

# vt

informe de **vigilancia** tecnológica

# mied

# 17

## situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento

*M<sup>a</sup> José Cuesta Santianes*

*Francisco Martín Sánchez*

*Gemma Vicente Crespo*

*Susana Villar Fernández*

[www.madrimasd.org](http://www.madrimasd.org)

**citme**  
mied

**ceim**  
CONFEDERACIÓN  
EMPRESARIAL  
DE MADRID  
CEDE

**EM**  
La Suma de Todos  
**Comunidad de Madrid**  
[www.madrid.org](http://www.madrid.org)

Colección de Informes de Vigilancia Tecnológica madri+d

*Dirigida por:*

José de la Sota Rius

*Coordinada por:*

Fundación madri+d para el Conocimiento  
CEIM Confederación Empresarial de Madrid - CEOE

**citme**  
**miod**



 Universidad  
Rey Juan Carlos

 Universidad  
de Alcalá

El Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME) se enmarca dentro del IV Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica (IV PRICIT). El CITME es una iniciativa de la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid en el que participan el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), la Universidad Rey Juan Carlos (URJC) y la Universidad de Alcalá (UAH).

Los autores agradecen los consejos y correcciones del informe original a:

- D. Alfonso Maillo Sánchez, Director Técnico, URBSER, S.A.

**Título:** Informe de Vigilancia Tecnológica madri+d  
"Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento"

**Autores:** M<sup>a</sup> José Cuesta Santianes, Francisco Martín Sánchez, Gemma Vicente Crespo y Susana Villar Fernández

© De los textos: Los autores

© De la colección «vt» y de la presente edición:  
CEIM Confederación Empresarial de Madrid - CEOE  
Dirección General de Universidades e Investigación  
Fundación madri+d para el Conocimiento

**Edita:** Fundación madri+d para el Conocimiento  
Velázquez, 76. E-28001 Madrid

**Proyecto Gráfico:** base12 diseño y comunicación s.l.

**Ilustraciones:** Los autores

**ISBN:** 978-84-612-9487-9

5	RESUMEN EJECUTIVO
9	EXECUTIVE REPORT
13	CAPÍTULO 1 Introducción y objetivos
17	CAPÍTULO 2 Metodología
19	CAPÍTULO 3 Producción de biogás <ul style="list-style-type: none"><li>3.1 Principios de la fermentación anaeróbica (PÁG. 21)</li><li>3.2 Materias primas para la producción de biogás (PÁG. 26)</li><li>3.3 Tecnologías de digestión anaeróbica para la producción de biogás (PÁG. 31)</li><li>3.4 Aprovechamiento del biogás producido en vertederos (PÁG. 45)</li><li>3.5 Análisis de la producción de biogás (PÁG. 51)</li><li>3.6 Análisis de las investigaciones sobre producción de biogás (PÁG. 56)</li><li>3.7 Legislación aplicable al aprovechamiento de biogás (PÁG. 71)</li></ul>
75	CAPÍTULO 4 Aplicaciones del biogás como fuente de energía <ul style="list-style-type: none"><li>4.1 Obtención de calor por combustión directa (PÁG. 78)</li><li>4.2 Generación de electricidad (PÁG. 79)</li><li>4.3 Integración en la red de gas natural (PÁG. 85)</li><li>4.4 Utilización como combustible de vehículos (PÁG. 86)</li><li>4.5 Aplicación en pilas de combustible (PÁG. 88)</li><li>4.6 Análisis de las tendencias en la aplicación del biogás como fuente de energía (PÁG. 93)</li><li>4.7 Aspectos de mercado del biogás (PÁG. 97)</li><li>4.8 Ayudas y subvenciones (PÁG. 100)</li></ul>
103	RECURSOS DE INFORMACIÓN
107	REFERENCIAS



## Resumen ejecutivo

Dos de los principales gases que producen el Efecto Invernadero,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , proceden de la fermentación, natural o acelerada, de la materia orgánica de muchos productos o residuos. Al conjunto de ambos gases se le conoce como "biogás" que si bien posee un efecto negativo para el clima, también posee una característica energética positiva debida al  $\text{CH}_4$ .

Por ambas cosas, es de gran interés el estudio y análisis sistemático de todos los aspectos que rodean a la generación y utilización del biogás, porque se evita un daño ambiental, por la energía renovable que se produce, por la gran cantidad que se puede generar y porque sustituye a otros gases (no energéticos) que se hubieran formando, si la materia orgánica se hubiera procesado de otra forma (digestión aeróbica, combustión).

El *Informe de Vigilancia Tecnológica Sectorial*, que elaborado por el CIEMAT, Universidad Rey Juan Carlos y Universidad de Alcalá, se presenta a continuación sobre "Situación Actual de la Producción de Biogás y de su Aprovechamiento", refleja una visión sistemática de los diferentes aspectos a considerar en el conocimiento del biogás, incluyendo:

- Principios bioquímicos de la formación del biogás.
- Fuentes de producción del biogás.
- Procesos existentes más utilizados.
- Tecnologías y sus características diferenciales.
- Normativa regional, nacional y comunitaria aplicable.
- Patentes existentes aplicables al proceso, tanto en producción, como en aprovechamiento.
- Diferentes aplicaciones y rendimientos energéticos.

Una completa información sobre referencias bibliográficas acerca del biogás, incluyendo las Empresas dedicadas tanto al estudio e investigación, como a procesos y utilización del biogás en España y Europa.

La Comisión Europea en su *Libro Blanco* fijaba unos objetivos para el año 2010 de 15 millones de Tep, pero en el 2006 solo se habían alcanzado 5'3 millones de Tep, lo cual indica la necesidad de redoblar esfuerzos tanto en la desgasificación de vertederos como en la instalación de nuevas plantas de proceso de biometanización aplicables a los diferentes productos bioenergéticos, que aún no son tratados, así como en investigación para lograr mejores rendimientos, tanto en generación de biogás por tonelada de fracción biodegradable, como en aprovechamiento energético (p.ej. pilas de combustible). España ha hecho un gran esfuerzo en la instalación de grandes plantas de biometanización de la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos y Desgasificación de vertederos, hasta colocarnos en el cuarto puesto europeo, pero parece que este impulso se va ralentizando.

Este informe sectorial completa a otros ya realizados y permite disponer de una visión global actual sobre un campo de investigación, desarrollo tecnológico e industrial de importancia, que, ampliamente utilizado, podría representar un porcentaje estimable en el conjunto de las fuentes energéticas necesarias, ya que es una fuente inagotable y limpia, cuya producción está cercana a los lugares de consumo.

Alfonso Maillo Sánchez  
*Director Técnico*  
URBASER, S.A.





# Executive Report

Two of the principal gases that produce the Greenhouse Effect, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, come from the natural or accelerated fermentation of the organic matter of many products or residues. Both gases are known as biogas, not only because of their negative effect for the climate, but also they have a positive energetic characteristic, due to the CH<sub>4</sub>.

Both reasons make this study and systematic analysis of all aspects related to the production and uses of biogas very interesting, because an environmental damage is avoided due to the renewable energy produced and the great quantity generated; and because it replaces other gases (not energetic) which might have developed if the organic matter had processed from other form (aerobic digestion, combustion).

The *Sectorial Technology Watch Report*, elaborated by CIEMAT, Rey Juan Carlos University and University of Alcalá, is presented next about the “current Situation of the Production and Energetic Use of Biogas». It shows a systematic overview of the different aspects to consider in the knowledge of the biogas, including:

- Biochemical principles of biogas development.
- Sources of biogas production.
- Existing processes more used.
- Technologies and its differential characteristics.
- Regional, National and European applicable regulation.
- Existing patents applicable to the process, both in production and use.
- Different applications and energetic performances.

A complete information about biogas bibliographical references, including companies dedicated both to the study and research, and to the processes and uses of the biogas in Spain and Europe.

The European Commission in its *White Book* set in 15 million Tonnes Oil Equivalent (TOE) as an objective to 2010, but in 2006 only it had been reached 5.3 million TOE. This shows the necessity for increasing efforts, both in the degassing dumps, in the installation of new biomethanization process plants applicable to the different bioenergetics products, which have not been treated yet; as well as in research to achieve better performances, both in biogas production for tonne of biodegradable fraction, and in energetic use (e.g. fuel cells). A great effort has been made by Spain in installing big biomethanization plants of the organic fraction of the Urban Solid Residues and Degassing Dump, until to achieve the fourth position in Europe, but it seems this impulse is slowing down.

This sectorial report completes others already realized and it allows to provide an important current global vision on research, technological and industrial development fields which, if it were widely used, might represent a considerable percentage in the whole necessary energetic sources, since it is an inexhaustible and clean source, whose production is close to the places of consumption.

Alfonso Maillo Sánchez  
*Technical Director*  
URBASER, S.A.



## CAPÍTULO 1

# Introducción y objetivos

Dentro del acuerdo conjunto de la Unión Europea (UE) sobre la reducción de las emisiones de gases que provocan el efecto invernadero, España tiene el objetivo particular de conseguir una reducción del 15%, respecto de los niveles de 1990, en el periodo 2008-2012. Sin embargo, en el año 2005, estas emisiones ya superaban en un 52% los niveles del año 1990, según datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA, 2007).

En este contexto, la descomposición anaeróbica (en ausencia total de oxígeno) de la materia orgánica produce un gas que contiene más de un 60% de  $\text{CH}_4$ . Este gas se designa usualmente como biogás y, si es liberado a la atmósfera, tiene un impacto equivalente a 21 moléculas de  $\text{CO}_2$  en términos de efecto invernadero (Bolin et al., 1995). Sin embargo, el biogás tiene una potencia calorífica inferior del orden de 5.500 kcal/m<sup>3</sup>, por lo que se puede utilizar como combustible renovable, ayudando a disminuir las emisiones de gases que provocan el efecto invernadero. En este sentido, el biogás se puede aprovechar para producir y vender electricidad, emplear como biocarburante de automoción, utilizar para generar calor e introducirse en la red de distribución de gas natural. Los autobuses funcionan con biogás obtenido a partir de residuos orgánicos en la ciudad de Helsingborg (Suecia) y, en la ciudad finlandesa de Vassa, el metano procedente de un vertedero alimenta las pilas de combustible, y con él se suministra calor y electricidad a aproximadamente 50 viviendas. No obstante, la vía de aprovechamiento más eficaz del biogás es la cogeneración, con la que se obtiene al mismo tiempo energía eléctrica y térmica.

Existe un gran número de residuos que contienen materia orgánica, que puede ser tratada mediante digestión anaeróbica para la obtención de biogás: la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), los fangos de estaciones de depuradoras de aguas residuales urbanas, las aguas residuales urbanas e industriales, los residuos industriales orgánicos y los residuos agrícolas y ganaderos.

Los vertederos de residuos con disposición de materia orgánica generan un gran volumen de emisiones de gases procedentes de la digestión anaeróbica de dicha materia orgánica. Mediante la instalación de plantas de aprovechamiento energético del biogás generado en vertederos se consigue el doble objetivo ambiental de aprovechar la materia orgánica para generar energía y, al mismo tiempo, reducir las emisiones de gases que contribuyen a provocar el efecto invernadero. Asimismo, la FORSU puede tratarse de forma independiente en plantas de biometanización especialmente diseñadas para la generación de biogás. En la Comunidad de Madrid (CM) existen en la actualidad varias plantas de producción de biogás localizadas en depósitos controlados de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), como las de Colmenar Viejo, Pinto, Mejorada del Campo y Alcalá de Henares, y que forman parte del Plan Azul de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, cuyo objetivo es mejorar la calidad del aire que se respira en la región.

Junto con la FORSU, los lodos de depuradora son los residuos más abundantes en la CM. La producción de lodos de depuradoras está aumentando rápidamente debido al aumento del nivel de tratamiento del agua y al crecimiento del número de estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR), como consecuencia de la puesta en práctica de la Directiva Europea sobre Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas (Directiva 91/271/CEE). El tratamiento de estos lodos, mediante el proceso de digestión anaeróbica, es una alternativa que permite el aprovechamiento de los mismos para la obtención de biogás (Muñoz y Sánchez, 2005).

Inicialmente, el tratamiento anaeróbico fue aplicado a lodos de plantas de tratamiento de aguas municipales y para tratar aguas procedentes de la industria conservera. Sin embargo, en la actualidad se emplea también para tratar agua residual industrial con elevada carga orgánica (2000 a 30000 mg O<sub>2</sub>/l de DBO). Las industrias de fabricación de bebidas, producción de leche y derivados, azucarera, textil y petroquímica son algunos ejemplos de industrias que emplean el proceso anaeróbico para el tratamiento de sus aguas residuales. Sin embargo, el tratamiento biológico de las aguas residuales de origen urbano suele ser un proceso de degradación aeróbico (en presencia de oxígeno), ya que estas aguas presentan menores concentraciones de materia orgánica (100 a 300 mg O<sub>2</sub>/l de DBO).

Asimismo, la digestión anaeróbica para la generación de biogás se puede emplear en el tratamiento de los residuos biodegradables generados en determinadas industrias como la cervecera, azucarera, conservera, alcoholera, de derivados lácteos, oleícola, alimentaria y papelera.

Por último, los residuos agrícolas y ganaderos, cuya gestión es complicada debido a la gran concentración de residuos que se produce como consecuencia del modelo de explotación intensiva, también se pueden utilizar para la generación de biogás.

La investigación tecnológica ha permitido desarrollar nuevos sistemas de digestión anaeróbica, diferentes en función del tipo de residuo a tratar, que pueden clasificarse por un lado en sistemas de tratamiento para la FORSU, los lodos de depuradora y los residuos ganaderos y, por otro, en sistemas para el tratamiento de aguas residuales. Por tanto, el sector del biogás forma parte integrante de la industria de tratamiento de residuos orgánicos.

Con 5.346,7 ktep producidos en el año 2006, según datos del barómetro de biogás EurObserv'ER del año 2007, el mercado del biogás crece de manera constante y los proyectos se multiplican dentro de la UE. Detrás de Alemania, Gran Bretaña e Italia, España ocupa, actualmente, el cuarto puesto en la lista de países de la UE, con una producción anual de 334,3 ktep. No obstante, según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), los resultados del sector demuestran que, a nivel europeo, se está aún muy lejos de los objetivos marcados en el Libro Blanco de la

Comisión Europea para este sector (*EurObserv'ER, 2007*). De mantenerse el crecimiento observado durante los últimos tres años, la producción bruta de biogás alcanzaría los 8.600 ktep en el año 2010, año para el que el citado Libro Blanco establecía un objetivo de 15 millones (*Comisión Europea, 1997*). Para alcanzar el objetivo establecido por la Comisión, el sector necesitaría, no sólo multiplicar sus plantas de producción de biogás en el conjunto de los vertederos europeos, sino también elevar la tasa bruta de valorización del biogás que, actualmente, es de alrededor del 50%.

Dentro de las energías convencionales, los sistemas de biogás son de inmediata y segura aplicación. Como fuente de energía renovable, el biogás es una fuente inagotable, limpia y que se puede utilizar de forma autogestionada. En este sentido, es una de las energías renovables más accesible, dada la facilidad de su obtención. Asimismo, su uso genera una menor contaminación ambiental y constituye una alternativa viable al agotamiento de energías fósiles, como el gas natural y el petróleo, dónde además se viene observando un incremento de los precios durante los últimos años.

El presente informe contiene información completa y actualizada sobre el proceso de producción de biogás, mediante la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos, y su posterior aplicación como fuente de energía, avanzando tecnologías que facilitan dichos procesos y analizando las tendencias e investigaciones en este sector.



## CAPÍTULO 2

# Metodología

Para la elaboración de este documento se han utilizado las bases de datos existentes con información sobre publicaciones, patentes, empresas, legislación y proyectos a nivel europeo.

Los artículos publicados en revistas desde el año 2000 hasta la actualidad han sido identificados a través del ISI WEB OF KNOWLEDGE, base multidisciplinar de revistas internacionales, congresos y sitios Web. Esta plataforma permite diversas opciones de búsqueda tanto por autores como por artículos y también contiene las publicaciones de congresos.

Las patentes con el año de publicación y las instituciones solicitantes, desde el año 2000 hasta la actualidad, se han obtenido en el portal [esp@cenet](mailto:esp@cenet), que proporciona acceso a las patentes otorgadas por la Oficina Europea de Patentes (EPO). Para realizar un análisis más completo, también se ha consultado en otras bases de datos de patentes, como las correspondientes a la Oficina de Patentes de Estados Unidos (USPTO) y al Tratado de Cooperación en materia de Patentes (Patent Cooperation Treaty: PCT), que es administrado por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI).

Por otra parte, se ha realizado una búsqueda de empresas del sector en la base de datos del IDAE, que esta disponible en su página Web.

Para la búsqueda de la legislación se consultaron dos bases de datos. En el caso de la normativa europea, la búsqueda se centró en EUR-Lex, que ofrece acceso directo y gratuito a la legislación de la UE, permitiendo realizar consultas en el Diario Oficial de la UE. Por otro lado, el Boletín Oficial del Estado (BOE) fue la fuente utilizada para la consulta de la normativa de ámbito nacional.

Por último, los proyectos europeos han sido localizados en la base de datos CORDIS de la UE.

## CAPÍTULO 3

# Producción de biogás

- 3.1 Principios de la fermentación anaeróbica (PÁG. 21)
- 3.2 Materias primas para la producción de biogás (PÁG. 26)
- 3.3 Tecnologías de digestión anaeróbica para la producción de biogás (PÁG. 31)
- 3.4 Aprovechamiento del biogás producido en vertederos (PÁG. 45)
- 3.5 Análisis de la producción de biogás (PÁG. 51)
- 3.6 Análisis de las investigaciones sobre producción de biogás (PÁG. 56)
- 3.7 Legislación aplicable al aprovechamiento de biogás (PÁG. 71)

El biogás, constituido principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), es producido por la fermentación anaeróbica (sin oxígeno) de la materia orgánica. En este contexto, su composición o riqueza depende del material digerido, como se verá en el subapartado 3.2, y también del funcionamiento del proceso.

---

---

## 3.1 Principios de la fermentación anaeróbica

La fermentación anaeróbica de la materia orgánica es un proceso complejo, realizado por microorganismos existentes en la naturaleza desde hace unos 3.400 millones de años, cuando la atmósfera todavía no tenía oxígeno y estaba compuesta por nitrógeno, dióxido de carbono, argón y vapor de agua. La materia orgánica constituye el sustrato de estos microorganismos. En la naturaleza, la fermentación anaeróbica puede tener lugar de un modo natural y espontáneo, produciendo, por ejemplo, el gas de pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes (*Campos Pozuelo, 2001*).

### 3.1.1 Etapas de la fermentación anaeróbica

La fermentación anaeróbica de la materia orgánica consta de cuatro etapas en las que intervienen diferentes tipos de bacterias: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Figura 1) (*Campos Pozuelo, 2001; Verma, 2002; Carrillo, 2003; González y Sandoval, 2005*).

#### Etapa de hidrólisis

La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación de la materia orgánica compleja. En esta etapa, las bacterias hidrolíticas actúan sobre las macromoléculas orgánicas despolimerizándolas enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos. Así, los lípidos son degradados por enzimas hidrolíticas (lipasas) a ácidos grasos de cadena larga y glicerina. Las proteínas son hidrolizadas por proteasas en proteosomas, péptidos y aminoácidos, y los polisacáridos son convertidos en monosacáridos.

#### Etapa acidogénica

Los compuestos solubles obtenidos en la etapa anterior son transformados por las bacterias acidogénicas en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), alcoholes, amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono. Los ácidos grasos volátiles son principalmente ácido acético, propiónico, butírico y valérico. En esta etapa se debe controlar la cantidad de hidrógeno, porque el metabolismo de las bacterias acidogénicas depende de él.

#### Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación (hidrógeno y ácido acético) pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, los productos intermedios (ácido propiónico, butírico, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, a través de las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtienen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono que, posteriormente, pueden

ser aprovechados por las bacterias metanogénicas. Las bacterias acetogénicas también necesitan un control exhaustivo de la concentración de hidrógeno, ya que con una elevada presión de hidrógeno se reduce la formación de acetato, produciendo preferentemente ácido propiónico, butírico o etanol en vez de metano.

**Etapa metanogénica**

En la etapa final del proceso, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas).



La principal vía de producción de metano es la primera, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica.

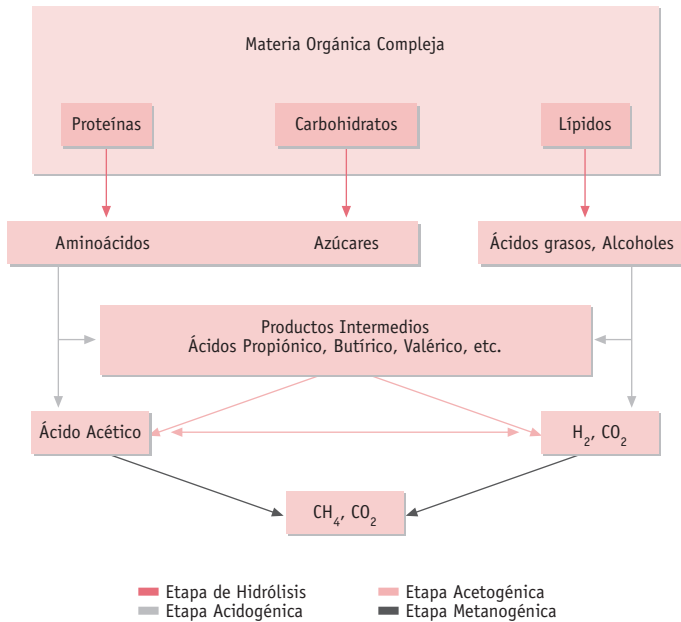


FIGURA 1 Etapas de la fermentación anaeróbica (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

### 3.1.2 Parámetros que afectan al proceso

Los factores físicos y químicos que condicionan este proceso son varios. Entre los más importantes caben destacar los siguientes: nutrientes, temperatura, pH, contenido en sólidos, tiempo de residencia, presencia de compuestos inhibidores del proceso y agitación (Campos Pozuelo, 2001; Carrillo, 2003; González y Sandoval, 2005; GTZ GmbH, 1999).

#### Nutrientes

Para el desarrollo del proceso se necesita, además de una fuente de carbono y energía, la presencia de una serie de nutrientes minerales (nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, etc.). En el medio a digerir debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, ya que valores inferiores disminuyen la velocidad de reacción. Para el fósforo la relación óptima es 150/1. Normalmente, la FORSU, los residuos ganaderos y los fangos de depuración de aguas residuales presentan nutrientes en las proporciones adecuadas. Sin embargo, en la digestión de ciertos residuos industriales puede ser necesario la adición de dichos elementos o bien un post-tratamiento aeróbico.

#### Temperatura

La digestión anaeróbica se puede llevar a cabo en un amplio intervalo de temperaturas, pero dependiendo del tipo de bacterias que se utilicen se pueden diferenciar tres intervalos diferentes (Tabla 1). En general, el intervalo mesofílico es el más utilizado, pese a que en el termofílico es donde se tiene la mayor producción de biogás. Esto es debido a la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones térmicas, lo que conlleva a un mayor control del sistema y, por tanto, a una actividad más costosa. Por otro lado, en este intervalo de temperatura el mantenimiento del sistema consume más energía que la que puede proporcionar el gas resultante.

TABLA 1 *Intervalos de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaeróbicas (GTZ GmbH, 1999).*

Bacterias	Rango de temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Menos de 20°C	±2°C/hora
Mesofílicas	Entre 20°C y 40°C	±1°C/hora
Termofílicas	Más de 40°C	±0,5°C/hora

#### pH

Es uno de los parámetros de control más habituales debido a que en cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un intervalo de pH diferente. Así, el intervalo de pH óptimo de los microorganismos hidrolíticos es entre 7,2 y 7,5, para los acetogénicos entre 7 y 7.2 y para los metanogénicos entre 6.5 y 7.5.

### Contenido en sólidos

Es también un factor determinante, ya que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y, por lo tanto, pueden verse afectadas la eficiencia y producción de biogás. Sin embargo, se puede encontrar en la literatura datos de producciones de gas importantes logradas en rellenos sanitarios con un alto contenido de sólidos (*Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991*).

### Tiempo de retención

Se define como el tiempo que el sustrato está sometido a la acción de los microorganismos en el reactor. Cabe indicar que este parámetro sólo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos (*batch*), donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos, como funcionan en condiciones estacionarias, la variable tiempo definida en el reactor discontinuo se reemplaza por el tiempo de residencia, que se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. El tiempo de residencia indica, por tanto, el tiempo que el sustrato permanece por término medio en el digestor.

Este parámetro está íntimamente ligado con el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y, consecuentemente, serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

### Inhibidores

Existen una gran cantidad de sustancias que pueden inhibir la digestión anaeróbica. Entre ellos, cabe destacar el oxígeno, aunque su efecto inhibitor no es permanente, ya que en la flora bacteriana existen microorganismos que irán consumiendo el oxígeno que pueda tener el medio. Asimismo, si la biomasa es rica en nitrógeno, se puede producir un exceso de amoníaco que inhibe el proceso. Otros inhibidores son los metales pesados, que actúan sobre los microorganismos metanogénicos. Además, algunas sustancias orgánicas, como antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones, pueden inhibir el proceso. Por último, una concentración elevada de ácidos volátiles puede producir un efecto inhibitor.

En la Tabla 2 se representan los valores de concentración inhibitora de los inhibidores más habituales. Estos valores son orientativos, ya que las bacterias se pueden adaptar con el tiempo a las condiciones más desfavorables.



TABLA 2 *Valores de las concentraciones de inhibidores comunes (GTZ GmbH, 1999).*

<i>Inhibidores</i>	<i>Concentración Inhibidora (mg/ml)</i>
Sulfuro (como azufre)	200
Cu	10-250
Cr	200- 2.000
Zn	350-1.000
Ni	100-1.000
CN	2
Na	8.000
Ca	8.000
Mg	3.000

### **Agitación**

Hay diferentes motivos para mantener un grado de agitación adecuado en el medio de digestión: mezclado y homogeneización del sustrato, distribución uniforme de calor para mantener la temperatura homogénea, favorecer la transferencia de gases y evitar la formación de espumas o la sedimentación. La agitación puede ser mecánica o neumática a través del burbujeo de biogás recirculado a la presión adecuada. En ningún caso debe ser violenta, ya que podría destruir los agregados de bacterias.

## 3.2 Materias primas para la producción de biogás

Como se ha visto, la digestión anaeróbica es un proceso biológico fermentativo, en el cual la materia orgánica es descompuesta por la acción de una serie de microorganismos bacterianos, que la transforman en biogás.

En la digestión anaeróbica se emplean diferentes substratos: fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas, aguas residuales industriales, residuos orgánicos industriales y residuos agrícolas y ganaderos. Todos estos substratos son residuos de diferente origen, por lo que su utilización para la obtención de biogás representa una ventaja añadida desde el punto de vista medioambiental.

### 3.2.1 Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)

Los RSU están constituidos por distintos componentes entre los que destacan la materia orgánica, papel y cartón, plásticos, vidrio, metales, material textil y madera. En el año 2003, se recogieron en España casi 23 millones de toneladas de RSU, de los cuales el 49 % aproximadamente correspondieron a la fracción de material orgánico, según datos de Eurostat 2004. En el año 2006 la cantidad generada alcanzó los 26 millones de toneladas debido tanto al incremento de población como a la generación de residuos urbanos por habitante.

Cuando la materia orgánica contenida en los RSU se utiliza como substrato de la fermentación anaeróbica, el proceso se denomina biometanización o biogasificación. En este proceso, la materia orgánica se transforma en biogás y en una fracción sólida más pobre que el compost, que también puede utilizarse como mejorador de suelo. Antes de la digestión anaeróbica en las plantas de biometanización es necesario realizar un pretratamiento, que consiste en la separación de la FORSU y su trituración para reducir la fracción biodegradable a un tamaño adecuado y homogéneo, que facilite la biometanización.

Por otra parte la FORSU también puede ser aprovechada para la producción de biogás en vertederos controlados. En este caso, los residuos se descargan, extienden y compactan para evitar las bolsas de aire en su interior, cubriéndose después con tierra u otros materiales apropiados, formando capas regulares sucesivas de espesores variables.

El periodo degradativo en el vertedero es diferente para cada constituyente. Así, la materia orgánica, como es el caso de los residuos alimenticios, se degrada rápidamente.

La degradación es moderada en los residuos de jardín, lenta para el papel, cartón, madera y textiles, y, prácticamente, nula para el plástico, piel y goma. Normalmente, se puede considerar que sólo los residuos alimenticios y de jardín y dos terceras partes del papel contenido en los residuos se degradan para generar biogás en el vertedero (Carreras et al., 2005).

La FORSU experimenta un proceso de fermentación inicialmente aeróbico hasta que se agota el oxígeno y las condiciones pasan a ser anaeróbicas, produciéndose el biogás. El gas generado, al difundirse a través de la masa de residuo, arrastra trazas de compuestos orgánicos y otros contaminantes gaseosos hasta la superficie del vertedero, produciendo emisiones que influyen en el efecto invernadero. No obstante, la captación de este biogás para su aprovechamiento energético o su uso como recurso en procesos de tecnologías avanzadas, permite eliminar los contaminantes atmosféricos peligrosos.

### 3.2.2 Lodos o fangos de depuración de aguas residuales urbanas

Los lodos o fangos de depuración constituyen el residuo semisólido resultante del proceso de depuración de las aguas residuales urbanas, por el cual se eliminan la mayor parte de los contaminantes disueltos y en suspensión contenidos en dichas aguas.

En general, los fangos están formados por los sólidos sedimentados del agua residual, el exceso de microorganismos producidos durante el tratamiento biológico, los productos sedimentados por coagulación natural o provocada de las partículas en suspensión o de carácter coloidal y los precipitados químicos formados por la reacción de los coagulantes con las partículas disueltas. Estos lodos, ricos en nutrientes (N, P y K), están constituidos, en algunos casos, por más del 60% de materia orgánica.

Los lodos son residuos que poseen una capacidad contaminante importante y, por tanto, también se requiere su tratamiento, siendo necesario en muchos casos su traslado. Algunas de las empresas inscritas en el registro de transportistas de residuos peligrosos (sin asumir la titularidad del residuo) de la CM, contemplan el transporte de lodos. El origen de estos residuos es muy variable, y en función de éste, las empresas son autorizadas para realizar su actividad con ellos. En el Anexo I figuran estas empresas y el tipo de lodos que pueden transportar.

### 3.2.3 Aguas residuales industriales

El origen de las aguas residuales se encuentra en un amplio número de procesos industriales que emplean el agua para fines muy variados. Según Robert A. Corbitt (Corbitt, 2003), aproximadamente dos tercios del agua residual que se genera en la

industria proviene de procesos de refrigeración. No obstante, el agua se emplea en prácticamente todos los procesos industriales, durante los cuales es alterada y su calidad degradada debido al aporte de nutrientes, sólidos en suspensión, bacterias, materia orgánica y en algunos casos elementos tóxicos.

Las aguas residuales industriales con elevada carga orgánica son susceptibles de ser utilizadas como sustrato para la digestión anaeróbica. Sin embargo, la composición de los efluentes industriales es tan variable como su caudal y depende de las particularidades de cada industria. En términos generales, las aguas residuales industriales con mayor contenido en materia orgánica son las provenientes de la industria alimentaria ( conservera, láctea, bebidas fermentadas y destiladas, carne y productos de avicultura, remolacha azucarera, levadura, café, pescado, arroz, panadería, caña de azúcar y aceites), farmacéutica, textil, industria de materiales (pulpa y papel, madera y productos petroquímicos) y química (detergentes y pesticidas) (*Nelson y Avijit, 1998*).

### 3.2.4 Residuos agrícolas y ganaderos

Los residuos agropecuarios son una fuente importante de residuos de elevado potencial contaminante en Europa, y dentro de éstos, los residuos ganaderos constituyen el principal problema ambiental. Quizá esta sea una de las causas que favorece el hecho de que los residuos ganaderos se utilicen significativamente más que el resto de residuos agrícolas para la obtención de biogás.

Los residuos agrícolas pueden ser de diversos tipos: restos de poda y ramas de cultivos leñosos, plantas verdes y tallos de cultivos herbáceos, pajas de cereales de invierno, tallos y cascarillas de cereales de primavera, restos de frutas y hortalizas, residuos plásticos de invernaderos, sustratos, residuos de productos fitosanitarios (pesticidas y fertilizantes), envases de productos fitosanitarios, aceites usados y envases que los han contenido, etc.

Los residuos ganaderos, por su parte, también son muy variados: mezcla de las deyecciones animales (sólidas y líquidas), restos de la cama, alimentos y agua en cantidades variables y con consistencia fluida o pastosa, antibióticos y otros medicamentos de uso veterinario, detergentes y envases de medicamentos de uso veterinario (*Rodríguez et al., 2007*).

La intensificación de la actividad ganadera ha supuesto la producción de grandes volúmenes de residuos orgánicos con los consiguientes problemas de gestión y eliminación que se derivan. Así, las principales implicaciones ambientales se deben a la producción y gestión del purín. Los purines están constituidos principalmente por materia orgánica (65-75% en base seca), nitrógeno (4-6% medidos como

nitrógeno elemental), fósforo (3,5-5,5% en términos de  $P_2O_5$ ), potasio (2,5-4 % como  $K_2O$ ), magnesio (0,5-1,5%) y calcio (3,5-4 %). No obstante, la composición de los purines es muy heterogénea dependiendo de la especie, edad, tipo y sistema de alimentación, sistema de limpieza, estado sanitario y fisiológico del animal, etc. (Ferrer y Sanz, 1983).

### 3.2.5 Residuos orgánicos industriales

Los residuos tratados en el apartado anterior son resultado de la producción agrícola y ganadera, pero es necesario considerar también los residuos orgánicos derivados de la industria alimentaria, pues son variadísimos y pueden llegar a ser muy importantes. No obstante, su aprovechamiento para la producción de biogás es poco significativo por el momento. Así, por ejemplo, los residuos del tomate para enlatado constituyen de un 15 a un 30% de la cantidad total del producto elaborado; en el caso de los guisantes y el maíz esta proporción supera el 75%. Mediante el aislamiento de los residuos sólidos, la concentración de sustancias orgánicas solubles en las aguas residuales se reduce y aquellos pueden emplearse con mayor facilidad como subproductos, alimentos o combustible. Este es el caso de los lodos de alpechín, obtenidos tras la evaporación en balsas del alpechín, y el alperujo, subproductos de la extracción del aceite de oliva.

### 3.2.6 Composición del biogás en función del sustrato

Como se ha explicado con anterioridad, la riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En la Tabla 3 se muestran valores medios de composición del biogás en función del sustrato utilizado.

La producción de biogás para cada tipo de sustrato es variable en función de su carga orgánica y de la biodegradabilidad de la misma (Tabla 4). En general, los residuos orgánicos industriales y la FORSU presentan potenciales elevados de producción. Los residuos ganaderos y los lodos de depuradora presentan, sin embargo, potenciales menores, debido al relativamente bajo contenido en materia orgánica y a la baja biodegradabilidad de la misma.

No obstante, existen opciones que permiten mejorar la producción de biogás de estos residuos: mezcla con residuos de mayor producción potencial (codigestión), pretratamiento para mejorar la degradabilidad del sustrato, o aumento de la temperatura para mejorar la velocidad de crecimiento de los microorganismos y la eficiencia de la fase hidrolítica.

TABLA 3 *Componentes del biogás en función del sustrato utilizado (Coomb, 1990).*

<i>Componente</i>	<i>Residuos agrícolas</i>	<i>Lodos de depuradora</i>	<i>Residuos industriales</i>	<i>Gas de vertedero</i>
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de carbono	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Sulfuro de hidrógeno	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0,5-100 ppm
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm*

\* *terpenos, ester...*

TABLA 4 *Producción de biogás en función del sustrato utilizado (Coomb, 1990).*

<i>Tipo de residuo</i>	<i>Contenido orgánico</i>	<i>Sólidos volátiles (%)</i>	<i>Producción de biogás (m<sup>3</sup>/Tm)</i>
Purines de cerdo	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	3-5	10-20
Fangos residuales	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	3-4	17-22
Fangos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	15-20	85-110
FORSU separada en origen	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	20-30	150-240

### 3.3 Tecnologías de digestión anaeróbica para la producción de biogás

Dependiendo del tipo de residuo a tratar los sistemas de digestión anaeróbica para la producción de biogás pueden ser diferentes. No obstante, se pueden dividir inicialmente en dos grupos (*De Mes et al., 2003*):

- **Sistemas de tratamiento de residuos (FORSU, fangos de depuradora y residuos ganaderos).**
- **Sistemas para el tratamiento de aguas residuales.**

El tiempo de retención hidráulica en un digestor es uno de los factores más importantes para el control de los sistemas de digestión anaerobia y representa el cociente entre el volumen del digestor y el caudal alimentado al mismo.

El tiempo de retención hidráulico es elevado en los sistemas de digestión anaeróbica de la FORSU, los fangos procedentes de la depuración de las aguas residuales y los residuos ganaderos, ya que la degradación de estos residuos necesita tiempos de digestión largos. Por esta razón, estos procesos se denominan de baja velocidad. En este caso, el tiempo de retención de los sólidos coincide con el tiempo de retención hidráulico.

En los sistemas que se utilizan habitualmente en el tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, el tiempo de retención hidráulico es relativamente corto, por lo que se denominan digestores de alta velocidad. La característica común a estos sistemas es la retención de la biomasa dentro del reactor, de manera que el tiempo de retención de los sólidos es mucho mayor que el tiempo de retención hidráulico, por lo que se consigue aumentar la eficacia del proceso.

Por otra parte, dentro de las tecnologías de digestión anaeróbica se debe considerar la **codigestión** de diferentes tipos de sustratos orgánicos, ya que permite aprovechar la sinergia de las mezclas de diferentes sustratos, así como compensar las carencias de cada uno de los sustratos por separado.

Asimismo, cuando el sustrato orgánico presenta una baja biodegradabilidad es necesario un **pretratamiento de la materia prima** para optimizar la producción de biogás.

#### 3.3.1 Sistemas para el tratamiento de FORSU, fangos de depuradora y residuos ganaderos

Los sistemas para la degradación de residuos sólidos en ausencia de oxígeno pueden clasificarse en función de la configuración del sistema (una o dos etapas), la temperatura

de operación (mesofílica o termofílica), el régimen de operación del digestor (continuo o discontinuo), y, por último, según el porcentaje de sólidos totales (ST) en el residuo orgánico (sistemas de fermentación húmeda o seca).

La configuración de los sistemas de digestión anaeróbica de residuos orgánicos puede constar de uno o varios digestores que operan en serie. En el primer digestor se llevan a cabo las etapas de hidrólisis y acidificación, mientras que en el segundo tiene lugar la etapa de metanogénesis. Con esta configuración las condiciones de operación de ambos digestores se optimizan para cada etapa. En este sentido, los sistemas formados por dos etapas presentarían ventajas importantes en el tratamiento de los residuos sólidos, ya que se obtendría una degradación mejor y más rápida de la materia orgánica. Sin embargo, esto no se ha podido confirmar a escala industrial y el 90% de la capacidad mundial de producción de biogás a partir de FORSU consiste en un único digestor en el que tienen lugar todas las etapas de la degradación anaeróbica (*De Baere, 2000*).

Asimismo, la digestión anaeróbica puede llevarse a cabo a temperaturas de operación mesofílicas (35-40°C) o termofílicas (50-55°C). Las plantas que operan a temperaturas mesofílicas han sido siempre las más habituales (*Vandevivere et al., 2002*). No obstante, el número de sistemas de temperatura termofílica ha aumentado significativamente en los últimos años. En el año 2006 las capacidades de producción mundiales de los sistemas que operan a temperatura mesofílica y termofílica a partir de FORSU fueron 2.500.000 (66%) y 1.300.000 toneladas/año (34%), respectivamente (*De Baere, 2006*).

Los biodigestores continuos operan en régimen estacionario, lo que significa que la corriente de entrada (alimento) entra de forma continua al sistema sin interrupción, a la vez que las corrientes de salida (efluente y biogás) son retirados de igual modo. Los digestores discontinuos, sin embargo, operan en régimen no estacionario. En este caso, se carga inicialmente el residuo sólido e inóculo, se cierra el digestor, se lleva a las condiciones óptimas de trabajo, se espera un cierto tiempo mientras se produce la degradación y se descarga una vez que ha finalizado la generación de gas combustible. A nivel mundial, los digestores continuos son los más comunes (*Vandevivere et al., 2002*).

En la digestión húmeda se diluye el residuo hasta una concentración máxima del 15% en ST, aunque lo habitual es que la concentración de ST esté comprendida entre 7 y 12%. En la digestión seca se trabaja con residuos con una concentración de ST superior al 15%, siendo el intervalo frecuente del 20-40%. Tomando como referencia la degradación anaeróbica de la FORSU en el año 2006, los sistemas de degradación seca supusieron el 55% de la capacidad de producción mundial de biogás y la fermentación húmeda el 44% (*De Baere, 2006*).

Como se verá a continuación, lo más habitual es que la FORSU y determinados residuos ganaderos puedan utilizarse en los mismos reactores de digestión anaeróbica, aunque con ciertas modificaciones. No obstante, en algunos casos, los sistemas para la



degradación anaeróbica de la FORSU, los lodos procedentes de la depuración de aguas residuales y los residuos ganaderos son también comparables, como es el caso del digestor continuo de mezcla perfecta, en el que se pueden utilizar los tres tipos de residuos orgánicos.

### 3.3.1.1 Tipos de digestores

El sistema más común en la fermentación húmeda es el **digestor continuo de mezcla perfecta**, que opera en régimen estacionario y consiste en un tanque en el que se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos. Esto se consigue mediante un sistema de agitación adecuado, que puede ser mecánico (agitador de hélices o palas) o neumático (mediante la recirculación del biogás generado). En la Figura 2 se representan estos biorreactores con diferentes sistemas de agitación.

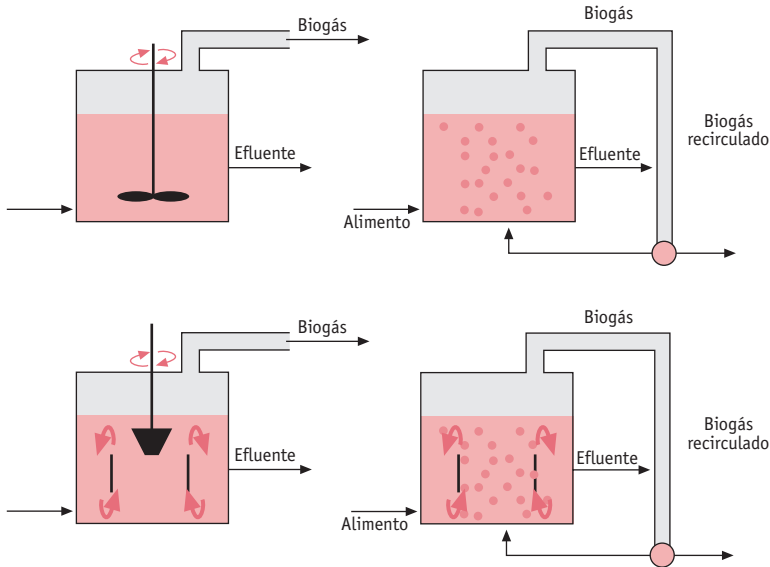


FIGURA 2 *Digestores continuos de mezcla perfecta (De Mes et al., 2003).*

El tiempo de retención varía en función de la naturaleza del sustrato y de la temperatura, pero generalmente está comprendido entre 2 y 4 semanas. Este tipo de reactores generalmente se usa para el tratamiento de residuos ganaderos con un porcentaje de ST de 2-10% y de la FORSU con concentración máxima de ST del 15%. En las plantas depuradoras de aguas residuales también se emplea en el tratamiento anaeróbico de los fangos debido a las bajas concentraciones de materia orgánica (Elias Castells, 2005).

El **digestor continuo de flujo pistón** también se utiliza en la degradación anaeróbica de residuos orgánicos. Consiste en un tubo longitudinal en el que el alimento recorre el digestor de un extremo al otro manteniendo un flujo ordenado, sin mezcla, siguiendo el modelo de un pistón en un cilindro (Figura 3). Al igual que el digestor de mezcla perfecta, este sistema opera en régimen estacionario. Sin embargo, en este caso, las etapas anaeróbicas, como la hidrólisis y la metanogénesis, se llevan a cabo en secciones diferentes a lo largo de la longitud del tubo. No obstante, una de las dificultades de estos digestores es la falta de homogeneización en la sección transversal del flujo, lo que se puede solucionar mediante un sistema de agitación. En la Figura 3 se esquematizan las tres configuraciones del biodigestor continuo de flujo pistón con mayor implantación a nivel mundial.

Los digestores discontinuos se utilizan frecuentemente para la fermentación seca de la FORSU con concentración entre el 20 y 40% de ST, así como en el tratamiento de residuos ganaderos con una alta fracción de partículas sólidas suspendidas (De Mes et al., 2003).

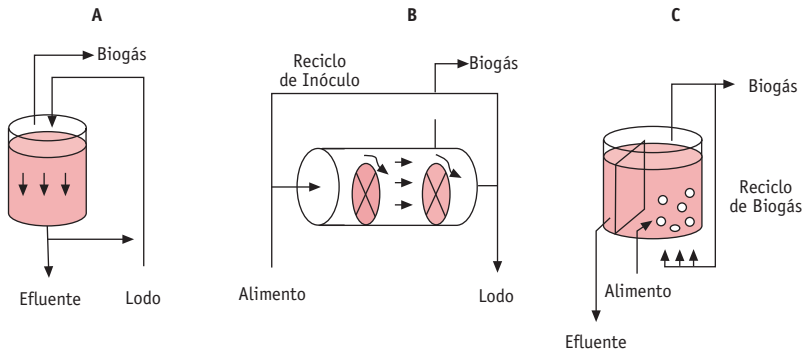


FIGURA 3 *Digestores continuos de flujo pistón. A: Diseño Dranco, B: Diseño Kampogas y BRV, C: Diseño Valorga. (Vandeviere et al., 2002).*

Por otra parte, el **digestor discontinuo** puede ser rectangular o cilíndrico y opera en régimen no estacionario (Figura 4). Las etapas de la digestión anaeróbica ocurren a diferente velocidad en el digestor discontinuo (De Mes et al., 2003).

Estos digestores se utilizan principalmente en el tratamiento de los residuos orgánicos con elevada concentración en sólidos, ya que estos dificultan la utilización de los sistemas de bombeo necesarios en los sistemas continuos. Por ello, se utilizan en el tratamiento de determinados residuos ganaderos y, en menor medida, en el tratamiento de la FORSU (De Mes et al., 2003; Elías Castells, 2005).

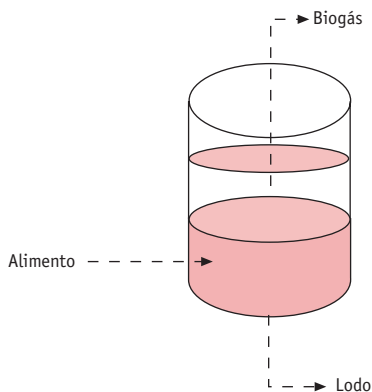


FIGURA 4 *Digestor discontinuo.*

Por otra parte, los reactores anteriores pueden combinarse para conseguir sistemas de degradación anaeróbica más eficientes en función del tipo de residuo. Como ya se ha comentado, la concepción de los sistemas de dos o más fases esta basada en el hecho de que los distintos grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica requieren diferentes condiciones de pH y tiempo de retención para su crecimiento óptimo. Ello implica la realización de las fases que constituyen el proceso de digestión en diferentes reactores. Así, en el primer reactor ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica, mientras que en el segundo se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. En el primer reactor, la velocidad de reacción viene determinada por la velocidad de hidrólisis de la celulosa y en el segundo por la velocidad de crecimiento microbiano. Este tipo de sistemas ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos y fangos complejos cuyo limitante es la etapa de hidrólisis (Elias Castells, 2005).

### 3.3.1.2 *Procesos industriales*

A nivel industrial se han desarrollado diferentes procesos basados tanto en la fermentación húmeda como seca. Estos procesos constan de una o varias etapas (De Mes et al., 2003).

Entre los **sistemas húmedos**, que se están utilizando en la actualidad en las plantas de producción de biogás, destacan los procesos AVECON o proceso Vaasa, VAGRON, Bigadan, ENVITAL/ROS ROCA, HAASE, LINDE y BTA.

En Europa existen 4 plantas del **proceso AVECON** (Braber, 1995; Jong et al., 1993). Este proceso puede trabajar tanto a temperaturas termófilas como mesófilas. La planta situada

en Vaasa (Finlandia) opera a las dos temperaturas mediante dos sistemas en paralelo. Este proceso consta de un reactor que está dividido en dos compartimentos para poder incluir una etapa de pre-digestión. El sistema de agitación es neumático, mediante la recirculación del biogás. Este sistema ha sido utilizado para la degradación de varios tipos de residuos orgánicos (FORSU, lodos de depuradora, etc.). La producción de biogás varía entre 100 y 150 m<sup>3</sup>/ton de residuo añadido, con una reducción de volumen del 60%.

El **proceso VAGRON** (*Vagron, 2000*) se utiliza principalmente en la digestión anaeróbica de la FORSU. La planta de Groningen (Holanda) trata RSU, iniciándose el proceso con la separación mecánica de la FORSU, que posteriormente pasa a la etapa de digestión. En el reactor la temperatura del proceso de fermentación es aproximadamente de 55°C (fermentación termófila) y el tiempo de residencia de la materia orgánica es de aproximadamente 18 días. Durante ese tiempo el 60% de la materia orgánica se transforma en metano, produciendo un total de 125 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de FORSU.

El **proceso Bigadan** (*Hjort-Gregersen, 2000; Caddet Centre or renewable energy y OECD, 2000*) fue desarrollado por la compañía Krüger en Dinamarca y existen más de 20 plantas operativas en este país (Davinde, Fangel, Grindsted, Mysted, etc.). Este sistema se utiliza para la codigestión de residuos ganaderos, residuos industriales y residuos urbanos. Inicialmente, el RSU se introduce en una trituradora donde se reduce el tamaño hasta aproximadamente 80 mm. El producto obtenido se transporta mediante cintas transportadoras hasta un segundo triturador, pasando previamente por un separador magnético que elimina los metales, para obtener finalmente piezas de 10 mm que son mezcladas con los residuos de ganado y los lodos. Esta mezcla se transporta al tanque de preparación donde se produce una agitación intensa y homogénea de modo que se forme una suspensión y, desde allí, se bombea a dos tanques de pasteurización que se encuentran a 70°C. El digestor opera a 38°C con un tiempo de retención hidráulica de 20-24 días. La cantidad diaria de biomasa digerida es de aproximadamente 200 toneladas produciendo entre 8.000 y 9.000 Nm<sup>3</sup> biogás/día.

El **proceso ENVITAL/ROS ROCA** consta de una etapa de fermentación que opera a temperaturas mesófilas. Existen numerosas plantas en Europa basadas en esta tecnología: Vasteras y Skelleftea (Suecia), Deisslingen y Gesher (Alemania), Isla de Saarema (Estonia), Viena (Austria), Lommel (Bélgica), Krosno (Polonia), Voghera (Italia), São Martinho do Porto (Portugal), etc. En nuestro país existen varias plantas en funcionamiento (Lanzarote, Ávila, Palma de Mallorca, etc.). La planta de Zonzamas (Lanzarote) está diseñada para operar 36.000 toneladas/año de FORSU y lodos de depuradora.

La primera planta de biometanización del **proceso HAASE** se construyó en Groeden (Alemania) en 1995-96 para la codigestión de diferentes residuos orgánicos (residuos ganaderos, de la industria alimentaria, etc.). En nuestro país la única planta que opera en dos etapas está basada en esta tecnología y está situada en San Román de la Vega (León). Esta planta entró en funcionamiento en 2005 y tiene una capacidad de

tratamiento de 200.000 toneladas/año de RSU. El proceso incluye un tratamiento mecánico previo para la separación de metales, papel y plásticos. La fracción orgánica (50.000 toneladas/año) se transforma en biogás en dos digestores de 600 m<sup>3</sup> cada uno que operan a temperaturas mesófilas.

Otro proceso de biometanización húmedo es el desarrollado por **LINDE** en dos etapas y a temperaturas mesófilas o termófilas. Las plantas de biometanización de FORSU situadas en la zona franca de Barcelona (150.000 toneladas/año) y Pinto en Madrid (140.000 toneladas/año) están basadas en este proceso. En Europa existen numerosas plantas para el tratamiento de diferentes residuos orgánicos. Algunos ejemplos son la planta de codigestión de residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora de Radeberg (Alemania), la planta para la co-fermentación de residuos biológicos y purines de Fürstenwalde (Alemania) y la planta de biometanización de FORSU de Wels (Austria).

El **proceso BTA** (Jong et al., 1993; Vandevivere et al., 2002) fue desarrollado en Alemania para la digestión de la FORSU. Este sistema consta de las siguientes etapas: pretratamiento de los RSU por medios mecánicos, térmicos y químicos; separación de sólidos biológicos disueltos y no disueltos; hidrólisis anaeróbica de sólidos biodegradables; y metanización de los materiales biológicos disueltos. La metanización se produce a bajas concentraciones de sólidos y temperaturas mesófilas. Después de la deshidratación, los sólidos no degradados, con una concentración de sólidos totales del 35%, se utilizan como material de compost.

Como ya se ha comentado, los **sistemas de degradación seca** tienen un mayor nivel de implantación industrial que los correspondientes sistemas de degradación húmeda (De Baere, 2006). En la actualidad, las plantas de producción de biogás, mediante fermentación seca, utilizan principalmente los procesos Valorga, Dranco, Kampogas y BRV, Biocell y Linde.

El **proceso Valorga** (Jong et al., 1993; Vandevivere et al., 2002) es un proceso semicontinuo que consta de una etapa. Fue desarrollado en Francia y la primera planta comenzó a operar en 1988 en Amiens. El digestor es cilíndrico y tiene en su base alrededor de 300 difusores que permiten la inyección de biogás recirculado a alta presión (8 bares) para conseguir la agitación y homogeneización de los residuos. Estos se introducen de forma continua por la base del reactor, ascienden impulsados por el biogás y deben de dar la vuelta a una pared interior de hormigón antes de llegar a la salida. Este recorrido les obliga a quedarse en el reactor durante tres semanas, hasta su completa degradación. El biogás producido por la fermentación bacteriana se capta y almacena a la salida. En estos reactores el tiempo de residencia es de 18-25 días. Las producciones de biogás son del orden de 80-160 m<sup>3</sup>/ton. El lodo obtenido se prensa posteriormente y se vende como compost. En la planta de Amiens se combinan cuatro reactores mesófilos con la incineración de residuos y materia no digerida. Las dos nuevas plantas de Madrid también utilizan este proceso con gran capacidad de tratamiento de residuos, de aproximadamente 200.000 T/año.

El **proceso Dranco** (Dry Anaerobic Composting) (Jong et al., 1993; Vandevivere et al., 2002; De Baere, 2000) fue desarrollado en Gent (Bélgica) y se lleva a cabo en un reactor vertical de flujo de pistón sin mezcla mecánica. El alimento se introduce por la parte superior del reactor, y el material digerido es eliminado por la base al mismo tiempo. Parte del material digerido es reciclado y utilizado como material de inoculación, mientras que el resto se utiliza como compost. El digestor puede operar a temperaturas mesófilas y termófilas, y a concentraciones elevadas de sólidos. El contenido total de sólidos del digestor depende del origen de los residuos, pero suele estar en el intervalo de 15 a 40%. El tiempo de residencia del reactor es entre 15 y 30 días, la temperatura de operación es 50-58°C y el biogás producido está comprendido entre 100 y 200 m<sup>3</sup>/tonelada, con un contenido en metano del 55%.

El **proceso Kampogas** (Jong et al., 1993; De Baere, 2000) es un sistema de digestión termofílico de alto contenido en sólidos que ha sido desarrollado en Suiza. Es similar al anterior con la diferencia de que el proceso tiene lugar en un reactor cilíndrico horizontal. Este reactor está equipado con un agitador guiado hidráulicamente, lo que garantiza que los residuos que tienden a flotar se mantengan el tiempo suficiente en el reactor para que puedan ser digeridos. Una parte del material orgánico se recircula como inóculo.

El **sistema BRV** (Vandevivere et al., 2002) se desarrolló en Suiza y es un sistema de conversión aeróbico/anaeróbico, en el que la fase anaeróbica es el sistema Kampogas descrito anteriormente.

El **proceso Biocell** (Jong et al., 1993; Brummeler-ten, 2000) opera de forma discontinua (por lotes) y a temperaturas termofílicas. La alimentación del digestor, con una concentración de 30-40% de sólidos totales, se obtiene mezclando los residuos orgánicos entrantes con los sólidos digeridos obtenidos en la etapa anterior. Los residuos se mantienen dentro del digestor hasta que la producción de biogás cesa. En 1997 una planta a escala industrial comenzó a funcionar en Leystad (Holanda). Esta planta trata 50.000 toneladas por año de residuos sólidos produciendo energía y compost. El tiempo de retención es de aproximadamente 21 días.

Además de la tecnología de degradación húmeda, **Linde** ha patentado un proceso de fermentación seca que opera a temperaturas termófilas o mesófilas en un biorreactor tubular con orientación horizontal, lo que permite maximizar la superficie de salida de biogás. Con esta configuración, el flujo secuencial permite el control del tiempo de residencia de la masa y asegura la higienización en el proceso termófilo. Las plantas de codigestión de purines, residuos de gastronomía y FORSU de Rügen (Alemania) y de tratamiento anaeróbico-aeróbico de FORSU y residuos vegetales de Baar-Blickendorf (Suiza) están basados en esta tecnología. En nuestro país, la planta de biometanización de Valladolid es un ejemplo de este proceso.

### 3.3.2 Sistemas de tratamiento para aguas residuales

Como se comentó con anterioridad, los procesos de degradación anaeróbica se utilizan generalmente en el tratamiento de las aguas residuales de origen industrial que presentan valores elevados de DBO.

En la actualidad, existen diversos sistemas utilizados para el tratamiento biológico anaeróbico de la materia orgánica contenida en las aguas residuales: el digestor de contacto anaeróbico, el digestor de filtro anaeróbico, el digestor de capa de lodo anaeróbico con flujo ascendente y el digestor de circulación interna (*De Mes et al., 2003*). Todos ellos son sistemas de digestión de alta velocidad, es decir, el tiempo de retención de los sólidos es mayor que el correspondiente tiempo de retención hidráulico. Los sistemas de alta velocidad resultan más adecuados para aguas residuales, ya que contienen concentraciones bajas de sólidos.

El **digestor de contacto anaeróbico** (Figura 5) es un sistema de cultivo en suspensión que emplea una unidad de separación de sólidos por sedimentación (o filtración) para recircular los microorganismos. En los digestores es importante que tenga lugar una buena mezcla del sustrato a descomponer y de los lodos recirculados que contienen los microorganismos para favorecer la acción de estos últimos. Esto se consigue mediante agitación mecánica o recirculación del biogás. La importancia de esta agitación aumenta con el tamaño del digestor, ya que cuanto mayor es el mismo, más posibilidades hay de que aparezcan zonas de no contacto en las que no tenga lugar la degradación. El efluente procedente del digestor se desgasifica y se introduce en la unidad de decantación en la que se separan los lodos, que se recirculan a la unidad de digestión, introduciéndose por el fondo. La eficiencia del proceso depende fundamentalmente de que haya una buena sedimentación.

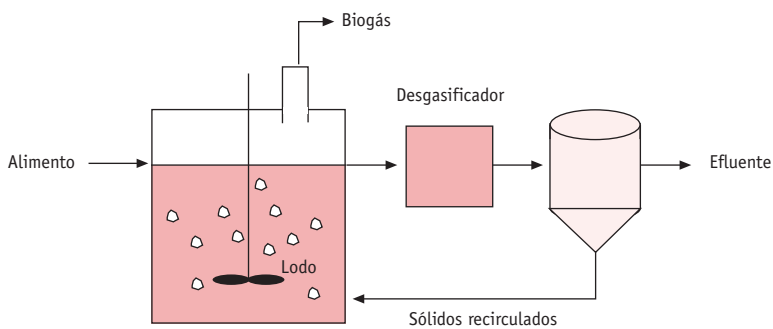


FIGURA 5 Diagrama de un sistema de contacto anaeróbico (AC).

El **digestor de filtro anaeróbico** (Figura 6) está dotado de un filtro de material inerte para que los flóculos bacterianos queden atrapados o se adhieran y las bacterias crezcan entre los huecos, permitiendo así una elevada concentración de las mismas en

el reactor. De esta forma, se evita que las bacterias responsables del proceso anaeróbico se pierdan en la separación de los lodos. El flujo puede ser ascendente o descendente y el material de relleno puede tener una orientación especial o estar desordenado, pero debe ser muy poroso, ligero y poseer una gran superficie específica para favorecer la adhesión de las bacterias. Sin embargo, la mayor o menor porosidad no va a condicionar el rendimiento, puesto que la mayor parte de la actividad la realizan los microorganismos en suspensión, no los adheridos al filtro. El principal inconveniente que tienen estos reactores es que no pueden ser alimentados con efluentes que contengan muchos sólidos en suspensión, ya que podrían quedar obturados. Son más adecuados para aquellos casos en que la carga orgánica está principalmente disuelta como es el caso de las aguas residuales.

Un caso especial de reactores de filtro anaeróbico es el **digestor de película fija**. El filtro está formado por tubos cilíndricos orientados en el sentido del flujo para evitar que se produzca el atasco. Suelen trabajar con flujo descendente y admiten substratos de composición muy variable.

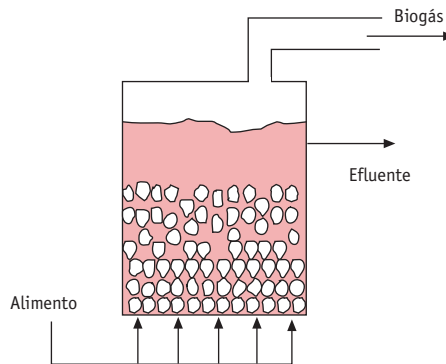


FIGURA 6 *Esquema de un reactor anaeróbico de filtro.*

Otro tipo de digestor empleado en el tratamiento de las aguas residuales es el **reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Bed) o reactor de capa de lodo anaeróbico con flujo ascendente** (Figura 7). Este tipo de reactor fue desarrollado en Holanda y es de alta eficiencia, aunque su estructura es relativamente simple. No contiene relleno y generalmente no necesita agitación. El agua residual a tratar se introduce por la parte inferior del digestor y fluye en sentido ascendente a través de un manto o cama de fango constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente. El tratamiento se produce al entrar en contacto el agua residual y las partículas. El biogás producido provoca una circulación interior, que colabora a la formación y mantenimiento de los gránulos, removiendo el manto de fangos y permitiendo el intercambio de estos con el agua residual. Parte de este gas se adhiere a las partículas biológicas y tanto el biogás libre como las partículas a las que se ha adherido el gas, ascienden hacia la parte superior del digestor biológico.



Allí, se produce la liberación del biogás adherido a las partículas, al entrar éstas en contacto con unos deflectores desgasificadores. Las partículas desgasificadas vuelven a caer a la zona inferior del digestor y el biogás se captura en una bóveda de recogida de gases instalada en la parte superior del reactor. El agua residual tratada, que contiene algunos sólidos residuales y algunos gránulos biológicos, abandona el reactor por rebose y se conduce a una cámara de sedimentación, donde se separan los sólidos residuales y se reconducen a la superficie del manto de fango a través del sistema de deflectores.

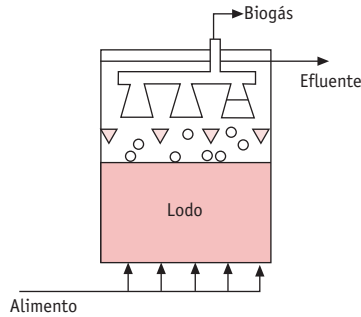


FIGURA 7 Diagrama de un reactor de tipo UASB.

Por último, el **reactor IC (Internal Circulation) o reactor de circulación interna**, está basado en la tecnología del proceso UASB con dos etapas de separación trifásica. El sistema consta de dos etapas tipo UASB colocados uno sobre el otro, como se puede observar en la Figura 8. En el compartimento inferior la concentración de materia orgánica es elevada, mientras que en la superior es pequeña. El afluente se introduce en el primer compartimento por la base del sistema a través de un sistema de distribución interno. En el compartimento inferior, que contiene un manto concentrado y expandido de lodo granular, la mayor parte de la materia orgánica se convierte en biogás. Esto provoca la expansión/fluidización del lecho de lodo que se eleva por la velocidad ascendente provocada por la mezcla del afluente, la recirculación interna y el flujo del biogás. El contacto que se realiza entre el agua residual y la biomasa produce un lodo muy activo, que tiene la capacidad de tratar elevadas concentraciones de materia orgánica con elevada conversión. El biogás producido en esta primera etapa se recoge en los colectores de gas inferiores, empleándose para promover el ascenso del agua residual tratada y el lodo a través de una tubería central ascendente que termina en el tanque desgasificador situado en la parte alta del sistema. El biogás sale del digestor y la mezcla de agua tratada y el lodo desciende directamente al fondo del digestor por una tubería central descendente equivalente a la anterior. El efluente de la primera etapa se dirige a la segunda, donde se mejora la eficacia del proceso, degradándose el resto de la materia orgánica. El biogás producido en la segunda etapa se recoge en los colectores superiores, mientras que el efluente tratado abandona el reactor por rebose.

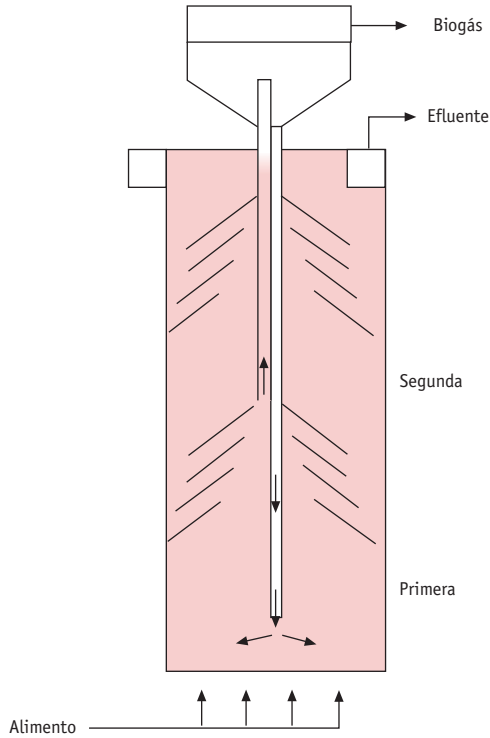


FIGURA 8 Diagrama de un reactor de tipo IC.

### 3.3.3 Codigestión con otros residuos orgánicos

El término codigestión hace referencia a la digestión anaeróbica conjunta de dos o más sustratos de origen orgánico con el fin de aprovechar la complementariedad de las composiciones de los diferentes sustratos. En este sentido, la principal ventaja de la codigestión es que las mezclas permiten compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado (*Brinkman, 1999*).

Se han conseguido buenos resultados con la codigestión de residuos ganaderos con varios tipos de residuos orgánicos industriales (*Brinkman, 1999*), así como en las mezclas de lodos de depuradora y FORSU (*Di Palma et al., 1999; Hamzawi et al., 1998*), la mezcla de estos últimos con aguas residuales urbanas (*Edelmann et al., 1999*) y la codigestión de lodos de depuradora y residuos agrícolas (*Dinsdale et al., 2000*).

Los residuos urbanos e industriales suelen contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable como lípidos, carbohidratos y proteínas, por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos, de 30 a

500 m<sup>3</sup>/ton, mejorando la viabilidad económica de las plantas. Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas para su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaeróbicos, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoque problemas mecánicos (*Banks y Humphreys, 1998*).

Los residuos ganaderos, en concreto los purines de cerdo, pueden ser una buena base para la codigestión, porque generalmente presentan un contenido de agua más alto que la mayoría de residuos industriales, mayor capacidad tampón y además aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos (*Angelidaki y Ahring, 1997*).

En la Tabla 5 se indican las características relativas para la codigestión de residuos orgánicos de diferente origen. Las flechas de sentidos diferentes indican un interés en la mezcla, al compensarse la carencia relativa de uno de los dos residuos. En los lodos de planta depuradora la alcalinidad es muy variable lo que dificulta su caracterización relativa.

TABLA 5 *Caracterización relativa para la codigestión de diferentes residuos orgánicos (Campos Pozuelo, 2001).*

	<i>Residuos ganaderos</i>	<i>Lodos EDAR</i>	<i>FORSU</i>	<i>Residuos industria alimentaria</i>
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑	↑

### 3.3.4 Pretratamientos de la materia prima

La baja biodegradabilidad de los lodos y los purines hace que la hidrólisis de las partículas sólidas sea la etapa limitante del proceso. La hidrólisis de los compuestos sólidos puede ser mejorada mediante ciertos pretratamientos.

En el caso de los lodos de EDAR varias alternativas han dado buen resultado, como pretratamiento térmico, adición de enzimas, ozonización, solubilización química por acidificación o hidrólisis alcalina, desintegración mecánica y uso de ultrasonidos de baja frecuencia.

Mediante los tratamientos químico-térmicos se pretende, a partir de ácido y calor, provocar la solubilización o el aumento de biodegradabilidad del lodo. Así, en la hidrólisis ácida, se añade un ácido a la corriente de lodos y, a continuación, se introduce en un reactor presurizado y a alta temperatura. La corriente así tratada se recicla al reactor biológico para que, de esta manera, se degraden los componentes resultantes.

En la misma línea se han realizado otros pretratamientos para aumentar la biodegradabilidad de los lodos, sin embargo, muchos de éstos resultan demasiado costosos y no son todavía asequibles para su aplicación industrial. Uno de los más viables, en especial por los costes descritos, es el basado en la utilización de ultrasonidos. Mediante su utilización se han descrito aumentos de la biodegradabilidad de los sólidos volátiles de hasta el 50% (*Tiehm et al., 1997*).

Para mejorar la biodegradabilidad de los purines de cerdo, el pretratamiento térmico a baja temperatura (80°C) produce un incremento en la producción de biogás de hasta el 60% de CH<sub>4</sub> por unidad de sólido volátil. El resultado depende del tipo de purín a tratar: para purines envejecidos la concentración de nitrógeno amoniacal y el pH aumentan, provocando mayores problemas de inhibición, lo que se traduce en menores producciones de metano (*Bonmatí, 2001*).

Una alternativa al pretratamiento, con el objetivo de optimizar la producción de biogás, es la codigestión del substrato con otros residuos orgánicos, descrita en el apartado anterior.

## 3.4 Aprovechamiento del biogás producido en vertederos

Como ya se ha comentado previamente, para que un vertedero genere biogás es necesario que las basuras depositadas incluyan materia orgánica y que las condiciones de su descomposición puedan llegar a ser anaeróbicas. Por ello, este gas se genera y capta en los vertederos controlados de RSU. Dichos vertederos se caracterizan por la colocación de los residuos en celdas impermeabilizadas de cara a la recolección y tratamiento de las emisiones gaseosas y líquidas (lixiviados) que se forman.

En este contexto, se debe tener en cuenta que España tiene que cumplir el Real Decreto 1481/2001, que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, y reducir la cantidad de residuos sólidos biodegradables destinados a vertedero para que sea inferior, en el año 2016, al 50 % de la cantidad total de residuos que había en 1995.

### 3.4.1 Fases de la formación del biogás en el vertedero

La formación de los gases en el vertedero se puede dividir en 5 fases (Álvarez *et al*, 2001; Carreras y Dorronsoro, 2006), como se puede observar en la Figura 9:

#### Fase inicial (I):

Es la fase inmediata al vertido y es aeróbica. En ella predomina el  $N_2$  y hay una creciente formación de  $CO_2$  a la vez que disminuye el oxígeno. Tiene una duración aproximada de 15 días.

#### Fase de transición (II):

Se produce la transición a las condiciones anaeróbicas, reduciéndose los sulfatos y los nitratos.

#### Fase ácida (III):

Es la primera fase anaeróbica y se caracteriza por la ausencia de aire. Se produce la formación de ácidos de fermentación y al final de la misma se alcanza la mayor concentración de  $CO_2$ . Su duración es de aproximadamente 2 meses.

#### Fase metanogénica (IV):

Constituye la segunda fase anaeróbica donde se produce la formación del metano ( $CH_4$ ). Se estima que tiene una duración de 2 años.

### Fase de maduración (V):

Sería la fase final, en la cual la materia orgánica es ya de naturaleza escasamente biodegradable y existe una clara disminución en la producción de los gases en el vertedero. Tiene una duración entre 10 y 30 años.

En el caso de la producción de biogás en los vertederos hay que tener en cuenta que, a diferencia de los digestores de residuos donde los parámetros de descomposición de la basura pueden estar bastante controlados (temperatura, grado de humedad, flujos, etc.), la mayor parte de los parámetros no pueden ser ajustados (Beyebach, 2005). Por ejemplo, la temperatura ambiental, que afecta en el caso de los vertederos a la temperatura de la masa de residuos, la presión atmosférica o el grado de humedad de los residuos no son parámetros controlables. Incluso la propia composición del residuo que se vierte no es estable a lo largo del tiempo. Todo esto, junto con el hecho, además, de que el biogás de vertedero se está formando durante un gran número de años (la duración total de las 5 fases puede llegar a ser de 25 años) hacen que el combustible obtenido en un vertedero pueda tener unas características variables en el tiempo.

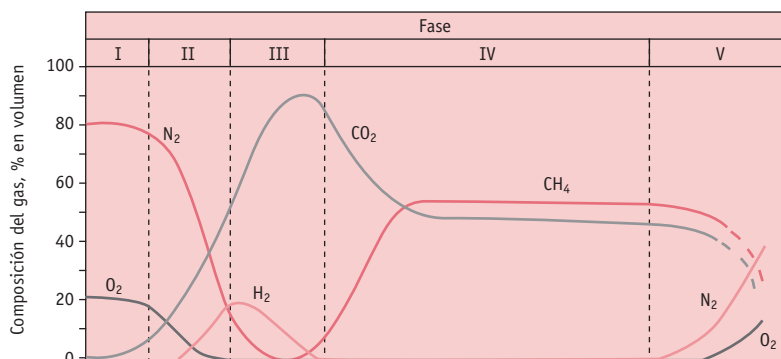


FIGURA 9 Fases de generación de biogás en vertedero (Carreras y Dorronsoro, 2006).

De todo el gas generado, aproximadamente entre un 50 y un 60% estará dispuesto para su recolección y, de éste, un 60% estará disponible durante los 10 primeros años, un 35% en los siguientes 10 años y el resto en un plazo posterior de 20 a 30 años. Además, se debe tener en cuenta que durante la fase de maduración empieza a producirse una importante disminución en la producción de los gases en los vertederos. Esto repercute en el aprovechamiento económico del biogás, debido a que las emisiones son aprovechables energéticamente de manera rentable sólo a una intensidad y composición determinada.

### 3.4.2 Etapas de los sistemas de desgasificación de los vertederos

Una vez generado el biogás, su obtención se lleva a cabo mediante sistemas de desgasificación, los cuales se componen de tres elementos principales: sistema de captación de gases, conducción y control, y transporte.

La **captación de gases** se realiza mediante una red de pozos verticales y/o zanjas horizontales, distribuidos por toda la superficie del vertedero. El diseño de la red de captación de gas en un vertedero se realiza mediante ensayos en campo que permiten calcular el radio de influencia de un pozo. En función de la zona del vertedero, varía la tasa de generación de biogás, la permeabilidad al paso del mismo y la profundidad del vaso del vertedero, lo que hace necesario en algunos casos, acercar los pozos y permite en otros, separarlos (*Martín, 1997*). Aunque el espaciado entre pozos es muy variable, se considera habitual, un radio de influencia de 20 m (*Brown y Maunder, 1994*).

Para realizar la perforación de los pozos existen diferentes técnicas, pero considerando la enorme heterogeneidad del material existente en los vertederos, la experiencia ha llevado a desarrollar la técnica de la perforación mediante barrena helicoidal discontinua. Su funcionamiento consiste en la introducción de la barrena en el vertedero para avanzar por cada movimiento, según el material, de 10 a 100 centímetros, extrayendo a la superficie los residuos excavados. De este modo, se consigue tener la barrena en perfecto estado en todo momento, con lo que se optimiza el rendimiento de la perforación.

Una vez realizados los pozos se introducen en ellos unas tuberías (normalmente de polietileno) ranuradas en un 20-30% de su longitud, con objeto de que penetre el gas, y una parte ciega en lo más alto. El espacio anular existente entre la tubería y la pared del pozo se suele rellenar con material que en ningún caso será de tipo calcáreo, ya que sería disuelto por el conjunto biogás-condensados-lixiviados (Figura 10). En los últimos metros, donde la tubería es ciega, y para evitar la entrada de oxígeno al pozo, se rellena con un material aislante, incluyendo algún tipo de material de separación entre ambas capas, como puede ser una junta de plástico, caucho, etc., con el objetivo de impedir la entrada de oxígeno a los conductos de transporte de biogás.

Una vez captado el gas hay que trasladarlo desde la superficie de los pozos hasta los colectores. Para ello, se disponen una serie de tuberías, habitualmente de polietileno, tal y como se muestra en la Figura 11. En este tramo se ubica la valvulería de medición y control de los caudales aportados por cada pozo con el objetivo de mantener constante el porcentaje de metano en el biogás que llega a la combustión, controlando los niveles de oxígeno presentes en el gas, mediante la presión de aspiración de modo que no exista posibilidad de que la mezcla metano-oxígeno se vuelva explosiva. Actualmente, estas tuberías quedan enterradas bajo varias capas de áridos, pero para una gestión óptima del campo de gas, conviene que se encuentren en la superficie del

vertedero, de tal modo que cualquier trabajo de mantenimiento sobre la misma sea sencillo: extracción de condensados, conservación de pendientes en los tendidos, etc. La conducción y el control de los gases hasta los colectores principales, es quizás, el punto que más diferencia las técnicas de desgasificación.

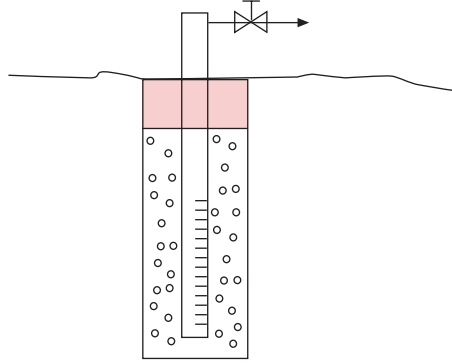


FIGURA 10 *Esquema de un pozo de biogás (Noguer, 2006).*

A escala comercial, existen básicamente dos **métodos de control de biogás**: automático y manual. El primero consiste en dotar al sistema de analizadores de metano y oxígeno, caudalímetros y tomas de presión que, de forma automática, envían los datos a un autómata central que reacciona regulando de una forma u otra las válvulas instaladas. El sistema manual se basa en la instalación en cada pozo de válvulas de regulación y puntos de toma de muestras manuales, de modo que un operario una o dos veces por semana comprueba el estado de todos los pozos y, en consecuencia, regula las válvulas. El sistema manual, aunque parezca muy precario, resulta bastante adecuado, ya que las variaciones de caudal y presión en los pozos se producen de forma lenta y progresiva y casi nunca repentina. En este sentido, son fácilmente detectables en un seguimiento continuo, por lo que no es preciso instalar un sistema automático, que se caracteriza por un coste elevado de montaje y mantenimiento.

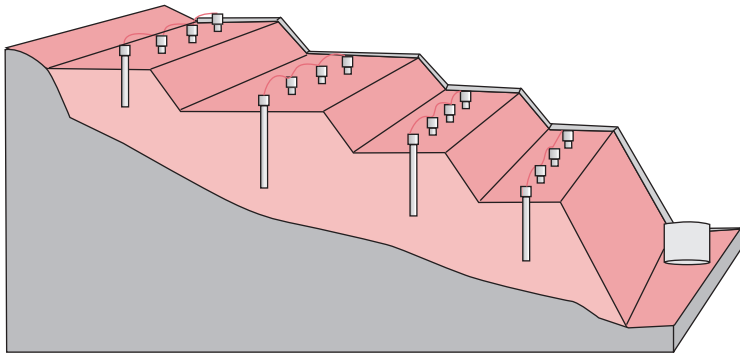


FIGURA 11 *Sistema de pozos y colectores para extracción de biogás en vertedero (Noguer, 2006).*



Por último, el **transporte de gases** hasta la estación de aspiración se realiza mediante colectores de mayor diámetro a los que se conectan los ramales de conducción.

En cualquier caso, no existe ningún método ni normativa que regule el diseño de estas instalaciones, por lo que es fácil encontrar diseños de muy diversa índole.

### 3.4.3 Técnicas para el aprovechamiento del biogás de vertedero

Actualmente, existen distintas técnicas mediante las cuales es posible realizar un aprovechamiento de este gas. Así, cabe destacar **el enriquecimiento de oxígeno con tecnología de membranas**. El desarrollo de este sistema denominado “*Lean Caloric Gas-Utilization* (LCG-U)” se basa en la tecnología de separación de gases mediante membranas. Se utilizan membranas de disolución/difusión sin poros de alta selectividad, compuestas por una capa activa y una capa portadora de material de polímero, en las que la velocidad de difusión o bien la velocidad de transporte de las moléculas a través de las membranas es diferente para cada gas. Esto posibilita una separación entre diferentes gases y así obtener una mayor/menor concentración de los gases individuales de una mezcla en el rechazo/permeado. Así, en el aire que pasa por la membrana (permeado) se elimina el contenido en nitrógeno lo que conlleva una concentración en oxígeno, posibilitando una perfecta combustión del gas en el motor. Debido a la flexibilidad de esta tecnología, el diseño y las plantas necesarias pueden ser ajustadas a la situación individual de cada cliente fácilmente (*Peters, 2003*).

Otra posibilidad es el **enriquecimiento de metano con tecnología de membrana**, donde se utiliza un sistema de membranas similar al anterior. En este caso, el permeado se enriquece en CO<sub>2</sub> y se reinfiltro al vertedero mediante pozos de infiltración mientras que el rechazo de la membrana es un gas enriquecido en metano y oxígeno. Con este procedimiento se puede obtener una reducción importante del periodo de la fase post-clausura a causa de una degradación acelerada de materia orgánica. Los resultados obtenidos con esta tecnología conllevan un ahorro de capital y una mejora de la rentabilidad para el explotador del vertedero (*Peters, 2003*).

### 3.4.4 Impacto ambiental del aprovechamiento del biogás de vertedero

Durante la generación de biogás en los vertederos se detecta la presencia de concentraciones significativas de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y siloxanos, que influyen en los posteriores sistemas de aprovechamiento energético de biogás (*Peters, 2003*; *Beyebach, 2005*).

El ácido sulfhídrico, habitual en el biogás en concentraciones de 200 a 4000 ppm, es un compuesto nocivo, ya que ataca los elementos metálicos de toda la planta, teniendo una mayor influencia en los puntos o zonas de mayor temperatura. Por lo tanto, se han desarrollado una gran variedad de métodos para su eliminación. Los métodos tradicionales son los físico-químicos: separación con membrana, adsorción, absorción, etc. Estos métodos son eficientes, aunque resultan caros y presentan el inconveniente de que se pueden formar contaminantes secundarios, que tienen que ser tratados o eliminados. Últimamente, los métodos biotecnológicos han experimentado un gran desarrollo debido a su gran eficiencia, su reducido coste de inversión, su menor requerimiento de energía y a que no producen contaminantes secundarios.

Los siloxanos y otros compuestos de Si pueden formar deposiciones (cristalizaciones) que son especialmente peligrosas en las cámaras de combustión de los grupos generadores. Una forma de eliminar este tipo de compuestos se puede efectuar con carbón activo, debiendo instalar normalmente con esta unidad un sistema de deshumidificación para reducir el contenido de agua en el biogás. Aplicado en vertederos, este sistema también puede contribuir a la optimización del aprovechamiento energético del biogás.

Cabe indicar que este tipo de contaminantes no sólo se encuentra en el biogás obtenido de los vertederos sino que, por ejemplo, también tiene especial importancia en el caso de los gases obtenidos en las depuradoras.

## 3.5 Análisis de la producción de biogás

En este apartado se analiza la producción de biogás a nivel internacional y nacional.

### 3.5.1 Mercado internacional

La producción estimada de biogás en la UE, durante el año 2006, asciende a 5.346,7 ktep (Tabla 6), lo que supondría un crecimiento del 13,6% con respecto al año 2005 (*EurObservÉR, 2007*). Tal y como puede verse en la Tabla 6, Alemania y Gran Bretaña son con diferencia los países líderes en la producción de biogás, contribuyendo conjuntamente al 67,7% de la producción en el 2006. Actualmente, España ocupa el cuarto puesto en la lista de países de la UE, con una producción anual de 334,3 ktep.

TABLA 6 *Producción bruta de biogás en Europa (ktep) (EurObservÉR, 2007).*

<i>País</i>	<i>2005</i>	<i>2006*</i>
Alemania	1.594,4	1.923,2
Gran Bretaña	1.600,0	1.696,0
Italia	343,5	353,8
España	316,9	334,3
Francia	220,0	227,0
Países Bajos	119,0	119,0
Austria	30,8	118,1
Dinamarca	91,5	94,2
Polonia	50,7	93,8
Bélgica	84,0	83,3
Grecia	36,0	69,4
Finlandia	63,5	63,5
República Checa	55,8	59,9
Irlanda	34,3	34,7
Suecia	29,8	33,3
Hungría	7,1	10,5
Portugal	10,1	9,2
Luxemburgo	7,4	8,9
Eslovenia	6,8	8,4
Eslovaquia	4,8	4,8
Estonia	1,3	1,3
Total	4.707,6	5.346,7

\* Estimación

El sector del biogás forma parte integrante de la industria de tratamiento de residuos orgánicos y cuenta con unas 40 empresas europeas de origen y tamaño distintos. En general se trata de pequeñas y medianas empresas especializadas en la realización de plantas de metanización de residuos orgánicos, aunque existen algunas empresas grandes de tratamiento de aguas residuales y la tendencia reciente parece conducir hacia una mayor concentración.

Sin embargo, a nivel europeo aún se está muy lejos de alcanzar los objetivos marcados en el Libro Blanco de la Comisión Europea para este sector (*Comisión Europea, 1997*). De mantenerse el crecimiento observado durante los últimos tres años, la producción bruta de biogás alcanzará los 8,6 millones de tep en el año 2010, año para el que el Libro Blanco establecía un objetivo de 15 millones (Figura 12).

Para lograr el objetivo establecido por la Comisión, el sector necesita un mayor número de instalaciones de metanización y mejorar la tasa bruta de valorización energética del biogás producido, que, actualmente, es de alrededor del 50%. El potencial de producción de biogás en el 2020 se estima en 18 millones de tep, la mayor parte concentrado en Francia, Alemania y Gran Bretaña.

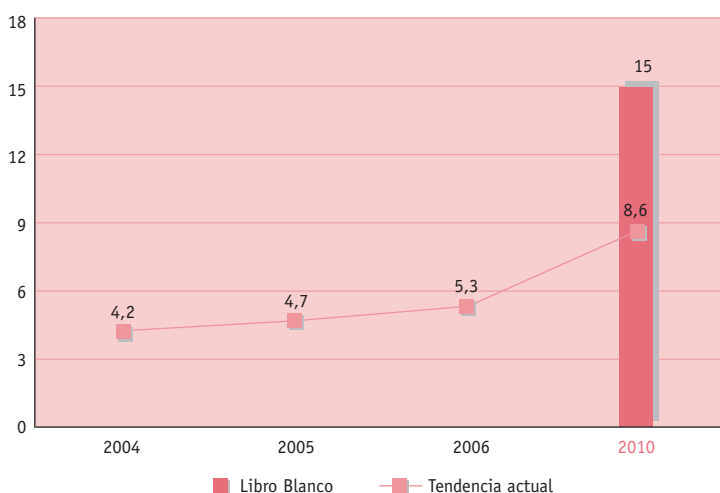


FIGURA 12 *Producción anual bruta de biogás (millones de TEP) en Europa (EurObserv'ER 2007).*

### 3.5.2 Mercado nacional

A finales del 2004, la generación del biogás ascendió a 266,7 ktep (Figura 13). Este resultado ha culminado una etapa en la cual el consumo de biogás ha llevado al sector a triplicar su aportación al balance energético nacional desde 1998, y que le ha

permitido superar, ya a finales del 2003, los objetivos establecidos por el Plan de Fomento para 2010 (Plan de Energías Renovables en España 2005-2010) (IDAE, 2005).

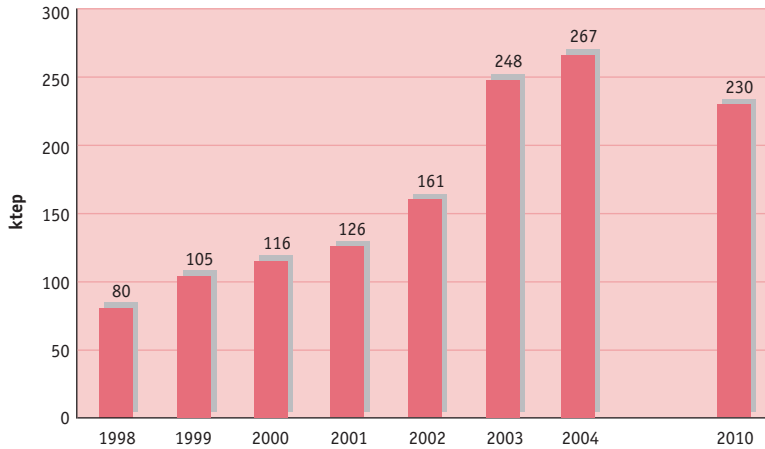


FIGURA 13 *Generación de biogás en España y previsiones (ktep) (IDAE).*

En el 2004, las Comunidades donde se registró un mayor consumo de biogás fueron Madrid (el 33,1% del total nacional), Cataluña (20,7%), Galicia (10,4%) y Asturias (9,4%) (Figura 14) (IDAE, 2005a). Entre las Comunidades de Madrid y Cataluña acumularon 145 de los 275 ktep de consumo total con que contaba España a finales de 2004.

La CM cuenta con varias plantas donde se llevan a cabo procesos de obtención de biogás para su gestión y posterior aprovechamiento energético: la Planta de Pinto, los vertederos de RSU de los municipios de Alcalá de Henares, Mejorada del Campo, Colmenar Viejo, Valdemingómez, etc. La estación de aprovechamiento energético de Colmenar Viejo ha sido la última en inaugurarse en Marzo de 2006. Las instalaciones más significativas en el 2004 han sido la del vertedero de Valdemingómez y la planta de RSU de Pinto. Durante 2008 se están poniendo en funcionamiento dos grandes plantas de metanización de la fracción orgánica de residuos del Ayuntamiento de Madrid, que elevarán fuertemente la cantidad de biogás producido en la CM.

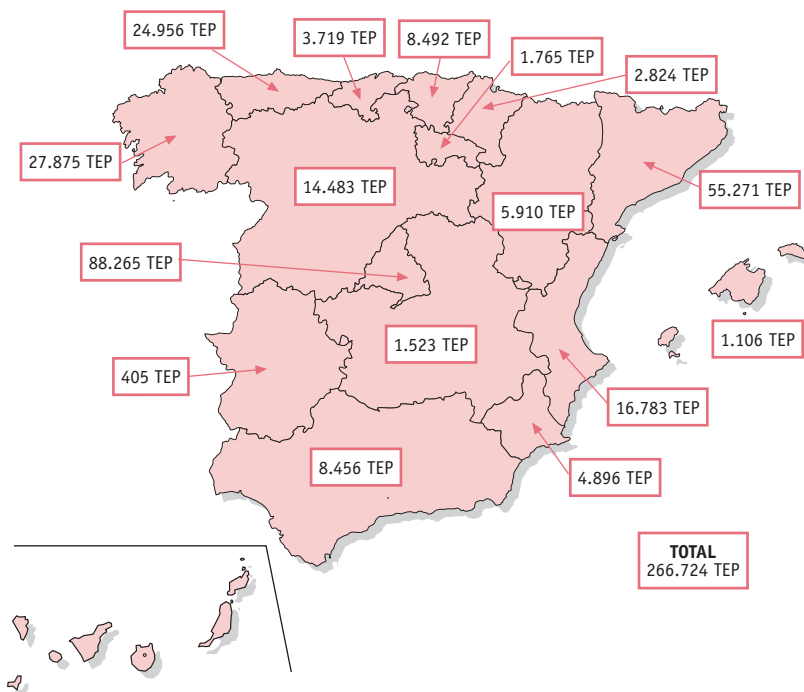


FIGURA 14 Distribución del consumo de biogás a finales de 2004. (Datos provisionales).

Con respecto a los proyectos que se han desarrollado en España en el período 1999-2004 caben destacar los relativos al uso energético del biogás producido, ya que suponen el 80% de la energía primaria. Les siguen en importancia los de tratamientos de lodos de depuradoras y los relativos al tratamiento de residuos ganaderos y, en menor medida, los relacionados con el aprovechamiento de residuos industriales biodegradables. En la innovación tecnológica cabe destacar el perfeccionamiento de la digestión anaeróbica de volúmenes pequeños de residuos, la posibilidad de emplear conjuntamente lodos de aguas residuales y la FORSU, así como el enriquecimiento del biogás a través de la digestión conjunta con materiales no residuales. El objetivo de estos procesos es siempre el aumento del rendimiento de la tecnología de digestión anaeróbica para la producción de biogás y la mejora de su calidad (sobre todo el aumento del poder calorífico).

En el ámbito de las tecnologías de obtención de biogás, existen varias organizaciones, sobre todo empresas y centros tecnológicos. En la Figura 15, se puede observar agentes tecnológicos cuyas actividades relevantes de I+D están relacionadas con la producción y utilización de biogás. Este área está muy relacionada con la tecnología de la biomasa, por lo que es frecuente que las organizaciones que realizan I+D incluyan ambas áreas. Generalmente, las empresas que se dedican a este tipo de actividades presentan un perfil de ingenierías, tanto de energía como de medio ambiente.

El nuevo Plan de Energías Renovables en España 2005-2010 tiene como objetivo producir un incremento de 188 ktep en la producción de biogás con el siguiente reparto para los diferentes tipos de substratos orgánicos: RSU (110 ktep), residuos orgánicos industriales (40 ktep), lodos de depuradora (30 ktep) y residuos ganaderos (7 ktep). Aunque en el caso del aprovechamiento de residuos ganaderos hay que tener en cuenta la existencia de alternativas rentables para el secado de purines con gas natural, lo que aleja a los posibles inversores del uso de tecnologías de digestión anaeróbica para el tratamiento de estos residuos (*Renovalia, 2005*).

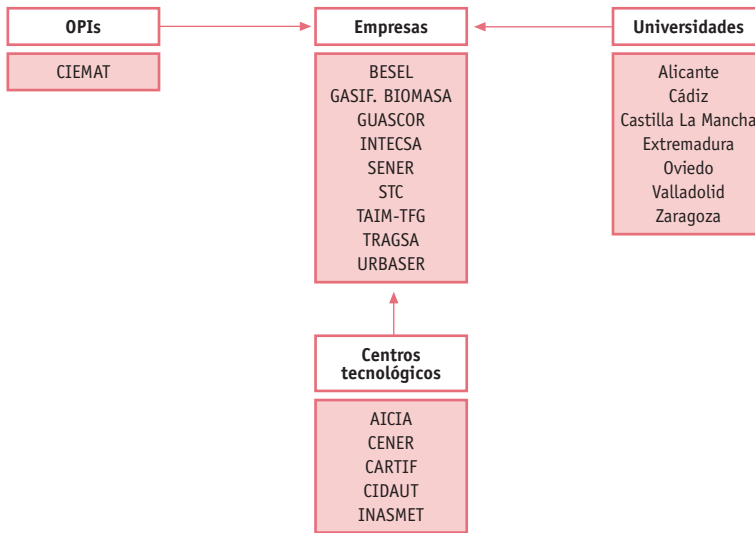


FIGURA 15 *Mapa de la oferta tecnológica sobre Biogás.*

Fuente: SOCINTEC.

Las medidas de promoción que para este sector se han propuesto en el nuevo Plan, se refieren tanto a la difusión de las tecnologías existentes entre los estamentos afectados (Ayuntamientos, Diputaciones y otros) como a la promoción de tecnologías de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos agro-ganaderos. Así, sería una prioridad conseguir que, a corto plazo, la digestión anaeróbica sea una alternativa al secado de los purines con gas natural, que constituye una opción poco eficiente.

Desde el punto de vista de la innovación tecnológica, una de las medidas incluidas en este Plan es el fomento del desarrollo tecnológico para la mejora de los rendimientos de las instalaciones y el desarrollo de procesos de codigestión, en los que se sometan a procesos de digestión anaeróbica, residuos de diversas procedencias. Además, deben optimizarse y mejorarse los procesos de depuración y limpieza del biogás.

## 3.6 Análisis de las investigaciones sobre producción de biogás

Este apartado recoge las actividades existentes en el campo de I+D sobre biogás a través del análisis de las publicaciones en revistas internacionales, patentes y proyectos.

### 3.6.1 Publicaciones

Como ya se ha señalado con anterioridad, para realizar la búsqueda de los artículos científicos que se han publicado en revistas internacionales en el periodo comprendido entre enero de 2000 y Junio de 2007 se ha utilizado la base de datos ISI WEB OF KNOWLEDGE.

En un primer análisis de los resultados obtenidos a nivel mundial se han encontrado 1923 publicaciones relacionadas con el biogás en función de los términos o palabras clave utilizados. Entre esas publicaciones se encuentran artículos relacionados con la producción propiamente dicha del biogás, el tratamiento de los gases de vertedero, la posterior utilización del biogás, así como aquellos que claramente hacen referencia al proceso de digestión anaeróbica de diferentes tipos de residuos (residuos agrícolas, lodos o fangos de depuración, residuos urbanos e industriales, residuos ganaderos, etc.).

En la Figura 16 se puede apreciar que Estados Unidos es el país con el mayor número de publicaciones (13,7%). En segundo lugar se encuentra España aunque con la mitad de publicaciones (6,9%), seguido de India (6,4%), Alemania (6,0%) y Francia (5,8%). Sin embargo, si no se consideran los artículos en los que se trata el proceso de digestión anaeróbica de residuos sin mencionar el biogás, la posición de España varía un poco, pasando a ocupar un octavo lugar a nivel mundial, y quinto lugar en Europa, mientras que Estados Unidos sigue estando a la cabeza con un 12% de artículos e India pasaría a un segundo lugar (9,6%). Esto indica que en España la investigación parece ir más encaminada hacia el estudio del tratamiento propiamente de los residuos que a la producción de biogás.



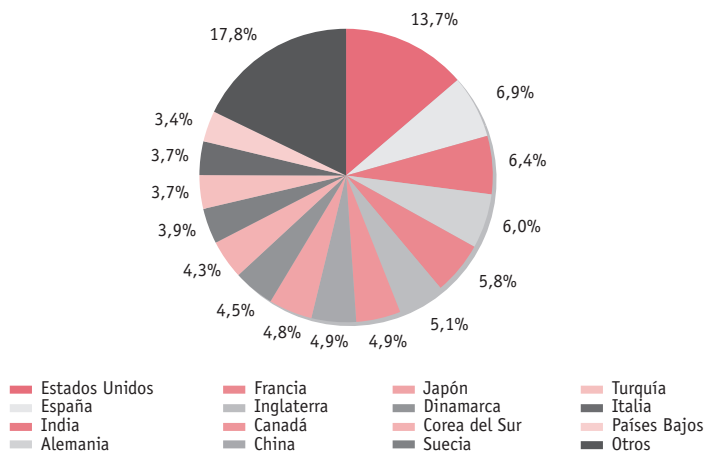


FIGURA 16 *Distribución de artículos científicos sobre biogás.*

En España, la evolución del número de publicaciones hasta el año 2004 sigue una tendencia algo diferente a la evolución a nivel mundial (Figura 17), mientras que a partir de dicho año la evolución es similar. Desde el 2001 y hasta el 2004, se produce un ligero aumento en el número de artículos publicados a nivel mundial y un ligero descenso en nuestro país. Sin embargo, se produce un aumento en el número de publicaciones tanto a nivel mundial como en España a partir del año 2004, siendo especialmente significativa la producción científica del año 2006 en ambos casos. Con respecto al año 2007 parece que va a seguir la misma tendencia, ya que se publicaron 14 publicaciones en España y 165 a nivel mundial durante los primeros 6 meses del presente año.

En el Anexo II se detalla la relación de las publicaciones españolas en el periodo 2000-Mayo 2007. En España existen al menos 38 instituciones con alguna publicación relacionada con el campo estudiado. Según se observa en la figura 18, el Instituto de la Grasa figura como líder con 34 publicaciones, seguido de la Universidad de Córdoba (24 publicaciones). La mayoría de los artículos considerados en ambas instituciones son comunes, ya que entre ellas existe una importante colaboración. A continuación, se encuentran la Universidad de Cádiz (19 publicaciones), la Universidad de Santiago de Compostela (14 publicaciones), la Universidad de Barcelona (13 publicaciones) y las Universidades de Extremadura y Oviedo (10 publicaciones cada una).

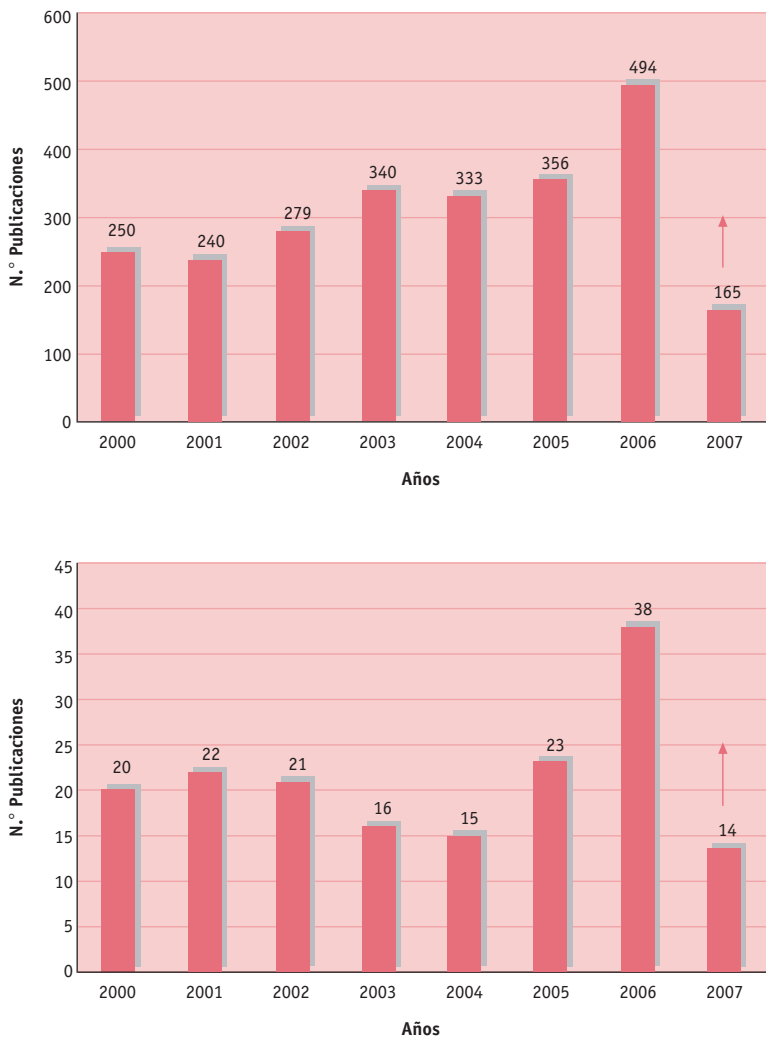


FIGURA 17 Número de artículos publicados entre Enero de 2000 y Mayo de 2007 sobre biogás. (a) A nivel mundial, (b) en España.

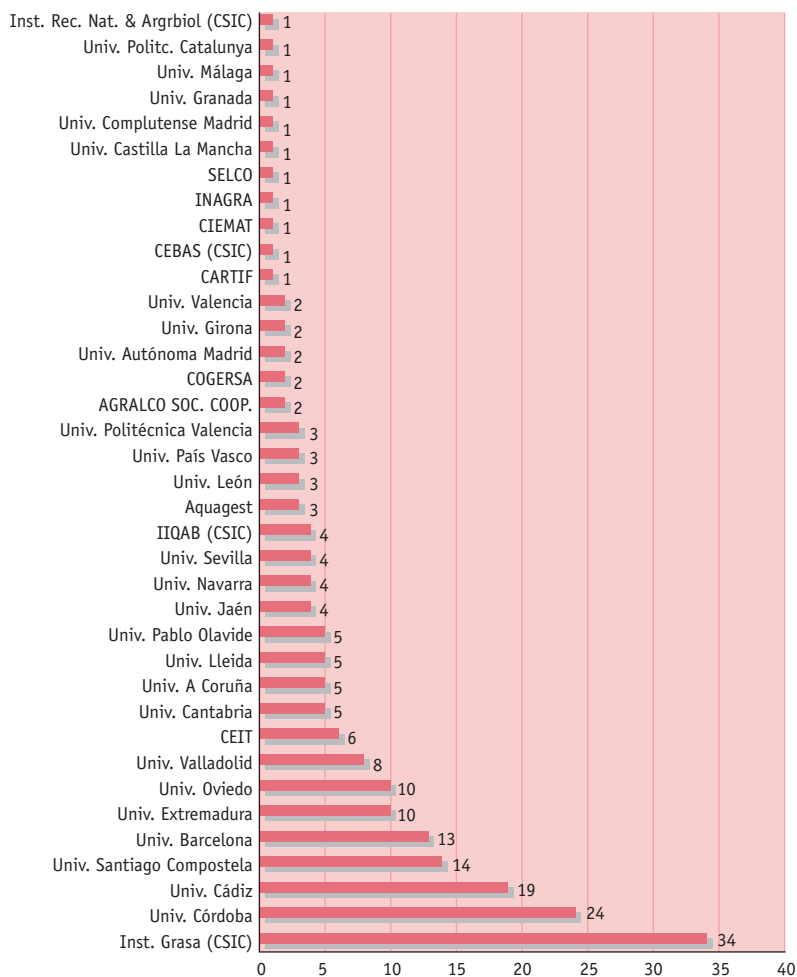


FIGURA 18 *Instituciones españolas con publicaciones sobre biogás en el periodo 2000-2007.*

En las instituciones españolas cabe destacar el reducido número de artículos escritos con participación conjunta, lo que indica el bajo índice de colaboración entre las mismas (Figura 19). Aunque, como ya se ha comentado, existe una importante colaboración entre el Instituto de la Grasa (CSIC) y la Universidad de Córdoba.

Sin embargo, las colaboraciones con centros extranjeros son algo más significativas. Como se observa en la Figura 19, algunas universidades de Italia (Universidades de Verona, Ancona, Vence y Aquila) presentan algún tipo de colaboración con la Universidad de Barcelona. También existen colaboraciones entre diferentes Centros de Cuba (Centro Nacional de Investigación Científica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Consultores Ambientales (CONAM), Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIIMM), etc.) y el Instituto de la Grasa de Sevilla, la

Universidad de Santiago de Compostela y la Universidad de Valladolid. El INRA (Institut Scientifique de Recherche Agronomique, Francia) y diferentes Universidades mexicanas son también instituciones extranjeras que han colaborado con instituciones españolas (Universidad de Sevilla, Agralco Sociedad Cooperativa, Universidad de Cantabria). Por último, la Universidad de Extremadura colabora con la Universidad Tras Os Montes y Alto Douro (Portugal).

El análisis temático de las publicaciones permite conocer las líneas de investigación en que están implicados cada uno de estos centros. Cabe destacar, como ya se comentó anteriormente, que son mayoritarios los artículos que están relacionados con el proceso de digestión anaeróbica de diferentes tipos de residuos.

En el campo del empleo de las tecnologías de digestión anaeróbica para el tratamiento de los residuos generados en industrias como las agroalimentarias, se han desarrollado investigaciones en industrias como la cervecera, azucarera, láctea, oleícola, etc. Este campo es bastante común y sobre él se han desarrollado investigaciones en la Unidad de Procesos Industriales y Medioambiente del Instituto de la Grasa (IG, CSIC), el grupo de Ingeniería Química de la Universidad de Córdoba, el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS, CSIC), el Centro de Ciencias Medioambientales (COMA, CSIC), la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, la Universidad de Jaén, la Universidad de Cádiz, la Universidad de Castilla La Mancha y la Universidad de Extremadura.

En la investigación de los procesos de codigestión, los cuales permiten mejorar la producción de biogás, tienen actividad las Universidades de Lleida, Girona y Autónoma de Barcelona. Esta última participa en el proyecto europeo "Promotion of Biogas for Electricity and Heat Production in EU Country. Economic and Environmental Benefits of Biogas from Centralised Co-digestion".

Se observan varios artículos de la Universidad del País Vasco y del Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona (IIQAB) basados en un estudio sobre la influencia de los diferentes parámetros de los que depende el proceso anaeróbico (pH, tiempos de retención, contaminantes orgánicos) en la producción de biogás.

La Universidad de Sevilla desarrolla su investigación en el estudio de nuevos reactores para el proceso de digestión de las aguas residuales. En este caso cabe resaltar que su objetivo es que toda la tecnología desarrollada a escala de laboratorio se plasme a escala industrial. En este sentido, uno de sus exponentes ha sido el diseño, construcción y puesta a punto del digestor Anaerobio Andaluz (DA1), también se diseñó, a escala industrial, el DAO, de bajo coste y el DA2. En la Universidad de La Coruña el grupo de Ingeniería Ambiental también trabaja en el campo del tratamiento de aguas residuales y en el desarrollo y optimización de biorreactores para el tratamiento de efluentes gaseosos. Parte de los estudios realizados fueron aplicados al tratamiento de efluentes en la industria.

El grupo de Biotecnología Ambiental de la Universidad de Barcelona dirige sus líneas de investigación hacia las aguas residuales: eliminación biológica de nutrientes en un Reactor Discontinuo Secuencial (*Sequencing Batch Reactor*, SBR); digestión anaeróbica de lodos de depuradora y de la FORSU; tratamiento de purines por digestión anaeróbica y postratamiento en SBR.

Aunque en España los proyectos relativos al uso energético del biogás producido en la desgasificación de vertederos son los más destacados (24, entre 1999-2004) (IDAE, 2005a), no ocurre así en las publicaciones relacionadas con este tema. En la Tabla de Publicaciones se puede ver que sólo en la Universidad de Oviedo se han producido publicaciones relacionadas con este tema. En esta Universidad destaca el grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) que realiza investigación en el campo de los RSU en la producción y aprovechamiento del biogás procedente de vertederos, así como en la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica de RSU en biorreactores.

En el campo de la purificación del biogás, desempeña tareas de investigación la Universidad Complutense, con el estudio de materiales que pueden ser utilizados como adsorbentes en los tratamientos posteriores del biogás. En la Universidad de Cádiz parte de sus líneas de trabajo están enfocadas hacia el diseño de sistemas para la purificación del biogás producido en digestores anaeróbicos de plantas de tratamiento de aguas residuales, tanto a nivel de laboratorio como semiindustrial (Grupo de Investigación en Reactores Biológicos y Enzimáticos) y también a las tecnologías para la reducción o eliminación de la contaminación de residuos líquidos y sólidos (Grupo de Tecnología del Medio Ambiente).

Los lodos de depuración procedentes de los tratamientos primario y secundario que se producen en las estaciones depuradoras de aguas residuales pueden someterse a tecnologías de digestión anaeróbica para producir biogás. En este caso destaca la Universidad de Cádiz, con el desarrollo de sistemas que permitan mitigar los efectos que provoca la evacuación directa al medio de vertidos con alta carga orgánica.

Las Universidades de Santiago de Compostela, Cantabria, Navarra, Valencia y Politécnica de Valencia, así como diferentes empresas (SELCO, AGRALCO, CEIT) realizan parte de su investigación en la aplicación de técnicas de ingeniería de sistemas, comunicaciones y control de los procesos de digestión anaeróbica de residuos, producción de biogás, etc. Desarrollan modelos matemáticos y simulación de sistemas complejos, equipos de monitorización avanzada, aplicaciones telemáticas para la supervisión y control de procesos remotos y aplicaciones informáticas para la simulación y optimización de sistemas.

En la Universidad de Valladolid destaca el grupo de Tecnología Ambiental del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Este grupo estudia los sistemas de tratamiento de la contaminación y la aplicación de herramientas de control y gestión ambiental en los sectores industriales. Sus líneas de investigación van dirigidas hacia la depuración anaeróbica de aguas residuales mediante la eliminación

simultánea de nitrógeno y sulfato (SURAMOX), aplicación de procesos anaeróbicos para la gestión de residuos, minimización de fangos, hidrólisis en digestión anaeróbica termofílica y seguimiento y control de instalaciones de tratamiento de la contaminación.

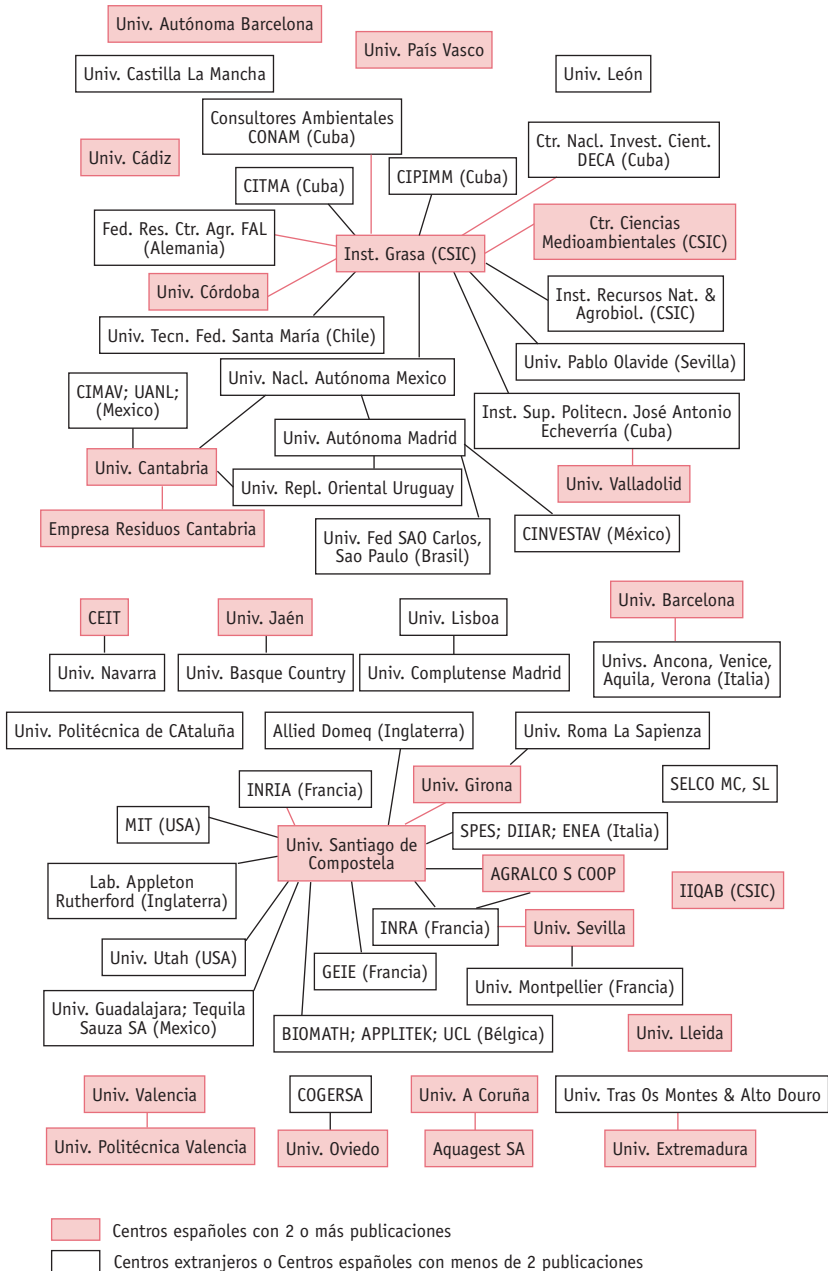


FIGURA 19 Colaboraciones entre centros españoles y extranjeros en proyectos sobre biogás y digestión anaeróbica de residuos.

Finalmente, con respecto a los usos posteriores del biogás, aunque el número de artículos es muy bajo, destacan la Universidad de Jaén, el CIEMAT y la Universidad de La Laguna.

### 3.6.2 Patentes

La búsqueda de patentes sobre producción de biogás se ha realizado en la base de datos [esp@cenet](mailto:esp@cenet), considerando las invenciones patentadas desde el año 2000 hasta junio de 2007. Las patentes encontradas se diferencian en dos grupos: las que se basan en el proceso de producción y aquellas destinadas a la purificación del biogás. En el Anexo III se adjunta la relación de las mismas.

#### 3.6.2.1 Patentes sobre producción de biogás

El análisis de los resultados obtenidos muestra que los países con mayor interés en el tema son Japón (36), Alemania (34) y Estados Unidos (30) (Figura 20). La UE se encuentra a la cabeza de esta línea de investigación, pues el número de patentes europeas supone casi el 40% del total. Por su parte, España cuenta con 5 patentes, lo que la sitúa muy próxima a la media de los países europeos con patentes (5,8), superando la media de patentado, si se consideran todos los países miembros (2,8).

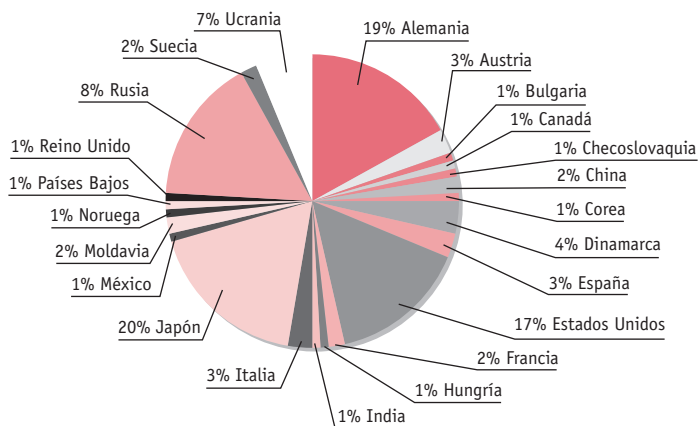


FIGURA 20 *Distribución de patentes sobre producción de biogás por países.*

En España todas las patentes sobre producción de biogás han sido solicitadas por empresas del sector, el nombre de estas empresas puede consultarse en el Anexo III.

La evolución de la investigación sobre producción de biogás en función del número de invenciones patentadas durante los últimos 7 años a nivel mundial se muestra en la

Figura 21. Se puede observar un aumento rápido y progresivo en el número de patentes hasta el año 2004 y, a partir de ese año, el número de patentes va descendiendo lentamente, continuando previsiblemente durante el 2007 (aunque la gráfica sólo muestra los 5 primeros meses de este año). Esta disminución en el número de patentes podría deberse a que el interés de las investigaciones se centra ahora en encontrar nuevas técnicas para la purificación del biogás. Esto significaría que las patentes más recientes deberían ir en esta línea. Sin embargo, el análisis realizado a continuación sobre las patentes destinadas a la depuración de biogás indica que esta no es la tendencia.

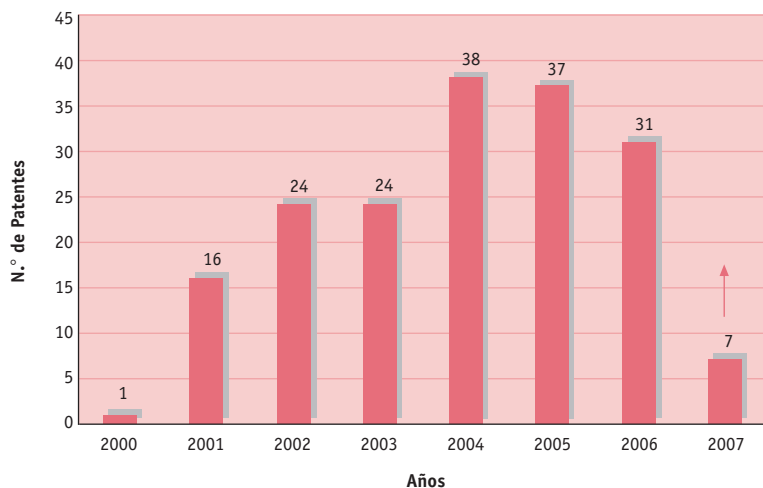


FIGURA 21 *Distribución de patentes, sobre producción de biogás, a nivel mundial por año entre 2000 y mayo de 2007.*

### 3.6.2.2 Patentes sobre purificación de biogás

Respecto a las patentes destinadas a la purificación del biogás, se ha encontrado que son mucho menos numerosas que las anteriores, lo que indica que el interés por este proceso ha sido menor. El análisis de los resultados (Figura 22) señala a Japón (17) como país líder indiscutible, seguido por Alemania (7), mientras que en el resto de países participan simbólicamente con 1 patente (2 en el caso de Francia). Sin embargo, si consideramos los resultados obtenidos en el conjunto de la UE (13), el número de patentes europeas supera el 38%.

En España encontramos una sola patente sobre purificación de biogás, solicitada por la Universidad de Cádiz, lo que la coloca a la cabeza en el desarrollo de invenciones sobre éste tema.



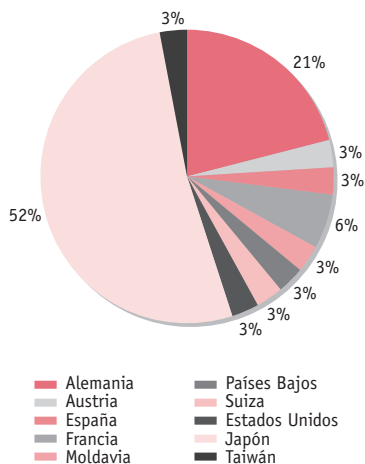


FIGURA 22 *Distribución de patentes sobre purificación de biogás por países.*

Respecto a la tendencia de patentado sobre la purificación del biogás en los últimos 7 años, al igual que en el caso anterior, se observa un aumento progresivo hasta el año 2004, que en este caso se mantiene durante el 2005, para descender en el año siguiente (Figura 23). Para el año 2007 se han tomado los datos correspondientes a los 4-5 primeros meses, por lo que se espera que el número total de patentes todavía aumente hasta alcanzar valores de años anteriores.

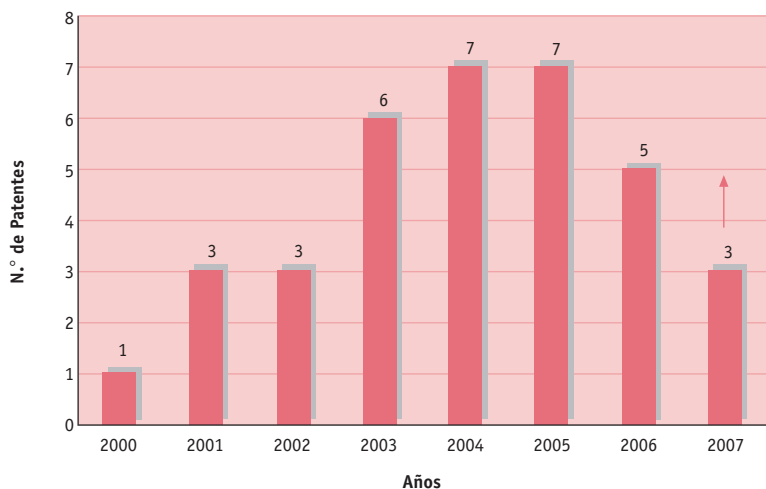


FIGURA 23 *Distribución de patentes sobre purificación de biogás por año.*

Tal como se ha comentado, en la Figura 24 se muestra que, hasta el momento, la mayoría de las invenciones se han centrado en el proceso de producción del biogás (176) y sólo una pequeña parte tienen como objetivo su purificación (34).

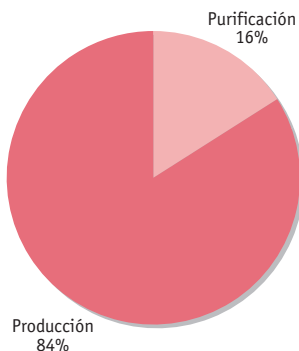


FIGURA 24 Comparación del nº de patentes según su temática.

Esto mismo también se observa en la Figura 25, donde se comparara a los países que presentan mayor número de patentes, en función de su temática. Como era de prever Japón se presenta como país líder, seguido por Alemania. Por su parte, España ocuparía el octavo lugar.

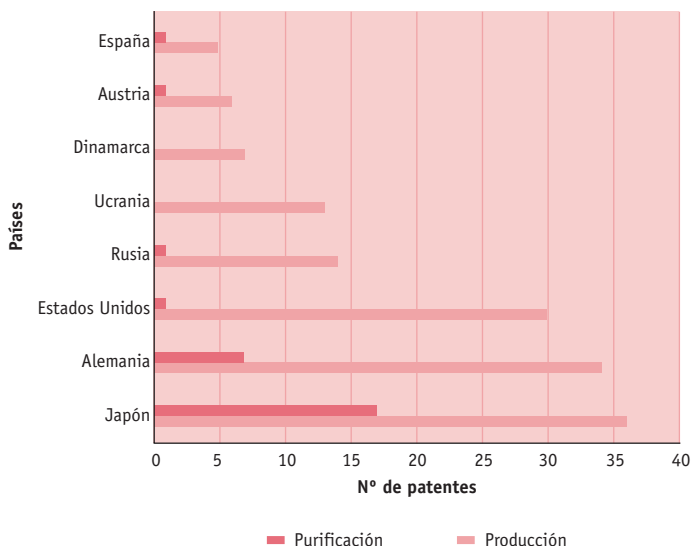


FIGURA 25 Comparación del nº de patentes por países según su temática.

Por otra parte, merece una mención especial el bajo número de patentes estadounidenses encontradas. A pesar de tratarse de una superpotencia mundial, al hacer una comparación del número de patentes por áreas geográficas sólo le corresponde el 18% de las patentes sobre producción y el 3% sobre purificación de biogás.

### 3.6.3 Proyectos europeos

Otro indicador del nivel en la investigación sobre aspectos del biogás lo constituyen los proyectos europeos. Considerando tanto los proyectos que han estado vigentes durante los últimos 7 años, como los que lo están en la actualidad y seguirán estando durante los próximos años, se han encontrado 43 proyectos con una duración y dotación presupuestaria diferente. En 17 de estos proyectos participan empresas, universidades y OPIs españolas.

Un análisis de los datos nos permite conocer el momento en el que los proyectos europeos encontrados fueron concedidos. Como se observa en la Figura 26, en el año 2001 existe un máximo, puesto que se concedieron 13 proyectos que han continuado vigentes casi hasta la actualidad.

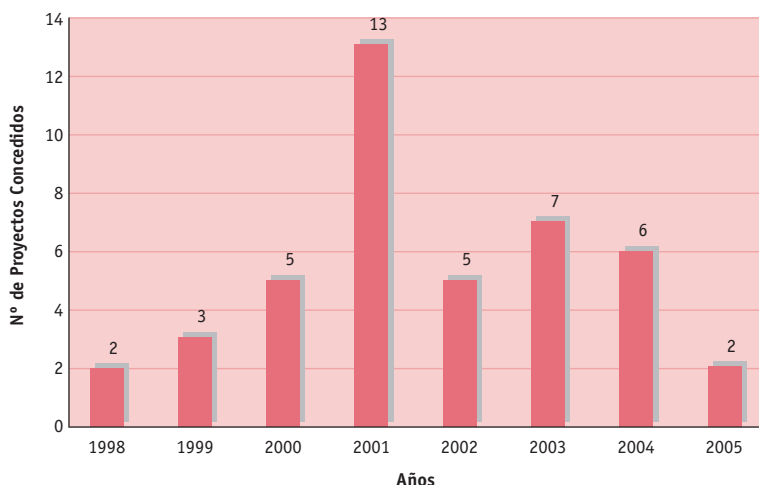


FIGURA 26 Evolución de la concesión de proyectos.

Aunque, todos los proyectos están recogidos en el Anexo IV, a continuación se detallan los participantes españoles, así como los proyectos europeos en los que participan.

Acrónimo	Título	Participantes Españoles	Objeto del Proyecto
BRST985473	Recycling in the industrial process of leather industry by-products	Asociación de investigación de la industria del curtido y anexas (Barcelona); Industrias Bertran S.L. (Barcelona); Curtilop S.A. (Murcia).	Se pretende desarrollar nuevas tecnologías que permitan la recuperación de residuos procedentes de las industrias del cuero, como las grasas de alta pureza y las proteínas, para su reutilización en otros ciclos productivos.

<i>Acrónimo</i>	<i>Título</i>	<i>Participantes Españoles</i>	<i>Objeto del Proyecto</i>
<b>WAWAROMED</b>	Wastewater recycling of olive mills in mediterranean countries-demonstration and sustainable reuse of residuals.	Instituto Tecnológico de Canarias	Se pretende optimizar las condiciones del tratamiento biológico anaeróbico al que son sometidas las aguas residuales de la industria del aceite de oliva con el fin de obtener biogás.
<b>BCNR2004</b>	Barcelona Renewable 2004.	Barcelona Regional S.A.; Aiguasol Bioco S.L.; CIEMAT, Instituto Catalán de la Energía; BP Solar España; Teulades Facanes Multifuncionals S.A.	Se persigue la realización de estudios técnicos con el objetivo de integrar diferentes tecnologías de energía renovable en el desarrollo urbano. Estos estudios están orientados hacia la zona de Sant Adrià del Besòs.
<b>4.1030/C/00-018/ ALTENER 2</b>	Organic waste	Consell Comarcal de Bages (Manresa), Ecotec Research and Consulting LTD (Sucursal en España); Instituto Catalán de la Energía; Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía; Consejería del Medioambiente de Sevilla.	Los resultados de este proyecto permiten afirmar que la codigestion del residuo del aceite de oliva es una solución recomendable, puesto que permite la producción de electricidad, reduciendo los gastos de explotación y con ventajas ambientales, como la reducción significativa de emisiones de CO <sub>2</sub> , mejorando la economía local y regional.
<b>TELEMAC</b>	TELEMonitoring and Advanced teleControl of high yield wastewater treatment plants	Agralco D. COOP. (Navarra); Universidad de Santiago de Compostela.	El objetivo principal es la utilización de herramientas del área de las ciencias de la información y la comunicación para el desarrollo de una herramienta de control remoto de las plantas de descontaminación, especialmente de plantas de digestión anaerobia.

<i>Acronimo</i>	<i>Título</i>	<i>Participantes Españoles</i>	<i>Objeto del Proyecto</i>
<b>HPMD-CT-2001-00106</b>	New anaerobic bioprocess involving simultaneous sulfate reduction and ammonia oxidation.	Universidad de Valladolid.	Se estudia un nuevo proceso de conversión biológica, responsable de la oxidación simultánea de amonio y la reducción de sulfatos, en condiciones anaerobicas, durante el tratamiento de aguas residuales ricas en materia orgánica, nitrógeno y sulfatos. Se pretende describir y caracterizar la microbiología responsable del proceso, y clasificar los productos intermedios que se producen.
<b>3A-BIOGAS</b>	Three step fermentation of solid state biowaste for biogas production and sanitation.	Biomasa del Guadalquivir SA; Beta nutror SA; Ingeniería, Estudios y Construcción S.A.; Universidad de León.	3A-BIOGAS es una combinación de procesos aeróbicos y anaeróbicos en tres pasos: 1. aeróbico, 2. anaeróbico, 3. aeróbico. En el proceso se genera biogás a partir de biomasa en estado sólido, aprovechando la capacidad energética de los residuos orgánicos. La mejora de salubridad tiene lugar en el primer paso, mientras que la eliminación de olores y lodos producidos ocurre en el tercero. El compost generado se trata hasta cumplir los requisitos de maduración e higiene establecidos.
<b>ENERDEC</b>	Maximum energy yield from organic wastes and descontamination to a high quality organic fertilizer by a microbiological hybrid process	Matadero Frigorífico del Nalón S.L.; Indutherm SL.	Se basa en un proceso híbrido de tratamiento de los residuos orgánicos, en el que el residuo se separa en una fracción líquida, utilizada en el proceso de digestión anaerobia, y una fracción sólida, destinada a compostaje. Se pretende establecer un proceso beneficioso ambientalmente con el objetivo de optimizar la utilización de toda la masa generada, maximizando la cantidad de energía y fertilizante producidos.

<i>Acrónimo</i>	<i>Título</i>	<i>Participantes Españoles</i>	<i>Objeto del Proyecto</i>
<b>POLAR</b>	Low Cost Absorption Refrigeration Cycle for Efficient Energy Utilisation by Small Biogas Cchp Facilities.	Indutherm S.L. Ingeniería e Instalaciones (Barcelona); Matadero Frigorífico del Nalón S.L.	Información no disponible.
<b>CROPGEN</b>	Renewable energy from crops and agrowastes.	Instituto de la Grasa del CSIC	Se pretende identificar los mejores cultivos y residuos agrícolas para la producción de energía, en cultivos ambientalmente integrados, teniendo en cuenta las pérdidas energéticas en la producción y el procesado. Se estudiará la codigestión para intentar mejorar la producción energética a partir de materiales que son poco rentables para la producción de biogás.
<b>Bio-Hydrogen</b>	Development of a Biogas Reformer for Production of Hydrogen for PEM	Besel S.A.; Matadero Frigorífico del Nalón S.L.	Tiene la misión de desarrollar un sistema rentable de transformación Fuel Cells de biogás, para descentralizar la producción de biogás a partir de residuos agrícolas, municipales, de plantas de tratamiento y vertederos. Además se hará un estudio del estado del arte de las tecnologías de desulfuración del biogás y de un biofiltro para la eliminación de siloxanos.

Por otra parte, una iniciativa reciente, de gran interés es el programa CENIT, donde se fomenta la participación de grandes grupos de investigación formados por empresas y organismos de investigación, con el objetivo de aproximar la empresa y la investigación.

Dentro del programa CENIT, se encuentra el proyecto OTERSU, cuyo objetivo es aumentar la cantidad de subproductos valorizables a partir de los residuos depositados en centros de tratamiento. Se investigan procesos que incluyen todas las alternativas en busca de un producto innovador que se adapte a todo tipo de situaciones y necesidades. La obtención de biogás a partir de residuos es una línea de investigación destacada que en el segundo año del proyecto ha dado como resultado el diseño y construcción de una planta de limpieza de biogás, que será utilizada como base para la experimentación, y la realización de los primeros ensayos de limpieza con el biogás procedente de un proceso de digestión anaerobia de residuos de matadero.

## 3.7 Legislación aplicable al aprovechamiento de biogás

Tanto la valorización de los residuos como la producción de biogás están reguladas por una extensa normativa aplicable a residuos, a lodos de depuradora, a la protección de la atmósfera y a las plantas de biogás. Esta normativa se detalla a continuación.

### 3.7.1 Normativa aplicable a residuos

- Reglamento (CE) nº 1576/2007 de la Comisión, de 21 de diciembre de 2007, que modifica el Reglamento (CE) nº 92/2005 por el que se aplica el Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que se refiere a los métodos de eliminación o a la utilización de subproductos animales. (DOUEL nº 340 de 22 de diciembre).
- Reglamento (CE) nº 1678/2006 de la Comisión, de 14 de noviembre de 2006, por el que se modifica el Reglamento (CE) nº 92/2005 en lo que se refiere a métodos alternativos de eliminación y utilización de subproductos animales (DOUEL nº 314 de 15 noviembre).
- Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, relativa a los residuos. (DOUEL nº 114 de 27 de abril).
- Reglamento (CE) nº 2067/2005 de la Comisión, de 16 de diciembre de 2005, por el que se modifica el Reglamento (CE) nº 92/2005 en lo que se refiere a métodos alternativos de eliminación y utilización de subproductos animales (DOUEL nº 331 de 17 diciembre).
- Reglamento (CE) nº 92/2005 de la Comisión, de 19 de enero de 2005, por el que se aplica el Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que se refiere a los métodos de eliminación o a la utilización de subproductos animales y se modifica su anexo VI en lo concerniente a la transformación en biogás y la transformación de las grasas extraídas (DOUEL nº 19 de 21 enero).
- Real Decreto 1429/2003, de 21 de noviembre, por el que se regulan las condiciones de aplicación de la normativa comunitaria en materia de subproductos de origen animal no destinados al consumo humano. (BOE nº 280 de 22 de noviembre).
- Reglamento (CE) nº 810/2003 de la Comisión, de 12 de mayo de 2003, sobre medidas transitorias, con arreglo al Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativas a las normas de transformación de material de la categoría 3 y estiércol en las plantas de biogás (DOUE nº 117 de 13/5/2003).
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero (BOE nº 25 de 29 enero 2002).

- Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos (DOUEL nº 182 de 16 de julio).
- Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. (BOE nº 96 de 22 de abril).
- Real Decreto 2818/1998, de 23 de diciembre, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración (BOE nº 312 de 30 de diciembre).

### 3.7.2 Normativa aplicable a lodos de depuradoras

- 2003/334/CE Decisión de la Comisión, de 13 de mayo de 2003, sobre medidas transitorias, con arreglo al Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativas al material recogido al depurar las aguas residuales (DOUEL nº 118 de 14 de mayo).
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. (BOE nº 157 de 2 de julio).
- Orden MAM/304/2002, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. (BOE nº 43 de 19 de febrero).
- Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales 2001-2006. (BOE nº 166 de 12 de julio).

### 3.7.3 Normativa para la protección de la atmósfera

- Resolución de 14 de enero de 2008, de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo de 7 de diciembre de 2007, del Consejo de Ministros, por el que se aprueba el II Programa Nacional de Reducción de Emisiones, conforme a la Directiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2001, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos. (BOE nº 25 de 29 de enero).
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. (BOE nº 275 de 16 de noviembre).
- Decisión 2007/589/CE de la Comisión, de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. (DOUEL nº 229 de 31 de agosto).
- Orden 1433/2007, de 7 de junio, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se aprueba la Estrategia de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Comunidad de Madrid 2006-2012. Plan Azul. (BOCM nº 154 de 30 de junio).



- Decisión 2004/156/CE de la Comisión, de 29 de enero de 2004, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [notificada con el número C(2004) 130] (DOUEL nº 59 de 26 de febrero).
- Decreto 833/1975, de 6 de febrero, que desarrolla la Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico. (BOE nº 96 de 22 de abril).
- Ley 38/1972, de protección del Ambiente Atmosférico. (BOE nº 309 de 26 de diciembre).
- Directiva 96/61/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996 relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (DOUEL nº 257 de 10 de octubre).

### 3.7.4 Normativa aplicable a las plantas de biogás

- Reglamento (CE) nº 185/2007 de la Comisión, de 20 de febrero de 2007, por el que se modifican los Reglamentos (CE) nº 809/2003 y (CE) nº 810/2003 en lo relativo a la validez de las medidas transitorias para las plantas de compostaje y biogás contempladas en el Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUEL nº 63 de 1 de marzo).
- Reglamento (CE) nº 208/2006 de la Comisión, de 7 de febrero de 2006, por el que se modifican los anexos VI y VIII del Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, en lo que se refiere a las normas de transformación para las plantas de biogás y compostaje y las condiciones aplicables al estiércol (DOUEL nº 36 de 8 de febrero).
- Reglamento (CE) nº 209/2006 de la Comisión, de 7 de febrero de 2006, por el que se modifican los Reglamentos (CE) nº 809/2003 y (CE) nº 810/2003 en lo relativo a la validez de las medidas transitorias para las plantas de compostaje y biogás contempladas en el Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUEL nº 36 de 8 de febrero).
- Reglamento (CE) nº 12/2005 de la Comisión, de 6 de enero de 2005, por el que se modifican los Reglamentos (CE) nº 809/2003 y (CE) nº 810/2003 en lo relativo a la validez de las medidas transitorias para las instalaciones de compostaje y biogás contempladas en el Reglamento (CE) nº 1774/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo. (DOUEL nº 5 de 7 de enero).

AENOR, entidad dedicada al desarrollo de la normalización y la certificación en todos los sectores industriales y de servicios, con el propósito de contribuir a mejorar la calidad y la competitividad de las empresas y proteger el medio ambiente, ha elaborado la normativa UNE-EN ISO 11734:1999 Calidad del agua. Evaluación de la biodegradabilidad anaerobica «final» de los compuestos orgánicos con lodos en digestión. Método por medida de la producción de biogás. (ISO 11734:1995).



## CAPÍTULO 4

# Aplicaciones del biogás como fuente de energía

- 4.1 Obtención de calor por combustión directa (PÁG. 78)
- 4.2 Generación de electricidad (PÁG. 79)
- 4.3 Integración en la red de gas natural (PÁG. 85)
- 4.4 Utilización como combustible de vehículos (PÁG. 86)
- 4.5 Aplicación en pilas de combustible (PÁG. 88)
- 4.6 Análisis de las tendencias en la aplicación del biogás como fuente de energía (PÁG. 93)
- 4.7 Aspectos de mercado del biogás (PÁG. 97)
- 4.8 Ayudas y subvenciones (PÁG. 100)

La utilización del biogás como fuente de energía va aumentando día a día, según se va dando mayor importancia a las energías renovables como alternativa a las fuentes tradicionales de energía de origen no renovable (petróleo, gas, carbón, etc.). El biogás, como energía renovable, es un biocombustible que se encuadra, por tanto, en la biomasa. Aunque este apartado se centra en el uso del biogás como fuente de energía, existen otras aplicaciones del biogás. Así, por ejemplo, el biogás se puede utilizar como materia prima en la industria química. También resulta un excelente conservante del grano. En este caso, el procedimiento consiste en inundar las cámaras de almacenamiento del grano con biogás, de modo que los insectos que atacan este alimento no puedan resistir la atmósfera creada.

El biogás puede utilizarse en prácticamente las mismas aplicaciones energéticas desarrolladas para el gas natural (figura 27): generación de calor mediante combustión, generación de electricidad, integración en la red de gas natural, combustible para vehículos y combustible de pilas de combustible.

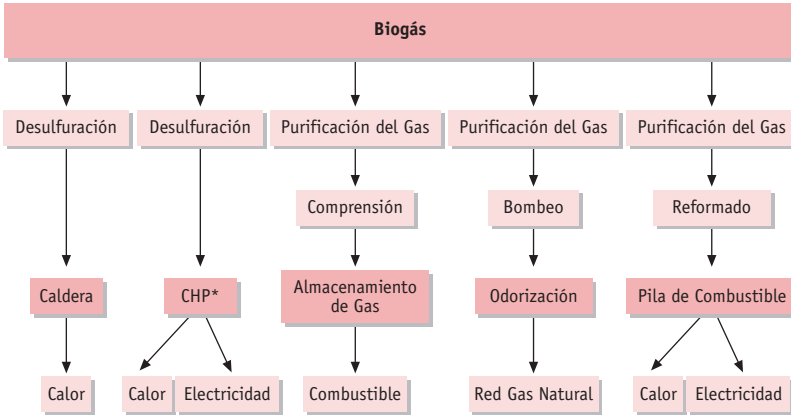


FIGURA 27 Opciones para la utilización del biogás.

Fuente: Proyecto europeo AMONCO.

En la actualidad, las aplicaciones más comunes del biogás son la combustión directa para la producción de calor y la generación de energía eléctrica. No obstante, existe un interés creciente por otras alternativas como son su aplicación como combustible de automoción y su integración en la red de gas natural.

El biogás debe ser refinado previamente en cualquiera de sus aplicaciones energéticas. En este sentido, las operaciones de depuración varían en función del uso del biogás, tal y como se muestra en la Figura 28 (Weiland, 2006). De hecho, los requerimientos de calidad son mayores cuando se utiliza como combustible de automoción, se inyecta en las líneas de distribución del gas natural o se utilizan en pilas de combustible. La purificación del biogás incluye la eliminación de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SH}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , agua y partículas sólidas.



\* CHP: *Combined heat and power unit* (unidad de producción combinada de calor y electricidad, cogeneración).

FIGURA 28 Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso (Weiland, 2006).

## 4.1 Obtención de calor por combustión directa

El biogás se puede utilizar en la generación de calor, a través de su combustión. A su vez, este calor tiene distintas aplicaciones. Así, se puede emplear para calefacción y agua caliente (tanto en la propia instalación productora como a nivel residencial –*district heating*–), para el calentamiento de los reactores donde se produce la digestión anaeróbica, para incinerar o esterilizar desechos provenientes del sector médico, para el secado de forraje, y en calentadores, cocinas de gas, lámparas o quemadores-estufas, tanto de uso industrial como doméstico.

El biogás también se puede aplicar en otros aparatos, como refrigeradores domésticos o quemadores infrarrojos, comúnmente utilizados en la calefacción de ambientes en ganadería (criaderos o parideras). Recientemente, se han desarrollado equipos para el enfriamiento de leche y/u otros productos agrícolas, lo que abre un importante campo de aplicación directa y rentable del biogás.

El principal inconveniente que presenta el biogás en este caso es la necesidad de ubicar la zona de consumo de calor lo más cerca posible de la zona donde se genera, ya que debido al bajo poder calorífico del biogás, este no puede ser trasladado de forma rentable por tuberías. Por ello, lo habitual es que el calor generado por la combustión del biogás sea utilizado en las propias instalaciones productoras.

Un buen ejemplo de producción de energía calorífica por combustión de biogás es el *Horno Incinerador de Residuos Hospitalarios* instalado en el vertedero de La Zoreda (Asturias). Construido en 1993, cumple la función de eliminar los residuos clínicos e infecciosos generados en los hospitales asturianos (*Martín, 1997*). Se consume un promedio de 300 m<sup>3</sup>/h del biogás generado en el vertedero, con las que se eliminan unas 1708 t/año de residuos clínicos y 299 t/año de residuos infecciosos.

---

---

## 4.2 Generación de electricidad

Esta aplicación es, sin duda, el uso más interesante que tiene el biogás en la actualidad. El biogás puede ser usado para generar electricidad de tres formas diferentes:

- Utilizando **motores de combustión** que van unidos a generadores de electricidad.
- Empleando **turbinas o microturbinas de gas**.
- Con **pilas de combustible estacionarias**

Este apartado incluye la generación de electricidad empleando motores de combustión y turbinas de gas. La utilización de pilas de combustible se tratará con más amplitud en el apartado 4.5, ya que tiene distintas aplicaciones.

Por otra parte, este apartado se completa considerando la cogeneración (sistema por el que se aprovecha el calor generado en la producción de electricidad) y haciendo referencia a la legislación concreta que apoya el uso del biogás para la generación de electricidad.

### 4.2.1 Generación de electricidad mediante motores de combustión

Una primera manera de generar electricidad es mediante el uso de motores de combustión interna, tanto los que usan gasolina (motores de ciclo Otto) como los que funcionan con gasóleo (diesel). El biogás se puede usar como combustible para estos motores, pero previamente deben ser eliminadas las impurezas que pueden afectar al rendimiento y mantenimiento de los mismos. El biogás tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110, lo que hace que sea ideal para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, aunque como contrapartida tiene una baja velocidad de encendido.

El rendimiento del biogás en los motores de ciclo Otto es muy adecuado, ya que sólo existe una merma de la potencia máxima de entre un 20% y un 30%, y pueden funcionar usando un 100% de biogás. Sólo para el arrancado es necesario usar otros combustibles.

En cuanto a los motores diesel, generalmente usan un sistema mixto de biogás y diesel, que permite aplicar distintas proporciones de ambos combustibles y el paso de uno a otro de forma rápida y confiable. Para ello, estos motores añaden un mezclador de gases con un sistema de control, manteniendo el sistema de inyección convencional. Además de la generación de electricidad, estos motores se utilizan en otras aplicaciones (bombeo de agua, etc.).

Actualmente, esta tecnología es la más usada para generar electricidad, de hecho existen en España 29 vertederos que producen energía mediante conjuntos de motores y generadores de electricidad alimentados a partir del biogás extraído de sus plataformas de vertido. La Tabla 7 muestra la potencia instalada en los vertederos controlados españoles.

Como ejemplo del uso de motores de combustión interna alimentados por biogás para la producción de electricidad en Madrid, se tiene la planta de biometanización, compostaje y aprovechamiento energético del gas del vertedero de Pinto (Madrid). Esta planta consta de 11 motogeneradores de 1.413 kWe, cada uno de los cuáles consta de un motor de explosión en ciclo Otto (encendido por bujía), que lleva directamente acoplado un generador que produce energía eléctrica, que es vertida a la red eléctrica con los dispositivos adecuados. El conjunto motor – generador va montado en una única bancada, formando así módulos motogenerador individuales y perfectamente diferenciados.

Existen en proyecto plantas similares en otros vertederos españoles, por lo que se prevé que este número aumentará a corto plazo.

TABLA 7 *Vertederos españoles controlados con generación de energía eléctrica (Carreras y Dorronsoro, 2006)*

<i>Vertedero</i>	<i>Potencia instalada (kWe)</i>
Artigas (Vizcaya)	1.280
La Zoreda (Asturias)	6.930
San Marcos (Guipúzcoa)	1.953
Meruelo (Cantabria)	2.432
Góngora (Navarra)	725
Gardelegui (Álava)	1.908
Mula (Murcia)	3.467
Logroño (La Rioja)	480
Garraf (Barcelona)	12.924
Coll Cardús (Barcelona)	1.700
Arico (Tenerife)	2.640
Cerceda (Coruña)	2.175
Sasieta (Guipúzcoa)	475
Montemarta-Cónica (Sevilla)	4.066
Les Valls (Barcelona)	1.065
Can Mata (Barcelona)	1.048
Baseeta Blanca (Barcelona)	2.130
Pinto (Madrid)	15.543
Valdemingómez (Madrid)	16.992
Alicante	1.065
Viznar (Granada)	624



Sta. María de Palautordera (Barcelona)	1.048
Igorre (Vizcaya)	480
Jata (Vizcaya)	480
Abanilla (murcia)	625
Salamanca	470
Colmenar Viejo (Madrid)	52.966
Toledo	1.048
Málaga	2.096

### 4.2.2 Generación de electricidad mediante turbinas de gas

La preocupación existente en la actualidad por el medio ambiente y su protección ha traído consigo la introducción de nuevas tecnologías para la producción de energía más respetuosas con la naturaleza. El uso de las turbinas de gas, que son relativamente menos contaminantes debido a su mejor rendimiento, ha aumentado considerablemente. Este crecimiento se ha visto favorecido por el incremento de actividad en el sector del gas y además por el crecimiento sostenido de la demanda. Una de las ventajas de las turbinas es que requieren menor tiempo de instalación que otros sistemas equivalentes, por lo que resultan muy adecuadas para proyectos de desarrollo rápido. Sin embargo, las turbinas de gas en ciclo simple no son más eficientes que los sistemas de generación de energía basados en carbón o petróleo, ya que los gases que salen de las turbinas de gas se encuentran a temperaturas muy altas (*Neilson, 1998*). En este sentido, se han introducido varias modificaciones en el diseño de las turbinas para que resulten más económicas y medioambientalmente más atractivas.

Una de las alternativas que permite utilizar las turbinas de gas de manera que se obtengan buenos rendimientos es su utilización en ciclos combinados en lugar de utilizarlas en ciclos abiertos, de este modo el rendimiento global de la instalación es superior al de la turbina de gas operando en solitario.

A pesar del buen funcionamiento que se ha conseguido tener de las turbinas de gas en el punto de diseño, debe tenerse en cuenta la fuerte dependencia que presentan estos sistemas de determinados parámetros, entre los cuales destacan los climáticos, como la humedad o la presión, y que condicionan tanto la potencia que la turbina es capaz de producir como su rendimiento. Este factor hace recomendable la utilización de sistemas de simulación para poder predecir su comportamiento.

A modo de resumen se citan algunas de sus ventajas:

- Pueden producir electricidad y calor simultáneamente (cogeneración).
- Prácticamente todo el calor de proceso se puede recuperar (alto rendimiento).

- Pueden operar conectados a la red eléctrica de forma continua.
- Bajo nivel de contaminantes y ruidos.
- Pueden trabajar en ciclo combinado (ciclo de gas y de vapor) aumentando su rendimiento.
- Permiten el uso de combustibles de bajo poder calorífico (biogás).

Un ejemplo del uso del biogás como combustible en turbinas es la utilización de turbinas de gas derivadas de los motores aeronáuticos para la producción de electricidad y calor. Se han diseñado plantas de ciclo combinado en varios países del mundo, destacando Estados Unidos y Brasil. Sin embargo, es necesario realizar ciertas modificaciones en la cámara de combustión para que admita el uso de combustibles con poder calorífico bajo, como es el biogás.

Otra posibilidad es utilizar turbinas específicas para este fin. Varias empresas han desarrollado turbinas de pequeña potencia, en torno a los 30 kW, específicamente para uso de biogás. Estas microturbinas se pueden utilizar en zonas residenciales o pequeñas industrias. Algunas de estas empresas son: Capstones, IR PowerWorks, Turbec (ABB/Volvo), o Elliot Energy System.

En España, se tiene un ejemplo del uso de turbinas de gas mediante biogás generado en el EcoParque de La Rioja, un centro de recogida y reciclaje de RSU, compostaje y generación energética con biogás. Con este biogás se alimentan motores a gas Jenbacher de GE Energy para generar 19 millones de kWh anuales. Los grupos Jenbacher de GE, provistos de un sistema patentado de combustión de mezcla pobre LEANOX, aseguran la relación aire/gas adecuado para todas las condiciones de fiabilidad (*Energetica XXI, 2006*).

### 4.2.3 Sistemas de cogeneración y trigeneración

Por otra parte, es imprescindible hablar de los **sistemas de cogeneración** (CHP- *combined heat and power*), que buscan la mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía contenida en el biogás. La cogeneración genera simultáneamente electricidad y calor, que es capturado para su uso doméstico o industrial. De esta forma, se hace un uso más completo de la energía que la lograda mediante la generación convencional de electricidad, donde el calor generado en el proceso se pierde. Una central de cogeneración de electricidad-calor funciona con turbinas, motores de combustión o pilas de combustible, ya que cualquiera de estas tecnologías libera calor en el proceso de generación de electricidad.

El sistema de cogeneración se utiliza de forma habitual en las instalaciones donde se pueden producir grandes cantidades de biogás (grandes explotaciones agrarias/ganaderas, plantas de tratamiento de aguas residuales, vertederos, etc.), ya

que el calor producido es reutilizado en diversas fases del proceso de generación del biogás (para el calentamiento de los digestores anaeróbicos, por ejemplo).

Las centrales de cogeneración de electricidad-calor pueden alcanzar un rendimiento energético del orden del 90%. Además, el procedimiento es más ecológico, ya que durante la combustión se libera menos  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , que usando fuentes de energía tradicionales (carbón o petróleo). El desarrollo de la cogeneración podría evitar la emisión de 127 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  en la UE en 2010 y de 258 millones de toneladas en 2020, como se recoge en la Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004. Esta directiva hace referencia al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía, y su objetivo es facilitar la instalación y la puesta en marcha de centrales eléctricas de cogeneración con el fin de economizar energía y luchar contra el cambio climático.

Recientemente, se ha empezado a hablar de **trigeneración**. Es un proceso similar a la cogeneración en el que se produce frío, además de energía eléctrica y calor, típicos de la cogeneración, utilizando un único combustible, como es el biogás. El frío normalmente se obtiene por el método de absorción. Por medio de ciclos de absorción, la trigeneración hace posible unir la demanda del calor en invierno con la de frío en los meses de verano.

El calor residual que se obtiene es la suma del producido por la generación de electricidad, más el sustraído del proceso de refrigeración. En este sentido, se consigue más cantidad de calor, aunque a menor temperatura y con la desventaja de que las posibles aplicaciones de este calor pueden verse reducidas.

Al igual que en la cogeneración, el biogás puede ser utilizado en aquellas plantas preparadas para la trigeneración. De hecho, ya existen empresas que han ideado equipos de trigeneración que usan específicamente el biogás como combustible, como el caso de la italiana AB Energy o la alemana Deutz Power Systems GmbH, con equipos modulares basados en motores de combustión interna alimentados por biogás.

#### 4.2.4 Legislación referente a la generación de electricidad mediante biogás

La potencia eléctrica generada en las grandes instalaciones que usan biogás se utiliza habitualmente para consumo propio, pero cuando se genera más potencia que la que requiere el funcionamiento de la instalación, la electricidad sobrante se vende a la red eléctrica.

En este sentido, es de interés reseñar la legislación española respecto de la generación de electricidad a partir de fuentes de energía renovables. El Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial (BOE 126/2007 de 26 de mayo), es el encargado de regular la

generación de electricidad procedente de fuentes de energía renovables y en que manera se puede incorporar a la red eléctrica. En concreto, dentro de las categorías que establece, menciona la categoría B: *instalaciones que utilicen como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa o cualquier tipo de biocombustible, siempre y cuando su titular no realice actividades de producción en el régimen ordinario*. Esta categoría B a su vez se subdivide en 8 subcategorías, y en la subcategoría B.7 se dice: *centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de estiércoles, biocombustibles o biogás procedente de la digestión anaerobia de residuos agrícolas y ganaderos, de residuos biodegradables de instalaciones industriales o de lodos de depuración de aguas residuales, así como el recuperado en los vertederos controlados*. A su vez, el RD divide esta subcategoría en 3 subgrupos, siendo el biogás objeto de dos de ellas:

*Subgrupo b.7.1. Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás de vertederos.*

*Subgrupo b.7.2. Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás generado en digestores empleando alguno de los siguientes residuos: residuos biodegradables industriales, lodos de depuradora de aguas urbanas o industriales, residuos sólidos urbanos, residuos ganaderos, agrícolas y otros para los cuales se aplique el proceso de digestión anaerobia, tanto individualmente como en co-digestión.*

Además de poder vender en términos muy favorables la electricidad producida por medio de fuentes renovables como el biogás, estos productores cuentan también con la ventaja de conseguir un sello, expedido a solicitud del interesado, *“que asegura que un número determinado de kilowatios-hora de energía eléctrica producidos en una central, en un periodo temporal determinado, han sido generados a partir de fuentes de energía renovables o de cogeneración de alta eficiencia”* (punto Tercero de la Circular 2/2007, de 29 de noviembre, de la Comisión Nacional de Energía, que regula la puesta en marcha y gestión del sistema de garantía de origen de la electricidad procedente de fuentes de energía renovables y de cogeneración de alta eficiencia). Esta Circular desarrolla el procedimiento de concesión de esta garantía de origen, establecida por la Orden ITC/1522/2007, de 24 de mayo, por la que se establece la regulación de la garantía del origen de la electricidad procedente de fuentes de energía renovables y de cogeneración de alta eficiencia, y que tiene por objeto fomentar la contribución de estas fuentes de energía a la producción de electricidad así como facilitar el comercio de electricidad producida a partir de tales fuentes.

---

---

### 4.3 Integración en la red de gas natural

El biogás puede introducirse (una vez limpio y refinado) en la red de gas natural, ya que, al igual que el gas natural, está constituido principalmente por metano. De tal modo, cualquier aparato o equipo que funcione con gas natural puede ser accionado con biogás (en general, sin necesidad de hacer grandes modificaciones).

El biogás tiene que ser depurado previamente para que alcance los requerimientos de calidad del gas natural y se pueda introducir en su red de distribución. La purificación del biogás consiste en la eliminación de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SH}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , agua y partículas sólidas. Algunos países, como Alemania o Suecia, han introducido especificaciones de calidad para que el biogás pueda ser introducido en la línea de distribución del gas natural.

Por otra parte, la distribución de biogás en la red del gas natural presenta varias ventajas. En primer lugar, la red conecta la zona de producción con las áreas de mayor densidad de población, lo que permite que el gas llegue a nuevos consumidores. Asimismo, es posible aumentar la producción en un lugar remoto y todavía utilizar el 100 % del gas. Por otra parte, permite mejorar la seguridad de suministro local, lo que es un factor muy importante, ya que la mayor parte de los países consumen más gas natural del que producen.

La integración del biogás en las redes de gas natural ha sido probada con cierto éxito en varios países de la UE (Suiza, Suecia, Alemania y Francia) y en los Estados Unidos. Sin embargo, no se ha incluido en la red de gas natural en España.

En el caso de Estados Unidos, se llevó a cabo la integración del biogás generado en la planta de tratamiento de aguas residuales de Renton en el estado de Washington (*Krich et al., 2005*) en 2005. Para ello, el biogás se depuró previamente para adquirir los niveles de calidad del gas natural.

## 4.4 Utilización como combustible de vehículos

Junto con la generación de electricidad, esta es la aplicación con más futuro del biogás. El desarrollo actual de los biocombustibles como alternativa a los combustibles convencionales mira cada vez con mayor interés a la industria del transporte urbano, la de vehículos ligeros y pesados, donde ya es un hecho probado su aplicación y supone una interesante promesa de futuro.

El biogás puede ser usado como combustible de automoción en motores de explosión y pilas de combustible. En este apartado, se considera únicamente la primera de las aplicaciones del biogás en automoción, ya que la utilización del biogás en pilas de combustible se verá con más detalle en el apartado 4.5, como ya se ha comentado.

Desde hace varios años existen vehículos que funcionan con gas natural. Se estima que los vehículos que utilizan este tipo de combustible emiten un 20% menos de  $\text{CO}_2$  (principal causante el efecto invernadero) que los vehículos que funcionan con gasolina o con gasóleo.

El biogás puede sustituir al gas natural en los vehículos propulsados por este combustible, previo refinado del biogás para eliminar impurezas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SH}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , agua y partículas sólidas) y, de esta forma, elevar los niveles de metano hasta casi el 95% (IEA-Bioenergy, 2001). En este sentido, se han desarrollado dos tipos de tecnología para el refinado y limpieza del biogás para su uso como combustible para automoción:

- La absorción en agua (absorción física). Su principio básico consiste en lavar el biogás con agua a determinada presión. Con este procedimiento se garantiza elevar la concentración en  $\text{CH}_4$  hasta valores similares al gas natural. Dentro de esta tecnología existen dos formas de operación: con recirculación o sin recirculación del agua usada.
- La absorción en alcanolamina (absorción química). Su principio básico consiste en lavar el biogás con una alcanolamina disuelta en agua. Como resultado de la reacción que tiene lugar, se eliminan componentes indeseables y se eleva la concentración en  $\text{CH}_4$  hasta valores similares al gas natural.

La elección de una u otra tecnología depende de la composición del biogás, la capacidad del tratamiento y la aplicación posterior del biogás (automoción, inyección en la red de gas natural, etc.).

En el año 2005, Volvo presentó un motor desarrollado específicamente para usar gas natural o biogás como combustible de automoción (principalmente para autobuses de

transporte urbano). Su nombre técnico es G9A, motor de seis cilindros y 9,4 litros de cubitaje que proporciona una potencia de entre 260 y 300 caballos. En los motores anteriores, se había utilizado el concepto *lean burn* (combustión pobre), esto es una combustión constante con una mezcla de combustible y aire superior a la estequiométrica. En cambio este tipo de motores (G9A) utiliza la mezcla estequiométrica de combustible y aire de forma constante para una combustión óptima. Esto es posible gracias a un sofisticado sistema de gestión electrónica que recibe información de los parámetros básicos del motor. Este sistema electrónico también mide la calidad del combustible suministrado para adaptar los parámetros de la combustión. El motor utiliza un catalizador de tres vías que hace que sus emisiones sean menores que los niveles definidos en las normas Euro 5 y EEV (Enhanced Environmental Vehicle). La patente de Volvo EP1358399 describe el sistema de gestión electrónica en este tipo de motores de gas natural o biogás.

En España son varias las ciudades donde ya existen vehículos que utilizan biogás, sobre todo en transporte urbano. Así, por ejemplo, el Parque Tecnológico de Valdemingómez acogerá dos plantas de biometanización y una de transformación de biogás que abastecerán a 400 autobuses de la EMT. Otros ejemplos del uso del biogás como combustible se dan en Suecia, donde funciona un tren de transporte de pasajeros usando exclusivamente biogás y los autobuses de Helsingborg funcionan con biogás obtenido a partir de residuos orgánicos.

Los obstáculos para el uso generalizado de estos vehículos son: la ausencia de una infraestructura de transporte y almacenamiento del gas natural/biogás, el coste de producción, la pérdida de espacio de carga, el mayor tiempo de llenado de combustible y la menor autonomía de conducción.

## 4.5 Aplicación en pilas de combustible

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos en los que la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad. A diferencia de la pila eléctrica o batería, una pila de combustible no se acaba ni necesita ser recargada, ya que funciona mientras el combustible y el oxidante le sean suministrados. Una pila de combustible consiste en un ánodo en el que se inyecta el combustible, comúnmente hidrógeno, amoníaco o hidracina, y un cátodo en el que se introduce un oxidante, normalmente aire u oxígeno. Los dos electrodos de una pila de combustible están separados por un electrolito iónico conductor.

Su principio de funcionamiento es inverso al de la electrólisis del agua, en la que se separa este compuesto en hidrógeno y oxígeno, mediante aporte de energía eléctrica. En el caso de las pilas de combustible, se obtiene energía eléctrica por medio de la reacción entre hidrógeno y oxígeno, generándose vapor de agua:



La utilización de pilas de combustible ofrece ventajas sustanciales sobre la tecnología clásica de combustión utilizando combustibles fósiles, ya que la eficiencia es superior (>60 %) y únicamente se emite vapor de agua a la atmósfera.

Dado que en el proceso de generación de electricidad también se produce calor, las pilas de combustible también se pueden adaptar como sistemas de cogeneración, produciéndose simultáneamente energía eléctrica y calorífica.

En la tabla 8 se recogen los distintos tipos de pilas de combustible.

Cuando el biogás se utiliza como combustible en pilas de combustible, lo habitual es que sea previamente transformado en hidrógeno. En este sentido, los métodos más comunes para la transformación de metano en hidrógeno son: el reformado con vapor de agua, la oxidación parcial y el autorreformado.



TABLA 8 *Tipos de Pilas de Combustible*

Fuente: APPICE.

Tipo	Electrolito	Temp. de operación (°C)	Usos	Ventajas	Desventajas
Membrana polimérica (PEMFC)	Polímero sólido	60-100	Generación estacionaria. Portátiles. Vehículos.	Electrolito sólido reduce corrosión y mantenimiento. Baja temperatura. Arranque rápido.	Catalizadores costosos. Sensible a impurezas en H <sub>2</sub> u otro combustible.
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	90-100	Espacio. Militar.	Reacción catódica más rápida en electrolito alcalino. Mayor eficiencia.	Sensible a impurezas.
Ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido	175-200	Generación estacionaria. Portátiles.	85% eficiencia en congeneración de electricidad y calor. Acepta H <sub>2</sub> impuro.	Catalizador de Pt. Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen.
Carbonatos fundidos (MCFC)	Solución líquida de litio, sodio y potasio	600-1.000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta temperatura: mayor eficiencia, catalizadores más baratos.	Corrosión debido a altas temperaturas. Baja vida útil.
Óxidos sólidos (SOFC)	Óxido de Zr sólido con adiciones de Itrio	600-1.000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta temperatura. Ventajas electrolito sólido.	Corrosión debido a altas temperaturas. Baja vida útil.

El proceso de **reformado con vapor de agua** (*Spath y Mann, 2000*) consiste en mezclar metano con vapor de agua, en un reactor a alta temperatura, produciéndose la siguiente reacción:



Ésta es una reacción fuertemente endotérmica y los reactores están normalmente limitados por la transferencia de calor. Los reformadores son bien conocidos en la industria y pueden obtener concentraciones de hidrógeno superiores al 70%.

En los reformadores de **oxidación parcial** (*Ogden, 2001*), el combustible reacciona con una cantidad de oxígeno menor que la estequiométrica a través de la siguiente reacción



El calor producido por la reacción puede elevar la temperatura del gas hasta unos 1000°C. Su rendimiento es menor que en el caso anterior.

El **autorreformado** combina los dos procesos anteriores, consiguiendo la ventaja del calentamiento de gases en la oxidación parcial y el mayor rendimiento del proceso con vapor de agua. Este proceso es controlado por un catalizador que determina el grado de oxidación del gas y las reacciones con el vapor. El proceso de reformado por vapor absorbe parte del calor generado por la reacción de oxidación, limitando la temperatura máxima del reactor y disminuyendo el consumo de combustible necesario para elevar la temperatura del gas.

De estos procesos, la oxidación parcial y el autorreformado son los más eficientes desde el punto de vista energético, pero el reformado con vapor de agua es el que más cantidad de hidrógeno produce por unidad de combustible.

Los mercados potenciales de aplicación de las pilas de combustible son el transporte, el uso estacionario para generación distribuida (10-50 MW), la generación centralizada en plantas de 100 a 500 MW y la cogeneración (25-50 MW) (*García Camús, 2003*).

Aunque el uso de pilas de combustible en vehículos presenta numerosas ventajas (emisión cero de contaminantes, alta eficiencia, vehículo silencioso, gran modularidad), la utilización de biogás y otros combustibles en pilas de combustible para automoción está todavía en fase de desarrollo. Existen numerosos prototipos y modelos de coches y autobuses basados en esta tecnología y la investigación sigue en curso en compañías como DaimlerChrysler, Ballard Power Systems, Ford, Volvo, Mazda, General Motors, Honda, BMW, Hyundai, Nissan, etc., pero un automóvil comercial práctico basado en pilas de combustible no se espera hasta por lo menos 2010.

La investigación en la generación estacionaria de electricidad está más avanzada, encontrándose varios ejemplos de aplicación. Uno de ellos es el estudio que está realizando el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas) y URBASER sobre el aprovechamiento del biogás producido en vertederos para producción de energía eléctrica mediante una pila de combustible de carbonatos fundidos. En este proyecto se ha demostrado la viabilidad de utilizar este tipo de pila como sistema de generación energética con notables ventajas frente a los motores de combustión interna. Además, los estudios a escala laboratorio han permitido evaluar el impacto de las impurezas contenidas en el biogás, así como el nivel de tolerancia a las mismas.

Por otra parte, la empresa pública Navantia (perteneciente al ya extinguido Grupo IZAR), en colaboración con la empresa alemana Motoren-und-Turbinen Union (MTU), instaló en 2002 en sus instalaciones de Cartagena una pila de combustible de carbonatos fundidos. Esta pila ha sido la base de un sistema de trigeneración, con potencias generadas eléctrica y térmica de 250 kW y 170 kW, respectivamente, y ha sido sometida a múltiples ensayos para conocer su respuesta ante diferentes problemas en la red eléctrica. En 2005, se logró hacer funcionar esta pila de forma continua

durante más de 20.000 horas y con un grado de fiabilidad excelente. La energía eléctrica generada por la pila –2.500.000 kWh– fue consumida en su totalidad en la fábrica, mientras que la energía térmica – 840.000 kWh– se aprovechó para producir agua caliente sanitaria y aire acondicionado. El rendimiento eléctrico del equipo, en corriente continua, fue del 54%. Después de acondicionar la corriente continua a corriente alterna a 400 V, el rendimiento eléctrico superó el 47%. Esto, unido al aprovechamiento térmico de los gases de escape, elevó al 82% el rendimiento global de la instalación. Finalmente, Navantia destacaba la gran variedad de combustibles alternativos que se podían utilizar en la pila de combustible y, en concreto, el biogás de distintas procedencias (biogás de vertedero, de tratamiento de purines, de la depuración de aguas residuales o cualquier otro biogás procedente de la fermentación de la materia orgánica).

En el Instituto de Ingeniería Agrícola de Bornim (Alemania) también se ha desarrollado una pila de combustible polimérica de 1 kW alimentada con biogás, para probar la aplicación práctica de esta tecnología (*Scholz y Schmersahl, 2005*). Comparado con el gas natural, el biogás tiene una menor densidad energética y requiere de una mayor purificación debido a la alta presencia de impurezas. Estas impurezas representan el mayor problema para la utilización de este tipo de pilas, ya que envenenan el catalizador de platino, inutilizándolo. El gas utilizado provenía de la biometanización de los residuos sólidos de una granja. El biogás previamente desulfurado, pasa a un reformador para obtener un gas rico en hidrógeno.

En la Universidad de Keele (Reino Unido) se ha experimentado con una pila SOFC alimentada directamente con el biogás (*Staniforth y Kendall, 1998*). En este caso, el contenido de CO<sub>2</sub> presente en el gas actúa de forma beneficiosa, ya que favorece el reformado que se produce dentro de la propia pila. Para mejorar la deposición de carbón dentro de la pila, se mezcla el gas con aire, antes de introducirlo, obteniendo resultados comparables al uso del metano. El rendimiento del sistema depende del tipo de biogás.

Por último, en el distrito Puente de Vallecas de Madrid se están construyendo 2069 viviendas que estarán provistas de paneles solares, materiales de construcción reciclados y reciclables, y calefacciones a partir de pilas de combustible que utilizan biogás como combustible (*Pazos, 2006*). Así, bajo el suelo de las colonias de San Francisco Javier y Nuestra Señora de los Ángeles, pertenecientes a este distrito de Madrid, se extenderá una planta de producción termoeléctrica basada en una tecnología puntera que utilizará una veintena de pilas de combustible y el biogás procedente de la planta biometanizadora del vertedero de Valdemingómez, con el valor añadido que presenta la valorización de los RSU de la CM. El biogás, una vez comprimido, desulfurado y humidificado se inyectará en los correspondientes procesadores de combustible; el hidrógeno resultante alimentará la sección anódica de las pilas de combustible, reaccionando con el aire comprimido del cátodo y

produciendo así corriente continua. Toda la corriente continua producida será convertida en alterna en el inversor y exportada en su totalidad a la red eléctrica general de la compañía distribuidora. El importe de venta de esta electricidad generada permitirá amortizar la inversión en unos seis años si el mercado energético continúa al ritmo actual. La temperatura de operación de las pilas de combustible se sitúa entre los 70 y 90°C. El agua que se empleará para disipar el calor generado se transportará a la planta correspondiente, desde donde se distribuirá a las diferentes viviendas (*District Heating*).

## 4.6 Análisis de las tendencias en la aplicación del biogás como fuente de energía

Para ver hacia donde se están enfocando los mayores esfuerzos en este campo, se van a analizar las publicaciones, patentes y proyectos de investigación que tratan sobre las aplicaciones energéticas del biogás. Para ello, se ha centrado la búsqueda en las siguientes tecnologías: biogás y motores de combustión, biogás y turbinas de gas, biogás y pilas de combustible, así como otros usos del biogás (producción de calor, introducción en la red de gas natural, utilización en automoción). La búsqueda se ha centrado en el periodo comprendido entre enero de 2000 y junio de 2007.

En el Anexo II se adjunta una relación de los artículos científicos. Estos artículos se muestran agrupados por categorías en la Figura 30 e incluyen los que estudian el tratamiento del biogás previo a su utilización como biocombustible. La mayor parte de los artículos publicados en este periodo (35) tratan de la utilización de biogás en pilas de combustible, indicando los esfuerzos en investigación que se están llevando a cabo para implantar esta tecnología a nivel comercial. En este sentido, las pilas de combustible son la solución a medio/largo plazo a los problemas energéticos, ya que pueden suministrar energía casi a cualquier tipo de dispositivo o vehículo, como por ejemplo ordenadores portátiles, teléfonos móviles, coches, barcos, naves espaciales, o edificios individuales como centros de emergencia u hospitales.

Dentro del campo de las pilas de combustible, Juan Carlos Ruiz Morales y David Marrero López, investigadores del departamento de Química Inorgánica de la Universidad de La Laguna, han publicado recientemente en la revista *Nature* el hallazgo de un nuevo material con aplicación en las pilas de combustibles de óxidos sólidos (Ruiz *et al.*, 2006). Es la primera vez que científicos españoles publican en *Nature* sobre esta materia. El estudio, desarrollado conjuntamente con la prestigiosa Universidad de St. Andrews (Escocia), presenta el descubrimiento de un material que producirá pilas de combustible con mayor rendimiento que las actuales. El hidrógeno es el combustible utilizado normalmente en las pilas, pero el nuevo material no solamente funciona con dicho gas, sino que además permite utilizar, directamente, gas natural o biogás producido de residuos. Esto implica que será posible diseñar pilas para reducir drásticamente las emisiones de CO<sub>2</sub> a través de la utilización de combustibles renovables como el biogás.

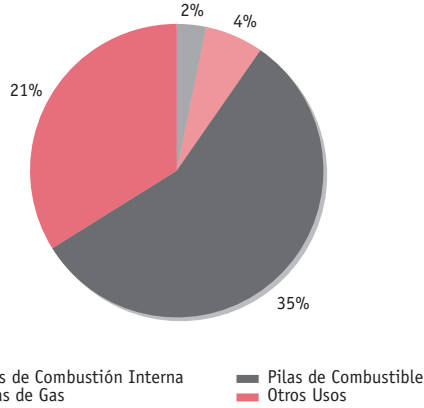


FIGURA 30 *Distribución de publicaciones en función de su temática.*

El análisis de los resultados de la búsqueda de patentes, que se presentan en el Anexo III, se muestra en las Figuras 31 (distribución por aplicación), 32 (distribución por países) y 33 (distribución por años).

En el periodo analizado, las patentes correspondientes a la utilización de biogás en motores de combustión interna y en pilas de combustible fueron 15, en cada caso. En cuanto a la aplicación en turbinas de gas, el número de patentes es 10 en el mismo periodo. Si se analiza la distribución de patentes por países, Japón cuenta con el mayor número de patentes solicitadas (35 %), seguido de Alemania (23 %) y Estados Unidos (12 %).

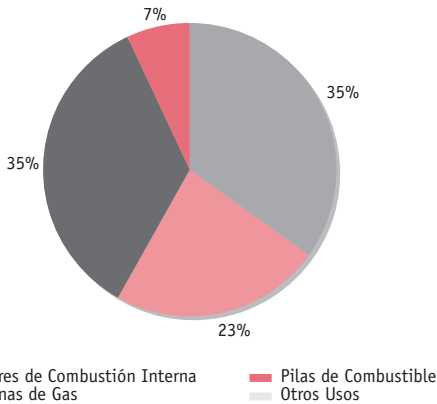


FIGURA 31 *Patentes según uso.*

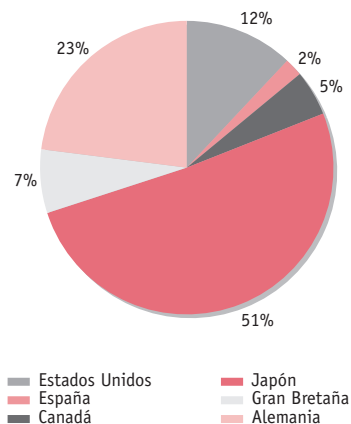


FIGURA 32 *Distribución de patentes por países.*

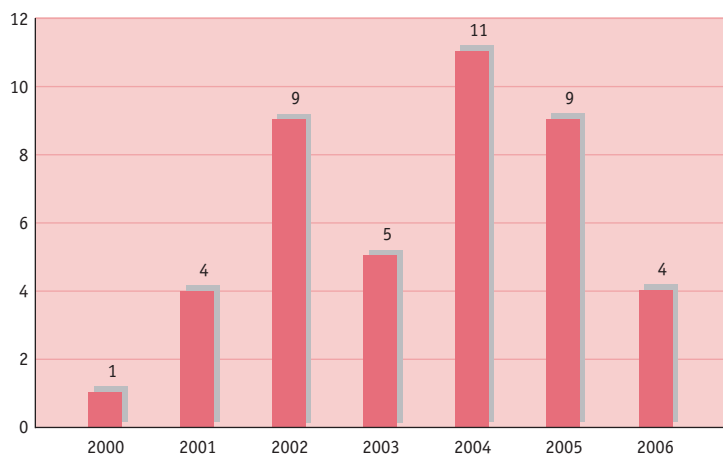


FIGURA 33 *Distribución de patentes por años.*

Según se ha comentado, los proyectos de investigación europeos se han incluido en el Anexo IV. Los proyectos relacionados con las aplicaciones del biogás aparecen con un asterisco. Por su interés, en la tabla 9 se recogen los proyectos europeos sobre aplicaciones del biogás en los que hay participación española.

TABLE 9 *Proyectos europeos sobre la aplicación del biogás con participantes españoles.*

<i>Acronimo</i>	<i>Título</i>	<i>Participantes</i>	<i>Objeto del proyecto</i>
BIODISH	Development of a ceramic hybrid receiver for biogas fired dish-stirling-systems for electric power supply.	Plataforma Solar de Almería; Sistema de Calor S.L. (Almería); Caja Rural de Almería	El objetivo es la intercalación de un receptor cerámico StC entre el punto focal del disco y el de un motor de combustión de biogás. De esta manera, la concentración de la radiación del receptor puede provenir del punto focal solar, del quemador de combustión o de una combinación de ambos. De este modo se puede, por ejemplo, producir electricidad continuamente, independientemente de las condiciones ambientales.
EFFECTIVE	Holistic integration of mfc technology towards a most effective systems compound using biogas as a renewable source of energy.	Uthaber S.A.; CIEMAT	En este proyecto además de demostrar la viabilidad de utilizar una pila de combustible de carbonatos fundidos como sistema de generación energético frente a los motores de combustión interna, se realizan estudios que permiten evaluar la utilización del biogás como combustible en este tipo de pilas de combustión.
4_1030/C/ 00-028/ ALTENER 2	Network for Sustainable Energy Strategies	Bioenergética de Extremadura S.L.; Consultora General de Vías (Madrid); Fundación Ecológica y Desarrollo (Aragón); Asociación Barnamil (Barcelona); Ayuntamiento de Toro (Zamora); BESEL S.A.	Este proyecto trata de aumentar el uso de energías renovables, así como el conocimiento sobre su uso, sus aplicaciones y las ventajas de diferentes fuentes de energía renovable en varios países europeos.
BCNR2004	Barcelona Renewable 2004.	Barcelona Regional S.A.; Aiguasol Bioco S.L.; CIEMAT, Instituto Catalán de la Energía; BP Solar España; Teulades I Facames Multifuncionals S.A.	Se persigue la realización de estudios técnicos con el objetivo de integrar diferentes tecnologías de energía renovable en el desarrollo urbano. Estos estudios están orientados hacia la zona de Sant Adrià del Besòs.
AMONCO	Advanced prediction, monitoring and controlling of anaerobic digestion processes behaviour towards biogas usage in fuel cells-target action	Instituto de Catálisis y Petroquímica (CSIC); Matajero Frigorífico del Nalón S.L.	Se investigó el estudio del biogás como componente combustible de las pilas de combustible y todos los problemas que se puedan derivar de esta combinación. Uno de los campos de mayor atención fue el estudio de determinados gases residuales, a nivel cualitativo y cuantitativo, que pueden dañar las pilas de combustible.
PROTEAS PS SYSTEM	Triple hybride concentrating pv system for the co-generation of electricity, heat and cooling power	Inspira S.L. (Madrid); Universidad Politécnica de Madrid	El objetivo es el desarrollo de un prototipo industrial de concentrador capaz de producir 6000 KWH al año de electricidad, agua caliente y agua fría.
ECOSTILLER	Energy Efficient Community Stimulation by use and Integration of Local Energy Resources	Instituto Catalán de la Energía	Se pretende conseguir vicinidades energéticamente rentables, coordinando su actuación, mediante el uso de biogás en el sistema de calefacción urbana, como herramienta para la reducción del consumo de combustible y la reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> .



## 4.7 Aspectos de mercado del biogás

Como se muestra en la Figura 34, en España la producción eléctrica a partir de biogás contaba con 141 MW a finales de 2004, casi duplicando la cifra correspondiente a 2002. Esto se debe a la incorporación de un total de 51,8 MW en el año 2003 y 16,2 MW durante el año 2004, superando con creces el objetivo de la planificación energética anterior, fijado en 111 MW para 2010. La nueva planificación apuesta por conseguir 235 MW, equivalente a 188.000 tep.

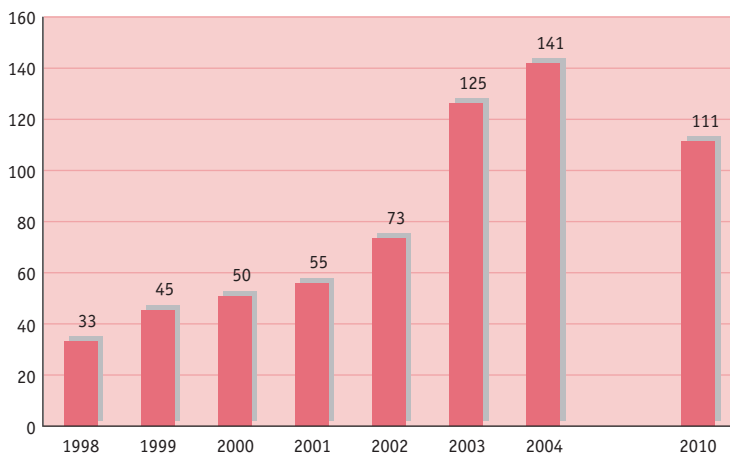


FIGURA 34 Evolución del consumo de biogás y previsiones en el nuevo marco del Plan de Fomento, en términos de potencia instalada (IDAE, 2005b).

Las Comunidades Autónomas que contribuyeron en mayor medida al incremento de la producción eléctrica generada con biogás en 2004 fueron Cataluña (5,5 MW) y la Comunidad Valenciana (5,3 MW), ya que entre ambas representaron algo más del 67% del incremento de ese año. El año anterior fueron la Comunidad de Madrid y Cataluña las dos comunidades con mayor aumento de potencia. Sólo en la primera se pusieron en operación 3 nuevas plantas que supusieron un incremento de la potencia eléctrica de 36,8 MW, el 71% del incremento total de potencia instalada en 2003 en todo el territorio nacional (IDAE, 2005a).

Sobre el coste que supone poner en marcha un proyecto de generación de electricidad usando biogás como fuente de energía, el Plan de Energías Renovables para España 2005 - 2010 incluye un caso tipo (IDAE, 2005a), que puede dar una idea de los costes.

Por último, se hace mención a las empresas que en España se dedican al biogás. Gracias al buscador de empresas de IDAE se han encontrado un total de 32 empresas que se dedican a este campo en nuestro país. Además el propio IDAE las clasifica en

dos grupos: Plantas de producción de Biogás y Sistemas de gestión y manipulación del Biogás. En muchos casos estas empresas cubren estos dos campos de actuación. Se adjunta un listado de las mismas en el Anexo IV.

Obviamente, este listado no es exhaustivo, ya que deja fuera a muchas otras empresas que tienen relación con el biogás, pero de una forma menos evidente, sobre todo en lo que se refiere a la generación de electricidad. Algunos ejemplos son las grandes compañías eléctricas (Endesa Cogeneración y Renovables o la Compañía Sevillana de Electricidad); las empresas de tratamiento de residuos urbanos, tanto públicas como privadas (Urbaser); empresas dedicadas a los generadores de electricidad de todo tipo, y entre ellos los operados con biogás (por ejemplo Siemens o GE Energy). Por su interés nos vamos a centrar en algunas empresas, tanto españolas como extranjeras:

### Grupo Hera

Los servicios de HERA ENER-G consisten en la desgasificación «llave en mano» de vertederos controlados y el aprovechamiento energético, mediante equipos de cogeneración del biogás captado, pudiendo realizarse todo el conjunto de la instalación o sólo de una parte de la misma, en función de las necesidades del cliente.

### Biogástec

Biogástec es una empresa de desarrollo tecnológico y proyectos, situada en el ámbito de la ingeniería química. La empresa es una *spin-off* del Grupo de Investigación de Reactores Biológicos y Enzimáticos de la Universidad de Cádiz. Su actividad se centra en el aprovechamiento integral de una fuente de energía renovable como es el biogás, rico en metano, la desulfuración de efluentes gaseosos para evitar la emisión de olores y el aprovechamiento energético de residuos orgánicos mediante la producción de biogás, promoviendo la protección del medio ambiente.

### Levenger

Empresa creada para la ejecución y desarrollo de proyectos de ahorro y diversificación energética, siempre apostando por la introducción de nuevas tecnologías y una constante innovación. Levenger es especialista en energías alternativas y cogeneración con amplia experiencia, con soluciones adecuadas a cada situación o problema concreto, gracias a su tecnología de vanguardia y alta calidad de productos. En el campo del biogás cuentan con modernos equipos diseñados especialmente para el tratamiento de residuos de origen vacuno, porcino y gallinaza y digestión anaeróbica.

### Energy & Waste Technologies

Energy & Waste Technologies dirige su actividad al desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías para el tratamiento y valorización de residuos (sólidos, líquidos y gases).

El grupo tiene como base la investigación, desarrollo e innovación tecnológica (*I+D+i*). Esto le permite ofrecer plantas de última generación para el tratamiento de efluentes (residuos) de distintos tipos de procesos productivos. Sus áreas de acción alcanzan:

- Limpieza/acondicionamiento del biogás (reducción de humedad y siloxanos).
- Transformación del biogás en combustible para la automoción de coches o para su inyección a la red de gas natural.
- Eliminación de gases ácidos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ).
- Secado de lodos y lixiviados.
- Gasificación de biomasa (maderas, lodos, papel, cartón, etc.).
- Reducción del nivel de amonio en aguas residuales.

### Profactor

A nivel europeo hay que destacar a la empresa austriaca Profactor. Al igual que en el caso Biogástec, Profactor nació como una *spin-off* de la *Society for the Promotion of Modernisation of Manufacturing Technologies in Austria* (VPTÖ). Uno de los centros de atención de la empresa es el desarrollo de innovaciones que utilicen energías renovables como fuente de energía (por ejemplo el uso de biogás en pilas de combustible). Está especializada en el uso, tratamiento y limpieza de gases de origen biológico mediante biofiltros para remover las impurezas del biogás.

Su liderazgo en este sector a nivel europeo se demuestra viendo la tabla de proyectos europeos mencionada más arriba, donde Profactor es la empresa coordinadora en tres de los mismos.

## 4.8 Ayudas y subvenciones

Las distintas Administraciones Públicas suelen disponer de instrumentos de subvención y ayuda financiera para contribuir al fomento de las políticas medioambientales, dirigidas tanto a las propias Administraciones como a empresas privadas y particulares.

Dichos incentivos económicos o medidas de apoyo financiero pueden provenir de fondos comunitarios, de asignaciones en los Presupuestos Generales del Estado y de fondos de las restantes administraciones públicas, en ocasiones con participación de unos y otros (cofinanciación).

En la página Web del IDAE, se hace un repaso exhaustivo de todas las ayudas existentes en este ámbito (y que, por tanto, son susceptibles de afectar al biogás). En esta web se puede encontrar un análisis del marco de las políticas energéticas, tanto a nivel europeo como español, y un desglose actualizado de las distintas ayudas existentes en la UE, España y las Comunidades Autónomas.

Además, el IDAE ha centralizado las líneas de financiación que anteriormente gestionaba el Instituto de Crédito Oficial, así como nuevas herramientas de financiación.

Así, el IDAE ha habilitado una **Línea de Préstamo**, con una dotación inicial de 30 M€, para financiar inversiones en proyectos de energía solar térmica, fotovoltaica aislada y biomasa doméstica e instalaciones de cogeneración. Los beneficiarios podrán ser personas físicas, PYMES, comunidades de propietarios, comunidades de vecinos, ayuntamientos y otros organismos públicos, instituciones dependientes de ellos y otras formas jurídicas, excepto grandes empresas.

Por otro lado, el IDAE ofrece otras formas de participación en proyectos de esta área, como son:

### Financiación por Terceros (F.P.T.)

Constituye uno de los métodos más adecuados para acometer proyectos de inversión de ahorro y eficiencia energética y proyectos de generación de energía utilizando para ello distintas fuentes, incluidas las energías renovables. El IDAE, principal impulsor de este mecanismo de financiación en España, lo viene utilizando con éxito desde el año 1987.

### Financiación de Proyectos y Arrendamiento de Servicios

Modelo de financiación aplicable a proyectos de inversión en materia de ahorro, eficiencia energética y energías renovables, que dispongan de un análisis previo de viabilidad técnico-económica. Se trata de un nuevo modelo de colaboración financiera que supone la formalización de dos contratos: un contrato marco de colaboración y arrendamiento de servicios y un contrato de financiación de proyecto (crédito mercantil).

### Otras participaciones financieras de IDAE en proyectos energéticos:

- Unión Temporal de Empresas (UTE)
- Agrupaciones de Interés Económico (AIE)
- Participación en Sociedades Anónimas
- Cuentas de participación
- Convenios de desarrollo tecnológico

Por último no conviene olvidar otro tipo de ayudas, como son las deducciones en el Impuesto de Sociedades por inversiones destinadas a la protección del medio ambiente. En concreto, en el art. 39.3 del Real Decreto Legislativo 4/2004, de 5 de Marzo, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley del Impuesto sobre Sociedades (BOE 61, de 11 de Marzo de 2004) se dice: *“Asimismo, podrá deducirse de la cuota íntegra el 10 por ciento de las inversiones realizadas en bienes de activo material nuevos destinados al aprovechamiento de fuentes de energía renovables consistentes en instalaciones y equipos con cualquiera de las finalidades que se citan a continuación: a) aprovechamiento de la energía proveniente del sol para su transformación en calor o electricidad; b) aprovechamiento, como combustible, de residuos sólidos urbanos o de biomasa procedente de residuos de industrias agrícolas y forestales, de residuos agrícolas y forestales y de cultivos energéticos para su transformación en calor o electricidad; c) **tratamiento de residuos biodegradables procedentes de explotaciones ganaderas, de estaciones depuradoras de aguas residuales, de efluentes industriales o de residuos sólidos urbanos para su transformación en biogás;** d) tratamiento de productos agrícolas, forestales o aceites usados para su transformación en biocarburantes (bioetanol o biodiésel)”*.



Recursos de información

### **AGSTAR PROGRAM**

Programa del Departamento de Energía/Agricultura de los EE.UU. para impulsar estas tecnologías.

<http://www.epa.gov/agstar/>

### **AMONCO: Biogas - Fuel Cells**

La Agencia Austriaca de Energía mantiene una página con información sobre energía y tecnologías innovadoras, especialmente renovables. Uno de sus proyectos es AMONCO (Advanced prediction, monitoring and controlling of anaerobic digestion processes behaviour towards biogas usage in Fuel Cells).

<http://www.eva.ac.at/amonco/>

### **APPA**

Asociación de Productores de Energías Renovables que agrupa a más de doscientas noventa empresas que operan en el sector de las energías renovables. Su objetivo es contribuir a crear las condiciones favorables para el desarrollo de las energías con fuentes renovables.

<http://www.appa.es/>

### **APPICE**

Asociación Española de Pilas de Combustible cuya finalidad es favorecer el desarrollo científico y técnico de esta tecnología, dar a conocer su potencialidad en los ámbitos nacional e internacional y suministrar formación e información a los agentes sociales interesados.

<http://www.appice.es/>

### **AYUDASENERGIA.COM**

Ofrece información y noticias de actualidad sobre el sector energético. Además recoge aplicaciones y consejos prácticos para ahorrar energía en cada uno de los elementos que consumen energía.

<http://ayudasenergia.com>

### **BIOMASS PROGRAM**

El Programa de Biomasa del Departamento de Energía de los E.E.U.U. desarrolla tecnologías para la transformación de la biomasa en valiosos combustibles, productos químicos, materiales y energía, así como para la reducción la dependencia del petróleo extranjero y el fomento de biorefinerías. La biomasa es uno de los recursos energéticos más importantes.

<http://www1.eere.energy.gov/biomass/>

### **DOC RENEWABLE ENERGY**

En este portal se puede encontrar numerosos documentos e información variada sobre el sector de Energías Renovables.

<http://www.docrenewableenergy.info/es>



### **ENERGIAS RENOVABLES**

Portal donde se recogen noticias, informaciones, enlaces de interés sobre diferente temas relacionados con las energías renovables. Paralelamente, edita la revista Energías Renovables en formato papel.

<http://energias-renovables.com>

### **ENERGY CONGRESS**

En esta web se dispone de información sobre todas las novedades en el mundo de la Energía: Cursos, Seminarios, Ferias y Encuentros Empresariales.

<http://www.energycongress.net/>

### **ENERGIE-CITES**

Asociación de municipios europeos por una política energética local sostenible.

<http://www.energie-cites.org>

### **ENERGY PAPERS**

Se puede encontrar información sobre publicaciones de interés para el sector energético.

<http://www.energypapers.com>

### **EUROSTAT**

Es la oficina estadística de la Comisión Europea, que produce datos sobre la Unión y promueve la armonización de los métodos estadísticos de los estados miembros.

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>

### **GLOBAL OVERVIEW OF RENEWABLE ENERGY SOURCES (AGORES)**

Web oficial de la Comisión Europea para las Energías Renovables. Ofrece información sobre los proyectos europeos, publicaciones y abundantes enlaces con organismos responsables de las energías renovables.

<http://www.agores.org>

### **IDAE**

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Entidad Pública Empresarial adscrita al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través de la Secretaría General de Energía. Pretende promocionar en España la eficiencia energética y el uso racional de la energía, así como apoyar la diversificación de las fuentes de abastecimiento e impulsar la utilización de las energías renovables.

<http://www.idae.es/>

### **INFOECOLOGIA**

Revista electrónica de ecología y medio ambiente creadas por profesionales provenientes del ámbito de la información medioambiental, la empresa y organizaciones conservacionistas.

[www.infoecologia.com](http://www.infoecologia.com)

### **OBSERV´ER**

Observatorio de energías renovables en donde se puede encontrar información, datos cifrados, fichas pedagógicas, etc sobre las energías renovables.

<http://www.observ-er.org>

### **PORTAL DE ENERGIAS RENOVABLES**

Creado por CIEMAT como sitio de referencia donde se estructure y organice la documentación e información científica que se genera en torno a las Energías Renovables. Ofrecer un medio de comunicación a los investigadores y profesionales del campo de las energías renovables para la colaboración en proyectos.

<http://www.energiasrenovables.ciemat.es/>

### **RESIDUOS**

Revista técnica de medio ambiente, cuyo objetivo es dar una información técnica, científica, detallada y veraz sobre los últimos avances alcanzados para la protección del medio ambiente, con el fin de darles la mayor difusión posible entre los agentes sociales, económicos y políticos implicados. Asimismo contribuye a un mejor conocimiento de la problemática de los residuos como factor fundamental de la conciencia ecológica. Esta revista, cuenta con un portal en internet, con numerosas secciones de libre acceso.

<http://www.revistaresiduos.com>

## Referencias

- AEA – Bioenergy (2001). “Biogas upgrading and utilisation”. Report of Task 24: Energy from biological conversion of organic waste. International Energy Agency Technology Environment, Culham, Oxfordshire (UK). 20 p. [http://www.recyclenow.org/Report\\_IEA\\_Bioenergy\\_1MB.pdf](http://www.recyclenow.org/Report_IEA_Bioenergy_1MB.pdf)
- AEMA (Agencia Europea de Medio Ambiente) (2007). “Inventario anual de gases de efecto invernadero de la Comunidad Europea 1990-2005 e informe del inventario 2007”. *EEA Technical Report*, nº 7, 176 p. [http://reports.eea.europa.eu/technical\\_report\\_2007\\_7/en/Full%20report%20Annual%20European%20Community%20greenhouse%20gas%20inventory%201990-2005%20and%20inventory%20report%202007.pdf](http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2007_7/en/Full%20report%20Annual%20European%20Community%20greenhouse%20gas%20inventory%201990-2005%20and%20inventory%20report%202007.pdf)
- Álvarez Doménech, G., Gordillo Bolasell, M.A., Sánchez Ferrer A. (2001). “Estudio de los parámetros que afectan la producción de biogás en un vertedero controlado”. *Residuos*, 61: 28-33.
- Angelidaki, I., Ahring, B. (1997). “Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future”. En: III curso de Ingeniería Ambiental. Flotats X. Universidad de Lleida. Pp. 336-342.
- Banks, C.J., Humphreys, P. N. (1998). “The Anaerobic Treatment of a Ligno-cellulosic substrate offering little natural pH buffering capacity”. *Water Science and Technology*, 38 (4-5): 29-35.
- Beyebach, A. (2005). “El biogás de vertederos”. *Ambienta*, 47: 66-69.
- Bolin, B. (Presidente equipo de redacción) y otros. (1995). “Second Assessment Report: Climate Change 1995”. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva, Suiza. 81 p. <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-sp.pdf>
- Bonmatí Blasi, A. (2001) “Usos de l’energia tèrmica per a la millora del procés de digestió anaeròbia de purins de porc i per a la recuperació de productes d’interès”. Tesis doctoral. 145 p. Universidad de Lleida.
- Braber, K. (1995). “Anaerobic digestion of municipal solid waste: a modern waste disposal option on the verge of breakthrough”. *Biomass and Bioenergy*, 91(1-5): 365 – 376.
- Brinkman, J. (1999). “Anaerobic digestion of mixed waste slurries from kitchens, slaughterhouses and meat processing industries”. Volume I, pp. 190-191. En: *Proceeding of the II International Symposium on anaerobic digestion of solid waste (II ISAD-SW)*, Barcelona, 15 Junio.
- Brown, K.A., Maunder, D.H. (1994). «Exploitation of Landfill Gas: a UK Perspective» *Water Science & Technology*, 30:143-151.
- Brummeler-ten, E. (2000). “Full scale experience with the BIOCEL process”. *Water Science & Technology*, 41 (3): 299-304.
- Caddet Centre for Renewable Energy y OECD (2000). “Co-digestion of Manure with Industrial and Household Waste”. Technical Brochure, 118, 4 p. [http://www.caddet.org/tracker/pdf\\_divert.php?id=385&PHPSESSID=5f9f1f910ef9103e9a8420a5a81cc7ae](http://www.caddet.org/tracker/pdf_divert.php?id=385&PHPSESSID=5f9f1f910ef9103e9a8420a5a81cc7ae)
- Campos Pozuelo, A.E. (2001). “Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestion con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria”. Tesis Doctoral, Universidad de Lleida. 372 p.
- Carreras, N., Dorronsoro J.L. (2006). “Generación de energía a través del biogás extraído de los vertederos españoles”. *Residuos*, 89: 66-70.
- Carreras, N., Dorronsoro J.L., Pérez, R. y Herraes, I. (2005). “Estudio de la generación de gases a diferentes profundidades en un vertedero sin desgasificar de RSU clausurado hace mas de siete años”. *Residuos*, 82: 76-84.
- Carrillo, L. (2003). “Microbiología Agrícola”. Ed. Salta. Universidad Nacional de Salta (Argentina). 1:160.
- Coombs, J. (1990). “The present and future of anaerobic digestion”. *Anaerobic digestion: a waste treatment technology*. Editado por Wheatley, A. Critical reports on applied chemistry. 31: 93-138.
- Comisión Europea. (1997). “Libro Blanco sobre fuentes de energía renovables”. Bruselas, Bélgica. 59 p.

- Corbitt, Robert A. (2003). "Manual de referencia de la Ingeniería Ambiental". Ed. McGraw-Hill. 1.600 p.
- De Baere, L. (2000). "Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art". *Water Science & Technology*, 41(3): 283-290.
- De Baere, L. (2006). "Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future?" *Water Science & Technology*, 53 (8): 187-194.
- De Mes, T.Z.D., Stams, A.J.M., Reitch, J.H., Zeeman G. (2003) "Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes". In: *Bio-Methane & Bio-Hydrogen - Status and perspectives of biological methane and hydrogen production*, Dutch Biological Hydrogen Foundation. 168 p.
- Di Palma, L., Medici, F., Merli, C., Petrucci, E. (1999). "Optimising gas production in the anaerobic codigestion of the organic fraction of solid waste from markets": En: *Proceedings of the II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Barcelona. Pp. 184-189.
- Dinsdale, R.M., Premier, G.C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L. (2000). "Two-stage anaerobic codigestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters". *Bioresource Technology*, 72: 159-168.
- Edelmann, W., Engeli, H., Graddenecker, M. (1999). "Codigestion of organic solid wastes and wastewater": pp. 381-388. En: *Proceeding of the II International Symposium on Anaerobic Digestion of solid Waste (II ISAD-SW)*, Barcelona.
- Elias Castells, X. (2005). "Tratamiento y valorización energética de residuos". Ed. Díaz de Santos. Madrid. 1.228 p.
- Energética XXI. (2006). "Los motores a gas Jenbacher de GE Energy apoyan un proyecto innovador de energía a partir del biogás en el noroeste de España". *Energética XXI, Revista de Generación de Electricidad*, 54, Marzo. 2 p. [http://energetica21.com/articulos/me/me\\_mar06\\_1.pdf](http://energetica21.com/articulos/me/me_mar06_1.pdf)
- EurObserv'ER (2007). "Biogas barometer". *Systemes Solaires*, nº 179. 11 p. Mayo. <http://www.observ-er.org>
- Ferrer, P.J. y Sanz, J.B. (1983). "Posibilidades de utilización agrícola del estiércol líquido porcino (ELP) en relación a su valor fertilizante y su incidencia sobre el suelo. Composición y valor fertilizante del ELP". *Serie Agrícola*, 23: 35-57. INIA.
- García Camús, J.M. (2003). "Procesos catalíticos en pilas de combustible". *Diploma Estudios Avanzados*. Programa Doctorado en Ingeniería Química. 50 p. Universidad Rey Juan Carlos.
- González Sepúlveda, Y.E., Sandoval Bastida, S.O. (2005) "Diseño de sistemas de tratamiento y Aprovechamiento de Purines de Origen Bovino". Tesis Doctoral, 204 p. Universidad Católica de Temuco (Chile).
- (GTZ) GmbH. (1999). "Biogas Digest". *Biogas Basics*, Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH Vol. 1. 46 p. GTZ-GATE. Eschborn, Germany <http://www.gtz.de/de/dokumente/en-biogas-volume1.pdf>
- Hamzawi, N., Kennedy, K.J., McLean, D.D. (1998). "Anaerobic digestion of co-mingled municipal solid waste and sewage sludge". *Water Science & Technology*, 38 (2): 127-132.
- Hjort-Gregersen, K. (2000). "Sustainable handling and utilisation of manure and organic waste resources: the centralised plant approach". *NJF Seminar*. Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, Denmark. Nº 320. 22 p.
- IDAE. (2005a). "Plan de energías renovables en España (2005-2010)". Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Madrid. 347 p. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Plan\\_de\\_Energias\\_Renovables\\_en\\_Espana\\_completo\\_49e2ac7d.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Plan_de_Energias_Renovables_en_Espana_completo_49e2ac7d.pdf)
- IDAE. (2005b). "Eficiencia energética y energías renovables". Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. *Boletín IDAE*, nº 11. 17 p. Septiembre. <http://www.idae.es>

Jong, H.B.A.D., Koopmans, W.F., Kniff, A.V.D. (1993). "Conversietechnieken loor GTF-afval; Ontwikkelingen in 1992". Ed. Haskoning, Novem and RIVM, The Netherlands.

Krich, K., Augenstein, D., Batmale, JP., Benemann, J., Rutledge, B., Salour, D. (2005). "A Sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California". California Institute for Energy and Environment. 282 p.

Martín González, S. (1997). "Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización". Tesis Doctoral: pp. 211-220. Universidad de Oviedo.

Muñoz Camacho, E., Sánchez López, F.M. (2005). "Aprovechamiento energético del biogás procedente de lodos de EDAR". *Residuos*, 82: 124- 138.

Neilson, Charles E. (1998). "LM2500 Gas turbina modifications for biomass fuel operation". *Biomass and Bioenergy*, 15(3): 269-273.

Nelson, L. Nemerow, Avijit Dasgupta. (1998). "Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos". Ed. Díaz de Santos, Madrid. 842 p.

Noguer, X. (2006). "Aprovechamiento energético de biogás en vertedero". Seminario sobre tecnologías energéticas para la biomasa y residuos. Endesa. <http://www.fundacionenergia.es/>

Ogden, Joan M. (2001). "Review of small stationary reformers for hydrogen production". Center of Energy and Environmental Studies. Princeton University. 52 p. <http://www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/31948.pdf>

Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gómez, E. (1991). "Kinetics of anaerobic treatment: a critical review". *Critical Reviews in environmental control*, 21 (5,6): 411-490.

Pazos Bazán, L. "Pilas de combustible para un "ecobarrio" en Madrid". Weblog de Energía y Sostenibilidad de Madrid (diciembre 2006). <http://weblogs.madrimasd.org/energiasalternativas/>

Peters, T. A. (2003). "Optimización del aprovechamiento energético de biogás de vertederos". *Residuos*, 70: 34-37.

Renovalia. (2005). "Situación de las Energías Renovables en España. Informe final". CENER, Ministerio de Educación y Ciencia, Centro Nacional de Energías Renovables y Fundación F212. Mayo. 273 p. [http://www.cener.com/documentos/LibrosPublicaciones/INFORMEFINALRENOVALIA2005\\_Baja.pdf](http://www.cener.com/documentos/LibrosPublicaciones/INFORMEFINALRENOVALIA2005_Baja.pdf)

Rodríguez, L., Vicente, M.A., Gil, A. (2007). "Situación de la gestión de residuos agrícolas en la provincia de Salamanca". *Residuos*, 96: 82-93.

Ruiz Morales, J.C., Marrero López, D., Savaniu, C., Wuzong, Z., Irving, J.T.S. (2006) "Disruption of extended defects in solid oxide fuel cells anodes for methane oxidation". *Nature*, 439: 568-571.

Scholz, V., Schmersahl, R. (2005). "Biogas in PEM-Brennstoffzellen". *Agrartechnische Forschung*, nº 11, Heft 1: pp. 1-10.

Spath, P.L., Mann, M.K. (2000). "Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System". National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, TP-570-27715. 56 p.

Staniforth, J., Kendall, K. (1998). "Biogas powering a small tubular solid oxide fuel cell". *Journal of Power Sources*, 71: 275-277.

Tiehm, A., Nickel, K., Neis, U. (1997). "The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge". *Water Science & Technology*, 36 (11): 121-129.

Vagron GMBH. (2000). [www.vagron.nl/html/uk/procesvagron.htm](http://www.vagron.nl/html/uk/procesvagron.htm)

Vandevivere, P., De Baere, L., Verstraete, W. (2002). "Types of anaerobic digester for solid wastes". In: Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. Ed. J. Mata-Álvarez. pp. 111-140.

Verma, S. (2002). "Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes". *Master of Science Degree in Earth Resources Engineering*. Department of the Earth & Environmental Engineering (Henry Krumb School of Mines). Fu Foundation School of Engineering & Applied Science, Columbia University. 56 p. <http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>

Weiland, P. (2006). "Biomass Digestion in Agriculture: A succesful pathway for Energy Production and Waste Treatment in Germany". *Engineering in Life Science*. 6 (3): 302-309.

