidad y vapor, debido a que la presencia de nitrógeno impide su transformación en productos más nobles (gas de síntesis, metanol) y desaconseja su almacenamiento y transporte por su baja densidad energética.

El gas de síntesis

Cuando se opera en el gasificador con oxígeno y vapor de agua, además de que

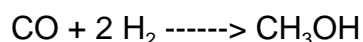
el gas producido está exento de nitrógeno, se producen cantidades apreciables de hidrógeno y monóxido de carbono, como muestran las reacciones anteriormente descritas. El resultado es una mezcla CO/H₂ con un contenido más o menos elevado de CO₂ e hidrocarburos, que se denomina *gas de síntesis*, por ser una importante materia prima en la síntesis química. Su poder calorífico oscila entre los 5,0 y los 10,9 MJ/m³, pero ésta no es su principal característica, ya que el valor de esta propiedad no es excesivamente alto comparado con el de otros combustibles gaseosos convencionales (gas natural, propano, butano, etc.).

Lo realmente interesante de este gas es su posibilidad de transformarlo en combustibles líquidos (metanol y gasolinas), cuya demanda actual es muy superior a la de los combustibles gaseosos.

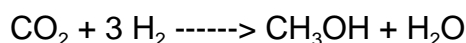
Obtención de metanol

El método más antiguo de obtención de metanol es la destilación seca de la madera, practicada hasta principios del siglo XX. Esta tecnología quedó obsoleta cuando se desarrollaron procesos de oxidación de hidrocarburos, a su vez desplazados en la actualidad, en que la producción de metanol a gran escala se basa exclusivamente en la reacción a alta presión de los componentes del gas de síntesis en presencia de catalizadores metálicos heterogéneos.

La obtención de metanol requiere, en principio, acondicionar la composición del gas obtenido en la gasificación a la estequiometría de la reacción de síntesis de metanol:



Simultáneamente, y en menor grado, se produce también la hidrogenación del dióxido de carbono según



Desde la perspectiva energética hay que destacar que ambas reacciones son exotérmicas y, por tanto, las posibilidades del proceso pueden depender de la mayor o menor recuperación del calor de reacción.

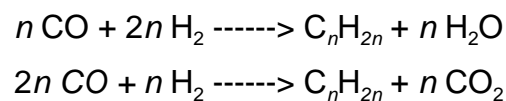
Las reacciones se favorecen operando a presión (50 - 100 atm) y, como la velocidad de la reacción es baja y el incremento de temperatura perjudica al rendimiento, se recurre al uso de catalizadores (óxidos de cobre y cinc) a temperaturas

relativamente bajas (200 - 300 °C). El metanol obtenido en el proceso se condensa y purifica por destilación.

Obtención de gasolinas

La obtención de gasolinas a partir de gas de síntesis es un proceso desarrollado en la década de los años veinte, ante la necesidad de obtener combustibles líquidos utilizando carbón como materia prima. El proceso consiste en la gasificación previa de la biomasa y posterior reacción entre los componentes del gas de síntesis producido. Actualmente ha resurgido su interés con vistas a la transformación de biomasa seca en hidrocarburos vía gasificación con oxígeno, para aprovechar el gas de síntesis generado en el proceso.

En conjunto, este proceso, que se conoce con el nombre de *síntesis de Fischer-Tropsch* es, sin duda, el resultado de una serie de reacciones simultáneas o sucesivas que transcurren con velocidades distintas, susceptibles de ser influidas por las condiciones externas y la composición del catalizador, y que pueden representarse de la forma:



Se parte de gas de síntesis y se obtienen, en general, mezclas muy puras de hidrocarburos de la serie olefínica y parafínica, en proporciones variables, empezando con el metano y terminando con las parafinas sólidas, hasta pesos moleculares del orden de 1.300. La mayoría son de cadena sencilla, apareciendo también productos ramificados (isoparafinas y olefinas), generalmente en pequeña proporción.

El líquido obtenido mediante este proceso es muy parecido a un crudo petrolífero muy parafínico, pero de composición menos compleja. La síntesis a baja presión (< 5 atm) proporciona cerca del 60% de gasolina, 30% de gas-oil y 10% de parafinas. La síntesis a presión media produce estas mismas fracciones, pero en una proporción 35:35:30. El índice de octano de la gasolina obtenida es demasiado bajo para su uso directo en motores de explosión.

PIRÓLISIS

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición de la materia orgánica por

la acción del calor y en ausencia de oxígeno. la propia concepción de la pirólisis implica un aporte térmico que, aunque puede tener diferentes orígenes, es lógico suponer que se lleve a cabo con el mismo material que se está tratando.

Aunque la descomposición térmica de la materia orgánica es muy compleja, se pueden distinguir a lo largo del proceso varias etapas:

- Hasta los 200 °C se produce una pérdida de agua y de otros productos volátiles.
- Entre los 200 y los 250 °C los constituyentes menos estables de la biomasa se descomponen con desprendimiento de agua y óxidos de carbono, formándose hidrocarburos líquidos oxigenados (alcoholes y ácidos).
- Hacia los 275 °C se genera la mayor parte de los hidrocarburos líquidos, reacción que, al ser exotérmica, recalienta la masa hasta 300 - 350 °C.
- Por encima de los 300 °C comienza la formación de productos carbonosos de alto peso molecular (alquitranes y coque).

La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la biomasa tratada, de la temperatura y de la presión de operación, y de los tiempos de retención del material en el reactor.

Las materias primas que se investigan actualmente para desarrollar esta técnica son, esencialmente, los subproductos agrícolas y forestales y los residuos sólidos urbanos. Precisamente, las mejores perspectivas de tratamiento de los residuos sólidos urbanos se encuentran en el campo de la pirólisis, de tal manera que la mayor parte de las investigaciones realizadas sobre este proceso se han hecho sobre la base de utilizar como material de alimentación estos residuos, con la doble opción del tratamiento integral o de hacer una clasificación previa para separar los materiales inorgánicos (vidrios y metales) y someter a pirólisis sólo la fracción orgánica.

Generalmente, los productos de reacción se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Un gas compuesto por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos gaseosos.
- Un líquido que, a la temperatura ambiente contiene compuestos hidrocarbonados complejos, entre los que destacan los de carácter oxigenado (alcoholes).
- Un residuo sólido carbonoso que contiene carbones y alquitranes, así como cenizas.

Las directrices de tratamiento más generalizadas respecto a la obtención de

productos se orientan hacia la obtención de dos de los tres grupos posibles: normalmente, gases y sólidos o líquidos y sólidos, siendo frecuente que los gases obtenidos sean utilizados como combustible en otras partes del sistema de proceso.

Con objeto de mejorar los rendimientos en combustibles líquidos, en la actualidad están presentando gran interés los procesos denominados de **licuefacción**, que son variantes de la pirólisis en el aspecto de que no utilizan oxígeno como comburente, pero son llevados a cabo con un gas reductor, que puede ser monóxido de carbono, hidrógeno o una mezcla de ambos (gas de síntesis), en presencia de catalizadores (carbonatos alcalinos) en solución acuosa, a alta presión (100 - 300 atmósferas) y temperaturas entre 300 y 500 °C.

El combustible obtenido tiene un poder calorífico de unos 33,5 MJ/kg y equivale a una recuperación energética del 50 al 55%.

De las diferentes vías pirolíticas aquí consideradas, la licuefacción es la de desarrollo más retrasado, por lo que hay que esperar que experimente un notable impulso por las ventajas que presenta el combustible obtenido en cuanto a transporte, manipulación, acumulación y posibilidades de utilización.

En los últimos años se ha desarrollado otra variante de la pirólisis, la denominada "**gasificación por plasma**", en la que se utiliza un arco de plasma generado por una descarga eléctrica de muy alta tensión. Las temperaturas que se consiguen de esta forma (unos 4.000°C) producen un alto grado de descomposición en el residuo tratado, de tal forma que las sustancias volátiles se convierten en un gas combustible compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono (gas de síntesis), mientras que las sustancias no volátiles quedan reducidas a una escoria inerte.

TEMA 6: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN (3): PROCESOS BIOQUÍMICOS

INTRODUCCIÓN

Los procesos bioquímicos de transformación de la biomasa en energía son aquéllos que se llevan a cabo mediante diversos tipos de microorganismos, ya sean contenidos en la biomasa original, ya sea añadidos durante el proceso. Estos microorganismos producen la degradación de las moléculas complejas constituyentes de la biomasa a compuestos más simples, de alta densidad energética.

Estos procedimientos se utilizan, fundamentalmente, para tratar biomasa natural o residual de alto contenido en humedad que, si fuese tratada por métodos termoquímicos, daría unos rendimientos energéticos especialmente desfavorables, debido al alto calor de vaporización del agua.

Aunque la biomasa puede ser sometida a diversos procesos bioquímicos, también denominados *procesos de fermentación*, para su transformación en una gran variedad de productos, los procesos de fermentación más corrientes para la obtención de energía son la **fermentación alcohólica** para producir etanol (alcohol etílico) y la **digestión anaerobia**, para la producción de metano.

FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Las plantas almacenan la mayor parte de la energía solar que captan en forma de hidratos de carbono. Estos hidratos de carbono pueden presentarse de manera simple, en forma de azúcares, o en forma de polímeros: almidón o celulosa.

Cualquier producto que contenga azúcares fermentable o hidratos de carbono transformables en aquéllos (almidón o celulosa) puede servir para obtener alcohol. Este hecho es conocido hace varios milenios, durante los cuales se ha obtenido alcohol a partir de diversas materias primas en forma de bebidas alcohólicas (vino, ron,

whisky, cerveza). Ahora bien, dependiendo del tipo de biomasa de partida, es necesario analizar con detalle el rendimiento de este proceso de conversión de la biomasa en alcohol combustible, para poder evaluar su viabilidad técnica y económica, ya que, cuando la materia prima es rica en almidón o celulosa, es necesario someterla previamente a ciertos procesos para transformarla en compuestos fermentables.

Se distinguen tres grandes grupos de biomasa susceptible de ser fermentada a alcohol: azucarada, amilácea y celulósica.

Sentadas estas bases, se puede dividir el proceso global de obtención de etanol a partir de biomasa en las siguientes etapas:

- Pretratamiento de la materia prima
- Hidrólisis
- Fermentación alcohólica
- Separación y purificación del etanol

Obsérvese que este esquema es una generalización del proceso, ya que la etapa de hidrólisis es opcional, dependiendo de la biomasa que se vaya a procesar. A continuación se intenta hacer una somera revisión de los métodos empleados en cada etapa.

Pretratamiento de la biomasa

El pretratamiento tiene como objetivo transformar la biomasa a utilizar cuando ésta es poco asequible a la fermentación. El tratamiento más general y aplicable a todas las materias primas, ya que su objetivo fundamental es reducir éstas a partículas pequeñas, de forma que aumente la superficie de contacto para los procesos posteriores, es el mecánico, consistente en la trituración, molienda, pulverización, etc. de la biomasa.

Cuando se trabaja con biomasa que contiene almidón, se suele someter ésta, además, a una cocción, con objeto de gelatinizarla, es decir, impregnarla bien de agua para obtener una masa homogénea. La celulosa generalmente se trata con diversos agentes químicos (ácidos, principalmente), que permiten solubilizarla y separarla de la lignina, sustancia no fermentable.

Hidrólisis

La hidrólisis, o ruptura de las moléculas en medio acuoso, tiene como finalidad la transformación de los polímeros de glucosa (almidón y celulosa) en azúcares sencillos. Esta operación se efectúa, bien mediante fermentos o enzimas (hidrólisis enzimática), bien mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química).

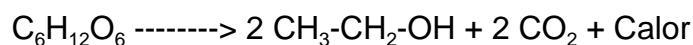
La hidrólisis enzimática se lleva a cabo con la ayuda de enzimas obtenidos de microorganismos, dependiendo las condiciones óptimas del proceso de la naturaleza del organismo productor de enzimas, y sus rendimientos del pretratamiento efectuado y del sustrato empleado.

La hidrólisis química de la celulosa se efectúa preferentemente con los ácidos clorhídrico y sulfúrico (hidrólisis ácida) o con una base fuerte (hidrólisis alcalina). Aunque en este caso la reacción es mucho más rápida que en la hidrólisis enzimática, las temperaturas de trabajo son muy superiores (mayor consumo de energía) y se producen problemas de corrosión.

Fermentación alcohólica

Una vez que la biomasa conteniendo hidratos de carbono se ha transformado en una solución azucarada se puede someter esta a un proceso de fermentación con objeto de convertir los azúcares en etanol.

La fermentación alcohólica es el proceso de conversión de la glucosa en etanol, por la acción de microorganismos. Esta transformación se produce a través de una compleja secuencia de reacciones que puede expresarse, desde el punto de vista tecnológico, por la siguiente ecuación:



Según esta reacción, de 100 kg de glucosa se obtienen 51,1 kg de etanol y 48,9 kg de dióxido de carbono. En la práctica, el rendimiento real en etanol es menor que el valor teórico, ya que aproximadamente un 5% de glucosa es utilizado por el microorganismo para producir nuevas células y otros productos de su metabolismo.

Los microorganismos generalmente empleados son las levaduras, hongos unicelulares ampliamente distribuidos en la Naturaleza. Los más utilizados en la fermentación alcohólica son los de la familia *Saccharomyces* (*S. cerevisiae*). En la acción de la levaduras influye una gran cantidad de factores, entre los que destaca la

temperatura, el pH y la concentración de azúcares.

Tradicionalmente, la fermentación alcohólica ha sido un proceso discontinuo de duración entre 2 y 3 días, después de los cuales se retira la masa fermentada para su destilación.

Separación y purificación del etanol

En la masa de fermentación, el etanol sólo se encuentra en una concentración máxima del 8 al 12%. Esto obliga a una concentración de la disolución si se quiere obtener el etanol libre de agua. Industrialmente se emplea la rectificación (una forma de destilación) para separar el etanol de la masa fermentada. Esta operación se hace normalmente en dos etapas. En la primera destilación, la fracción de cabeza contiene etanol al 50 - 60% y otros productos, mientras que la cola está compuesta por una disolución de proteínas, azúcares y vitaminas, que puede utilizarse en la elaboración de piensos compuestos para animales.

El efluente intermedio contiene una solución de etanol al 95%, pureza imposible de superar por destilación ya que se trata de una mezcla azeotrópica, es decir, de punto de ebullición constante. Este etanol es el que se encuentra comercializado en la actualidad.

Si el objetivo de la planta es obtener etanol anhidro o absoluto, es preciso romper el azeótropo agua-etanol, lo que generalmente se consigue procediendo a una nueva destilación utilizando un tercer componente (benceno, éter, hexano, etc.), que forme a su vez un azeótropo con el agua y libere al etanol seco. La pureza normal del etanol obtenido por este procedimiento es del 99,5%. Obsérvese que, cualquiera que sea el agente empleado para formar este nuevo azeótropo, ha de reciclarse posteriormente por razones económicas.

El etanol como combustible.

El etanol tiene numerosas aplicaciones industriales como disolvente y como combustible. Históricamente, el empleo del etanol como combustible de automóvil data de los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, cuando en Inglaterra funcionaron automóviles con mezclas de gasolina y etanol. Posteriormente, en 1935, Henry Ford fabricó un modelo de automóvil con un carburador adecuado para funcionar con etanol,

gasolina o una mezcla de ambos. El alcohol se abandonó como combustible después de la Segunda Guerra Mundial, cuando el petróleo se convirtió en un producto abundante y barato.

Actualmente sin embargo, vivimos precisamente una situación inversa (petróleo escaso y caro), con lo que se está convirtiendo en un hecho cada vez más importante el plantearse de nuevo la posibilidad de utilizar alcohol como combustible. Así, en la actualidad son varios los países que están estudiando el empleo del etanol, obtenido de la biomasa, como combustible, bien como componente único, bien como mezclas con gasolinas.

Para analizar las propiedades del etanol como sustitutivo total o parcial de la gasolina en su uso como combustible es necesario, en primer lugar, conocer las propiedades de cada uno de estos productos y sus posibles interrelaciones en caso de mezcla.

Los diversos estudios realizados hasta el momento respecto al uso como combustible del etanol muestran, en primer lugar, que el etanol y la gasolina no son combustibles intercambiables para un mismo vehículo. Las modificaciones fundamentales que hay que hacer en un motor de gasolina que ha de trabajar con etanol se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Aumento de la relación de compresión.
- Recalibrado del carburador.
- Calentamiento del aire que entra al carburador.
- Modificación del sistema de encendido.
- Uso de bujías especiales.

Realizando estos cambios (ya existen modelos Fiat y Volkswagen que utilizan exclusivamente etanol en sus motores) se ha logrado un incremento de la potencia del 15%, una mayor eficacia térmica (30%), menos emisiones de monóxido de carbono, pero a costa de un mayor consumo (alrededor de un 20%).

Sin embargo la adición de etanol anhidro (alrededor de un 10% en volumen) a la gasolina (mezcla conocida como *gasohol*), utilizando un motor convencional, aumenta su capacidad antidetonante, lo que permite reducir la adición de componentes de plomo a la gasolina, altamente contaminantes. Así mismo, este hecho podría ahorrar el petróleo correspondiente al volumen de gasolina sustituido, más el correspondiente al

combustible empleado en las refinerías para obtener gasolinas de un índice de octano más elevado.

Economía del etanol

El balance energético de los diversos procesos de obtención de etanol depende fuertemente del pretratamiento requerido para hacer el material fermentable. El coste energético del pretratamiento depende, a su vez, de la complejidad de la biomasa y es creciente en la secuencia: azúcares, almidón y celulosa. La energía final requerida dependerá también de si se utiliza material combustible constituyente de la biomasa que se está tratando (sus residuos) como sustituto parcial de los aportes de energía de los combustibles fósiles que se han de emplear a lo largo del proceso.

Todo ello ha hecho que algunos países consideren seriamente al etanol como una importante fuente energética a medio plazo, habiendo surgido al respecto innumerables proyectos de investigación y desarrollo.

En este aspecto, el caso más conocido es el de Brasil, cuyo plan de sustitución de la gasolina por alcoholes se gestó como consecuencia de la crisis de 1973. La primera fase del programa se comenzó a desarrollar en 1975, pudiéndose decir actualmente que se continúa con perseverancia en el mismo.

DIGESTIÓN ANAEROBIA

La fermentación es uno de los mecanismos de degradación de biomasa más frecuentes en la Naturaleza, por el que las moléculas orgánicas complejas son descompuestas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea por medio de microorganismos. Cuando la fermentación transcurre en condiciones rigurosas de ausencia de oxígeno (medio anaerobio) y se prolonga el tiempo necesario, da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como **biogás** y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (*lodo o fango*), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, el fósforo y los elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa. Este proceso es el que actualmente se suele denominar **digestión anaerobia**.

Después de más de setenta años de investigación y desarrollo, el proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de la biomasa aún no se conoce en profundi-

dad. Ello obliga a estudiar cada conjunto equipo - materia prima individualmente, con objeto de realizar el mejor diseño posible en cada caso y así poder obtener los máximos rendimientos energético y económico. Cabe esperar que los nuevos conocimientos adquiridos en la microbiología y bioquímica de la digestión lleven a mejorar este proceso.

Las materias primas

Puede servir como materia prima para la digestión anaerobia todo tipo de biomasa, especialmente la de alto contenido en humedad. Sin embargo, la viabilidad del tratamiento de cada tipo de materia orgánica depende de una serie de factores relacionados con su composición, principalmente el contenido en sólidos volátiles de la biomasa (que son los potencialmente transformables en biogás) y su contenido en nutrientes, dado que se trata de un proceso microbiológico.

En el campo de los **cultivos energéticos** hay que mencionar los experimentos realizados con algas y jacintos de agua. Ambos sustratos son fácilmente cosechables y presentan buenos rendimientos en metano. También se estudian las algas marinas.

Quizá la digestión anaerobia tenga a corto plazo muchas más aplicaciones en el campo de los residuos. Los resultados obtenidos hasta ahora con **residuos agrícolas** indican que la producción de metano es baja si no se realiza un pretratamiento debido, en muchos casos, al alto contenido en lignina de los residuos utilizados (paja, tallos, etc.). Todo indica que utilizando sustratos de menos contenido en lignina, el rendimiento aumenta considerablemente, pero estos estudios aún no están lo suficientemente desarrollados.

Los **residuos ganaderos** son particularmente interesantes como materias primas para la digestión anaerobia, ya que los rendimientos en metano son relativamente altos, debido al elevado contenido en nutrientes del sustrato. Además, el residuo digerido conserva el valor fertilizante original y está en mejores condiciones de ser almacenado y aplicado al terreno.

La digestión anaerobia se ha utilizado a menudo como tratamiento de **residuos industriales** de alta carga orgánica, fundamentalmente dentro del campo agroalimentario. Sin embargo, el planteamiento generalmente se limita a evitar contaminaciones, teniendo la obtención de energía un valor marginal no siempre suficientemente

valorado.

Los **residuos urbanos**, tanto la fracción orgánica de los residuos sólidos como los lodos procedentes de la depuración del agua residual, son materias primas posibles para la digestión anaerobia.

Química y microbiología del proceso

Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Esto es debido a que, por una parte, bajo el punto de vista químico, se desarrollan cientos de posibles reacciones, cada una de ellas catalizada por enzimas específicas para dar compuestos intermedios distintos. Por otro lado, en el aspecto microbiológico, el número de especies bacterianas presentes es muy elevado y las relaciones entre ellas son altamente complejas.

En líneas generales se puede decir que durante la digestión, la biomasa de partida, compuesta de moléculas complejas (polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina) se descompone en moléculas más pequeñas, proceso que se puede considerar que ocurre en tres etapas más o menos diferenciadas, para dar como productos finales metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Cada una de las etapas es un conjunto de reacciones llevadas a cabo por la compleja población de microorganismos presentes en el digestor, cada una de las cuales cataliza sólo un cierto número de estas reacciones. La mayoría de los microorganismos oxidan determinados compuestos orgánicos para obtener energía para su crecimiento y utilizan compuestos carbonados específicos para sintetizar sus componentes celulares. Los productos finales de un grupo de microorganismos suelen ser el alimento del grupo siguiente, de forma que a lo largo del proceso existe un delicado balance que es necesario mantener para que la digestión se desarrolle correctamente. Las tres etapas por las cuáles transcurre la digestión anaerobia se resumen a continuación.

La **hidrólisis** o licuefacción es una primera etapa que consiste en la degradación de los polímeros orgánicos complejos constituyentes de la biomasa, dando lugar a moléculas más simples.

Durante la segunda etapa, **etapa acidogénica**, las bacterias producen varios compuestos simples, que son los productos finales de su metabolismo anaerobio.

En la tercera etapa o **etapa metanogénica** los ácidos de bajo peso molecular producidos en las etapas anteriores son degradados a metano y dióxido de carbono por un grupo de bacterias altamente especializadas, denominadas *metanogénicas*.

Variables que afectan al proceso de digestión

Las condiciones óptimas y los rangos de oscilación de las variables que afectan a la digestión anaerobia han sido estudiadas por muchos investigadores que, desgraciadamente, no se ponen de acuerdo en todos los puntos. Una razón para ello puede ser que sus estudios se han desarrollado utilizando diferentes materias primas así como diversas metodologías y puntos de vista.

La naturaleza y composición del sustrato de partida dicta el régimen del proceso pero, así y todo, existe un grupo de variables que influye ostensiblemente sobre el sistema, por lo que es necesaria su medida y control, con objeto de intentar que se produzca la digestión en las mejores condiciones posibles. Estas variables son las siguientes:

- Temperatura.
- pH.
- Contenido en sólidos.
- Nutrientes.
- Tóxicos.

La digestión anaerobia puede llevarse a cabo en un amplio rango de **temperatura** (5 - 65 °C), dentro del cual aparecen dos zonas claramente definidas, correspondientes a dos grupos diferentes de bacterias: las *bacterias mesofílicas*, que se desarrollan entre los 5 y los 40 °C, y las *bacterias termofílicas*, que lo hacen en un rango de 40 a 65 °C.

En general, se opera en el rango mesofílico. Como sucede en la mayoría de los procesos biológicos, la velocidad de producción de metano se duplica aproximadamente cada 15 °C, encontrándose un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 °C. Esta temperatura combina las mejores condiciones de crecimiento de las bacterias con la mayor velocidad de producción de metano.

El mantenimiento de un **equilibrio ácido-base** (valor del pH) adecuado en el transcurso de una digestión, es uno de los principales problemas que tiene el proceso,

debido a la acusada influencia que tiene la acidez del medio sobre la producción de gas, habiéndose encontrado que el rango óptimo de pH es de 6,6 a 7,6. El valor del pH no sólo determina la producción total de biogás sino, lo que es más importante, su composición en metano, ya que por debajo de un pH de 6,2, la acidez existente en el digestor inhibe fuertemente la actividad de las bacterias metanogénicas y por debajo de un pH de 4,5, la inhibición afecta también a las acidogénicas. Efectos similares se detectan a valores del pH por encima de 8,5.

El **contenido en sólidos** de la biomasa a digerir es un factor que influye de manera considerable en el proceso anaerobio. Si la alimentación está muy diluida, los microorganismos no tienen alimento suficiente para sobrevivir. Por el contrario, una alimentación muy concentrada reduce la movilidad de las bacterias y, por tanto, la efectividad del proceso, al dificultar el acceso de aquéllas a su fuente de alimentación.

En líneas generales, el contenido en sólidos de la alimentación influye sobre el tamaño del digestor y el tiempo de duración del proceso, siendo también de importancia, aunque no bien establecida cuantitativamente, el tamaño (grado de desmenuzamiento) de los mismos.

Una célula microbiana contiene una relación de **nutrientes** C:N:P:S de aproximadamente 100:10:1:1. Por ello, y para que se produzca el crecimiento y la actividad microbiana, estos elementos han de estar presentes y disponibles en el medio y su ausencia o escasez pueden, de hecho, reducir la velocidad del proceso de digestión anaerobia.

En cuanto a los posibles **tóxicos**, dado que la digestión anaerobia tiene etapas llevadas a cabo por microorganismos estrictamente anaerobios, la primera sustancia tóxica a citar es el **oxígeno**. Concentraciones elevadas de **amoníaco**, producidas por un exceso de nitrógeno en la biomasa también inhiben la digestión. Aunque se ha citado la necesidad en el medio de **sales minerales**, excesos de sales pueden inhibir el proceso. También pueden ser tóxicos para los microorganismos diversas **sustancias orgánicas**. Se trata de algunos disolventes (alcoholes y ácidos de cadena larga en elevadas concentraciones), los pesticidas y los detergentes.

Los digestores

Un digestor anaerobio es, básicamente, un recipiente diseñado para contener la

biomasa a digerir y los microorganismos que llevan a cabo el proceso. Debe ser estanco, permitir la carga y descarga de materiales y poseer un dispositivo para recoger el gas producido. Los sistemas que permiten satisfacer todas estas necesidades van desde un bidón de petróleo usado, enterrado en el suelo, hasta sofisticados diseños con bombas, calentadores, aislamientos y equipos automáticos de carga y descarga.

Los factores principales a tener en cuenta en todo diseño de un digester anaerobio son los siguientes:

- Respecto al tipo de materia a digerir:
 - Cantidad.
 - Contenido en sólidos.
 - Digestibilidad.
- Respecto al sistema de digestión:
 - Frecuencia de alimentación.
 - Sistemas auxiliares.
 - Medida y control.

Los factores enumerados determinan las dos características principales del digester, su **tamaño** y su **tipo**.

El **tamaño del digester** viene determinado por la conjunción de tres variables interdependientes: **concentración de sólidos** del alimento, **velocidad de alimentación** y **tiempo de residencia hidráulico**.

La velocidad de alimentación, VA, expresa la cantidad de material biodegradable (normalmente expresada como sólidos volátiles) por unidad de volumen que se introduce en el digester en la unidad de tiempo y que, por tanto, puede ser transformado en biogás.

Si la velocidad de alimentación es muy baja, la actividad metabólica de las bacterias es menor y se producirán sólo pequeñas cantidades de gas. Si la velocidad de alimentación es muy alta, se producirá una sobrecarga que hará aumentar la formación de ácidos volátiles con el consiguiente aumento de la proporción de dióxido de carbono en el gas.

Por su parte, el tiempo de residencia hidráulico, TRH, es el tiempo medio que los sólidos alimentados permanecen en el digester, y se obtiene dividiendo el volumen del mismo por el caudal de alimentación.

El tiempo de retención mínimo es una constante para cada tipo de biomasa, y oscila alrededor de los cinco días. Tiempos menores impiden la reproducción adecuada de las bacterias metanogénicas, cuya velocidad de regeneración es muy baja frente a la de las bacterias acidogénicas, como ya se ha dicho con anterioridad, produciéndose el fenómeno de *lavado* del digestor, es decir, el arrastre de las bacterias con el efluente antes de que se puedan reproducir.

Por el contrario, tiempos de retención muy altos hacen que las bacterias consuman toda la materia biodegradable presente, deteniéndose el proceso por falta de alimentación. En este caso, se estaría llevando a cabo un *proceso discontinuo*, es decir, se carga la alimentación en el digestor y se deja que los microorganismos la consuman completamente, lo que da lugar a la destrucción completa de los sólidos volátiles, con la consiguiente variación de la composición del gas a medida que transcurre el tiempo.

Existen varios **tipos** básicos de digestores entre los cuales elegir, cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

El **digestor discontinuo convencional** es el sistema más simple. La alimentación es intermitente y el contenido del digestor ni se calienta ni se mezcla.

Este procedimiento no permite controlar las variables del proceso, pero su funcionamiento es muy sencillo: el material fresco a digerir se introduce en el digestor junto con un inóculo, que puede ser una parte del residuo de una operación anterior, y se cierra. En estas condiciones se inicia la digestión, que se mantiene por un período de tiempo bastante largo (40 a 100 días). Cuando la producción de gas termina, se abre el digestor y se descarga, para iniciar una nueva operación con material fresco. El gas se recoge en una campana flotante situada sobre el mismo digestor o un depósito aparte.

El **digestor de mezcla completa** lleva un sistema de calefacción para mantener la temperatura apropiada, así como un agitador mecánico o por recirculación de gas, para homogeneizar el medio.

Con este procedimiento se facilita el control de los diversos parámetros que inciden en la digestión, manteniendo el proceso estable. La alimentación puede ser discontinua o continua. En el segundo caso, por regla general, no es rigurosamente continua, sino semicontinua, es decir, por pequeñas cargas introducidas periódicamente

(generalmente, una vez al día).

El sistema discontinuo se comporta de igual forma que el convencional, aunque con mayores rendimientos; el continuo permite operar a tiempos de residencia comprendidos entre 10 y 30 días, en cuyo caso la producción y composición del gas y del efluente son prácticamente constantes.

El **digestor de contacto** tiene como característica principal un sistema para devolver parte de los sólidos al digestor. Con este procedimiento se disminuye el tiempo de retención, ya que reciclando los lodos previamente decantados, aumenta el contenido de microorganismos, con lo que se favorece la velocidad de digestión. En general, la relación reciclado/alimento varía entre 1:1 y 1:3.

En el **digestor de filtro anaerobio** la carga a tratar pasa por una superficie de sólidos inertes que retienen las bacterias anaerobias y mantienen así una concentración importante de las mismas en el interior del digestor. En consecuencia, se reducen también los tiempos de retención. El inconveniente es que estos dispositivos no toleran apenas sólidos en suspensión, ya que éstos obstruyen la matriz de sólidos inertes, siendo sólo adecuados para residuos solubles y bastante diluidos.

Características del biogás

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano y dióxido de carbono, con pequeñas proporciones de otros componentes. Dada la gran variabilidad en cuanto a composición de los sustratos susceptibles de ser digeridos anaeróbicamente, en la práctica la composición del gas es muy variable.

El rendimiento en biogás, es decir, el volumen producido por unidad de material potencialmente digerible, también es muy variable. En efecto, depende no sólo de la composición de la materia prima, sino de las condiciones del proceso: temperatura, velocidad de alimentación, tiempo de retención y tipo de digestor.

Aplicaciones del biogás

Se pueden considerar tres formas de utilización del biogás generado por digestión anaerobia:

- Aplicación directa como fuente de calor (cocina, alumbrado).
- Combustión en calderas de vapor convencionales aprovechando el calor para

calentar el digestor y para calefacción en general.

- Utilización como combustible en motores de combustión interna acoplados a generadores de electricidad.

Cuando el biogás se usa únicamente como fuente de calor, se quema en su estado original. Si se dispone de una instalación previa de gas natural o butano, basta con adaptar los quemadores a las características del biogás.

Cada día cobra mayor importancia el uso del biogás como tal en motores de combustión interna. Ello es debido sobre todo a que, con una utilización conjunta de la potencia y el calor desarrollados por el motor, este tipo de instalaciones permite un aprovechamiento de hasta un 90% de la energía contenida en el biogás.

Existen en el mercado motores que utilizan biogás con potencias comprendidas entre 15 y algunos centenares de kW. La potencia desarrollada se utiliza para accionar diversas máquinas, bien directamente, o previa su transformación en electricidad. Al mismo tiempo, el calor recuperado de la refrigeración del motor o de los gases de escape se usa para obtener agua o aire calientes, utilizables en calefacción tanto ambiental como del digestor, secado, etc. Por término medio, 1 m³ de biogás produce de 1,6 a 1,9 kW.h de electricidad y 3,5 kW.h de calor.

Aprovechamiento del efluente

El efluente es el residuo del proceso de obtención de biogás por digestión anaerobia. Es una suspensión negruzca, exenta de olores ofensivos, que sedimenta fácilmente y tiene un pH aproximadamente neutro. Está compuesto por una serie de productos inorgánicos solubles e insolubles (principalmente sales), por diferentes materiales orgánicos no digeridos (proteínas, grasas, celulosa, lignina, etc.) y por las bacterias responsables del proceso.

La utilización del efluente puede hacerse de forma integral o después de una separación de las fases sólida y líquida. Por lo que respecta a la finalidad buscada, los campos de aplicación de este efluente son, fundamentalmente, dos: la fertilización de suelos y la alimentación animal.

La riqueza del efluente en nitrógeno, fósforo, potasio y otros componentes hace del efluente un material de valor considerable como **fertilizante**. La fuerte disminución que experimenta la carga contaminante de un residuo de partida en el proceso de

digestión posibilita su aplicación al suelo en cantidades mucho mayores que las admisibles para el material de partida, sin riesgo de sobrepasar los niveles de materia orgánica que puedan provocar en el suelo disminuciones peligrosas del nitrógeno disponible, como consecuencia de desarrollos anormales de la microflora.

La otra gran alternativa de utilización del efluente es en el campo de la **alimentación** animal. El contenido en microorganismos del efluente y, por tanto, en proteínas (alrededor del 20% de la materia sólida), le confiere un gran valor potencial como aporte protéico para piensos. No obstante, las posibilidades reales de utilización de este residuo en la preparación de productos alimenticios para animales son muy limitadas, por contener junto con las proteínas, proporciones demasiado altas, tanto de fibra como de minerales.