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

F. Jarabo

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 ene 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:

$$C_6H_{12}O_6 \text{ --------> } 2\ CH_3\text{-}CH_2\text{-}OH + 2\ CO_2 + \text{Calor}$$

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 del 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 ºC), 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 ºC, y las *bacterias termofílicas*, que lo hacen en un rango de 40 a 65 ºC.

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 ºC, encontrándose un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 ºC. 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 digestor 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 digestor, su **tamaño** y su **tipo**.

El **tamaño del digestor** 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 digestor 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 digestor, 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 m^3 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.