

PRODUCCIÓN Y UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS

1. INTRODUCCION

De las diversas técnicas de tratamiento que permiten reducir la carga orgánica contaminante de los residuos, uno de los procesos que más se está empleando en la actualidad es el tratamiento por digestión anaerobia o biometanización. Este tratamiento presenta un interés especial ya que, además de reducir la contaminación, da lugar a la producción de biogás, gas con un importante valor energético al estar constituido mayoritariamente por metano (55-65%).

El aprovechamiento energético del biogás (tanto eléctrico como térmico) tiene su punto de partida en cuatro tipos de residuos biodegradables: ganaderos, de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), de efluentes industriales y de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU).

Tanto la generación de biogás en digestores anaerobios como la extracción y utilización del biogás generado en los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) son procesos de interés en el área de la producción energética. Además en ambas situaciones se produce una mejora medioambiental importante ya que, la extracción del biogás de vertedero ofrece la posibilidad de reducir las emisiones de metano y dióxido de carbono, gases que contribuyen de manera notable al efecto invernadero, y la digestión anaerobia de los residuos reduce considerablemente el poder contaminante de éstos.

2. RESIDUOS BIODEGRADABLES

Entre la gran variedad de residuos existentes cabe destacar por su volumen y connotaciones medioambientales los residuos biodegradables. Estos residuos se caracterizan por su alto contenido en materia orgánica y, como su nombre indica, tienen la característica de poder ser degradados por tratamientos biológicos. Hasta hace pocos años, los residuos generados por la escasa industria existente y las reducidas poblaciones no planteaban grandes problemas de contaminación y mediante procesos de autodepuración, la propia naturaleza se encargaba de integrarlos al medio natural. Hoy en día son tan numerosos y puntuales, que han de ser gestionados adecuadamente para no ocasionar un grave problema medioambiental, ya que la capacidad de autodepuración resulta insuficiente y hay que aplicar distintas técnicas de tratamiento.

Por otra parte, la metodología tradicional del tratamiento de los residuos, cuyo objetivo principal era su desaparición, ha ido variando en los últimos años estudiándose al máximo las posibilidades de aprovechamiento de los mismos. Los residuos biodegradables engloban subproductos y residuos orgánicos, que se pueden presentar en fase sólida y líquida, y son susceptibles de ser sometidos a procesos biológicos de tratamiento vía digestión anaerobia. Este tratamiento presenta un interés especial, ya que además de reducir la contaminación, tiene lugar la producción de biogás, mezcla gaseosa con un importante potencial energético debido a su elevado contenido de metano (50-70%), como se verá en otro tema del curso.

A continuación se van a dar algunas características de los residuos biodegradables susceptibles de ser tratados por digestión anaerobia para la generación de energía (biogás).

2.1. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Los residuos sólidos urbanos (RSU) que de forma común conocemos como "basuras" hasta hace no muchos años no eran un motivo especial de preocupación. En la actualidad, debido al crecimiento

económico y la acumulación de población en zonas puntuales, alcanzan cantidades tan importantes (en España más de 22 millones de toneladas en 2004) que han de ser gestionados adecuadamente, pues de lo contrario se convertirían en un problema de primera magnitud.

La **tabla I** recoge la producción de residuos urbanos (residuos domiciliarios) en España y por CCAA en 2004. Como se puede observar, España dio un coeficiente de producción de residuos domiciliarios de 1,437 kg por habitante y día en el año 2004.

Tabla I: Producción de residuos urbanos por CCAA. Año 2004

	kg/hab/día	kg/hab/año	Población padrón 2004	t/año	Porcentaje
Andalucía	1,488	543,120	7.687.518	4.175.245	18,36
Aragón	1,310	478,150	1.249.584	597.489	2,63
Asturias (Principado de)	1,360	496,400	1.073.761	533.015	2,34
Baleares (Islas)	2,020	737,300	955.045	704.155	3,10
Canarias (Islas)	2,010	733,650	1.915.540	1.405.336	6,18
Cantabria	1,610	587,650	554.784	316.019	1,43
Castilla-La Mancha	1,130	412,450	1.848.881	762.571	3,35
Castilla y León	1,118	408,070	2.493.918	1.017.693	4,48
Cataluña	1,600	584,000	6.813.319	3.978.978	17,50
Comunidad Valenciana	1,430	521,450	4.543.304	2.371.378	10,43
Extremadura	1,215	443,475	1.075.286	476.863	2,10
Galicia	0,910	332,150	2.750.985	913.740	4,02
Madrid (Comunidad de)	1,567	571,955	5.804.829	3.320.101	14,60
Murcia (Región de)	1,200	438,000	1.294.694	567.076	2,50
Navarra (Com. Foral de)	1,280	467,200	584.734	273.188	1,20
País Vasco	1,396	509,540	2.115.279	1.077.819	4,74
Rioja (La)	1,398	510,270	293.553	149.791	0,66
Ceuta	1,549	565,385	74.654	42.208	0,19
Melilla	1,711	624,515	68.016	42.477	0,19
ESPAÑA	1,437	524,486	43.197.684	22.735.142	100,00

Fuente: II Plan Nacional de Residuos Urbanos. MMA. 2007.

El conocimiento de la composición de los residuos sólidos ha tenido una importancia creciente, concretamente con el desarrollo de los diferentes procesos de valorización. La **tabla II** muestra la composición porcentual en peso de la naturaleza de los constituyentes de los RU en España

Tabla II: Composición de los RU (%) en España

Materiales	Media Ponderada sobre Total Nacional
Materia Orgánica	44,0
Papel y Cartón	21,0
Plásticos	10,6
Vidrio	7,0
Metales férricos	3,4
Metales no férricos	0,7
Madera	1,0
Otros	12,3

Fuente: II Plan Nacional de Residuos Urbanos. MMA. 2007.

Como se puede observar, la materia orgánica, con un porcentaje próximo al 50%, es el componente mayoritario de los RU.

2.2. RESIDUOS GANADEROS

La ganadería, en su concepto básico más simple, podríamos definirla como la agrupación de especies animales que han sido domesticadas por el hombre con el fin primordial de utilizar mejor sus productos.

Desde el punto de vista medioambiental, hasta hace relativamente pocos años, la ganadería no podía decirse que ocasionase ningún problema importante de contaminación. Sin embargo, en los últimos años, en un espacio de tiempo corto, se ha pasado de las explotaciones tradicionales extensivas a las explotaciones intensivas debido a las exigencias del mercado, es decir, al gran consumo de productos, lo que implica una masificación de animales y una selección genética muy fuerte. Estas circunstancias han provocado que los residuos de las explotaciones ganaderas, consideradas antiguamente como subproductos de aplicación agrícola, constituyan en la actualidad y cada vez con mayor incidencia, un serio problema medioambiental, por su fuerte carga contaminante y los grandes volúmenes generados en torno a los núcleos productores.

Las especies ganaderas más importantes en España son la porcina, bovina, avícola y ovina, siendo por tanto las que mayor cantidad de residuos producen. Dentro de éstas destacan principalmente la porcina y la bovina por ser consideradas más contaminantes, fundamentalmente por su mayor volumen y su carácter intensivo. El 90% y 55% de las ganaderías porcinas y bovinas españolas, respectivamente son intensivas. La **tabla III** recoge la producción global de residuos ganaderos en España.

Tabla III: Producción global de residuos ganaderos en España.

Comunidades Autónomas	Sector Bovino	Sector Ovino	Sector Caprino	Sector Porcino	Sector Equino	Sector Avícola	Sector Cunicola	Prod. Tot t/d
Andalucía	14.595	2.505	1.163	4.375	1.305	1.240	152	25.335
Aragón	3.526	4.460	65	8.323	132	648	130	17.283
Asturias	12.228	41	27	343	332	167	9	13.147
Baleares	1.430	386	12	175	162	335	135	2.635
Canarias	830	17	139	220	59	530	51	1.846
Cantabria	7.889	70	35	254	320	94	36	8.697
Castilla La Mancha	6.042	4.913	698	2.876	339	948	63	15.879
Castilla y León	29.131	6.057	351	13.273	1.022	1.601	221	51.656
Cataluña	11.132	1.073	78	15.611	231	3.879	1.157	33.162
Extremadura	9.242	3.592	562	2.919	585	127	18	17.044
Galicia	34.776	361	131	5.790	875	2.258	545	44.736
Madrid	1.885	172	27	267	72	214	9	2.646
Murcia	757	316	55	4.330	74	210	18	5.760
Navarra	1.924	548	17	291	87	165	20	3.051
País Vasco	5.297	378	34	285	284	328	81	6.688
La Rioja	1.117	343	31	462	104	174	7	2.238
C. Valenciana	1.064	718	120	3.133	189	1.045	108	6.378
Total (t/d)	142.864	25.948	3.545	62.925	6.172	13.864	2.760	258.179
Total (miles t/a)	52.145	9.471	1.294	22.968	2.253	5.097	1.008	94.235

2.3. RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Los residuos biodegradables de origen industrial se identifican habitualmente con las aguas residuales de origen agroalimentario que, para su depuración, son tratadas por procesos biológicos. Existen, además, otros vertidos industriales, tales como los procedentes de factorías de papel, que según el tipo de proceso industrial que las genera, pueden ser tratadas biológicamente.

A continuación se recogen valores aproximados, ya que depende del proceso industrial, de algunos parámetros de contaminación orgánica de las industrias más importantes:

Almazaras:	DQO.....	70-90 g/l
	DBO ₅	50-70 g/l
Destilerías:	DQO	40-60 g/l
Papelera:	DQO.....	80-110 g/l
Industria quesera:	DQO.....	50-70 g/l
	Fábrica de levaduras :	DQO.....
Azucareras:	DBO ₅	12-14 g/l
	DQO.....	7-9 g/l
Cerveceras:	DBO ₅	4-6 g/l
	DQO.....	3-5 g/l
Industrias conservas vegetales:	DBO ₅	1-3 g/l
	DQO.....	0,2-3 g/l
Industrias conserveras de pescado	DQO.....	40-50 g/l (aguas de cocedero)
Mataderos:	DQO.....	2-3 g/l
	DBO ₅	0,5-1,5 g/l

2.4. LODOS DE EDAR

Las aguas residuales originadas en los núcleos urbanos son, fundamentalmente, de origen doméstico, existiendo en algunos casos aportes industriales. El volumen de aguas residuales generado por una población se estima en función de la dotación de agua por habitante y día que depende del grado de desarrollo del país y del tamaño de la ciudad. En España, la dotación oscila entre 200 y 400 litros de agua por habitante y día.

Estas aguas son tratadas en estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR) para que, una vez depuradas puedan reutilizarse, consiguiéndose de este modo reducir la contaminación causada por la actividad humana. Estas instalaciones, más o menos complejas, permiten depurar las aguas residuales urbanas sirviéndose de procesos físicos químicos y biológicos, siendo el resultado final de estas diferentes etapas de tratamiento un efluente con calidad adecuada para poder incorporarse a los cauces públicos y la generación de lodos. Se estima que la cantidad generada de lodo es el 1% del caudal de agua tratada con una concentración de sólidos totales de 2% -8%, con un contenido de sólidos volátiles de 60% -80%.

3. LA DIGESTIÓN ANAEROBIA O BIOMETANIZACIÓN

La biometanización o degradación anaerobia es un proceso biológico mediante el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y por medio de un grupo de bacterias específicas (anaerobias), se degrada en una serie de productos gaseosos conocidos como biogás y otros de difícil degradación. Este proceso puede ocurrir de manera forzada en digestores anaerobios o de manera natural en vertederos controlados de RSU.

3.1. ANTECEDENTES

La digestión anaerobia es uno de los procesos más comunes utilizado por la naturaleza para degradar la materia orgánica.

El interés científico del proceso con fines energéticos data del año 1776, cuando Volte identifica la relación que tiene la descomposición de la materia orgánica en un medio en ausencia de oxígeno con la presencia de gas combustible, el cual había sido definido años antes como "gas de los pantanos" por su descubridor, Shirley en 1667.

En 1804 Dalton descubrió la presencia de metano en el gas. Fue Humphry Davy quien en 1808 generó metano en recipientes cerrados de laboratorio, se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación sobre biogás. En 1884 Louis Pasteur cuantificó el metano producido y sugirió utilizarlo para calefacción y alumbrado. Van Senu en 1890 estudió las relaciones entre las actividades de varios microorganismos. Por primera vez en 1896 en Gran Bretaña, el biogás obtenido a partir de lodos de depuradora introducidos en un digestor cerrado fue utilizado para el alumbrado de la calle.

Ya en el siglo XX aparecieron los primeros progresos en investigación y tecnología. En 1906 Soehngen realizó su tesis doctoral sobre "El proceso microbiológico de la digestión anaerobia". Llevó a cabo la demostración de la formación de metano a partir de la reacción entre el hidrógeno y el dióxido de carbono. En 1927 Castellini y otros estudiaron las relaciones simbióticas entre los diversos microorganismos que intervienen en el proceso de producción de metano.

Entre 1927 y 1950, se realizaron diversos trabajos experimentales sobre la producción de gas a partir de residuos ganaderos y, entre 1950 y 1970, hay un incremento en el interés sobre la Digestión Anaerobia. En Alemania se construyó en 1951 un digestor que generó más de 16 millones de m³ de

biogás a partir de lodos de depuradora, que fueron empleados para diferentes usos: 3,4% para producir energía de consumo interno de la planta, 16,7% para la calefacción del digestor, 28,5% se introduce en el sistema suministrador del gas municipal y el 51,4% es convertido en fuel para vehículos a motor. La madurez que va adquiriendo la tecnología a partir de 1950 queda de manifiesto en los siguientes puntos:

- 1.- Reconocimiento de los microorganismos metanogénicos como un conjunto
- 2.- Desarrollo del diseño de diversos digestores
- 3.- Ejecución de digestores en granjas e industrias
- 4.- Comienzo de la explotación del biogás en vertederos

A lo largo de los años vemos como se ha intensificado la investigación básica y aplicada de los sistemas productores de biogás, lo que permite contar en la actualidad, tanto con digestores pequeños y relativamente sencillos, como con modernos digestores de gran capacidad que permiten lograr altas eficacias para aplicaciones agroindustriales.

En el campo de la investigación básica se encuentran a la cabeza de la misma diversos países europeos y Estados Unidos, con investigadores dedicados a estudiar muchos aspectos de la compleja fermentación anaerobia en sus fases ácida y metanogénica, con objeto de poder optimizar los procesos de producción de biogás. Estos países, a su vez, desarrollan investigaciones aplicadas con digestores y vertederos de gran tamaño, equipados con sistemas de control automático, purificación y almacenamiento, y producción de energía, lo que les permite obtener elevadas eficiencias en los mismos.

3.2. ASPECTOS BIOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

La bioquímica y microbiología de los procesos anaerobios son mucho más complicadas que en los procesos aerobios, esto se debe a la existencia de numerosas rutas que puede utilizar una población bacteriana anaerobia para la bioconversión de la materia orgánica.

Las rutas y mecanismos no se conocen al detalle, pero en los últimos años se han descrito amplias líneas de estos procesos.

El mecanismo anaerobio puede representarse como un proceso en tres etapas:

1. Fase de hidrólisis: mediante la cual las macromoléculas orgánicas se descomponen en productos más simples.
2. Fase de Acidogénesis -Acetogénesis: conduce a la formación de ácidos orgánicos y finalmente a ácido acético.
3. Fase de metanogénesis: fase última de producción de metano a partir de ácido acético o de CO_2 y H_2 , producidos de las etapas anteriores.

La Figura 1 recoge el esquema global del proceso de digestión anaerobia.

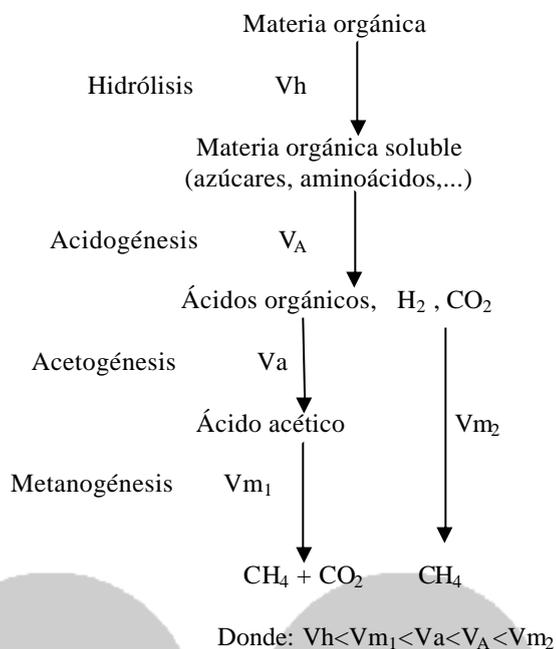


Figura 1: Proceso global de la digestión anaerobia.

3.3. PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES DE CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Todo proyecto requiere una fase inicial de caracterización del residuo a tratar, que debe plantearse con una campaña exhaustiva de análisis y de recopilación de toda aquella información sobre los factores que afecten a las características del residuo. Un residuo se define mediante un conjunto de parámetros físico-químicos que le caracterizan y determinan el tipo de proceso que se debe seguir para su tratamiento. Entre los parámetros más importantes a la hora de seleccionar la tecnología más adecuada podemos destacar:

- *Cantidad de Residuo a tratar*: Se expresa generalmente en $m^3/día$ o $T/día$. Su conocimiento es crítico a la hora de diseñar un proyecto.

- *Temperatura*: todos los procesos biológicos tienen un rango óptimo de temperatura. En función de la temperatura a la que tiene lugar el proceso, éste puede ser Termófilo ($50-55^\circ C$), Mesófilo ($35-37^\circ C$) y Psicrófilo ($15-20^\circ C$). La eficacia del proceso está directamente ligada a la temperatura, es decir, el rango termófilo es el de más eficacia pero el más costoso económicamente. El rango más empleado es el mesófilico.

- *pH*: es imprescindible para caracterizar un residuo, nos informa sobre el tipo de compuestos que puede contener y de posibles reacciones que pueden llevarse a cabo, como precipitación de sales y oxidación de metales. En general, cuando el pH quede fuera del rango 6,5 a 8, que es el apropiado para los procesos biológicos, será necesario corregirlo.

- *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*: La DQO es una medida del contenido total de materia orgánica

en el residuo, sin distinguir entre la materia asimilable por los microorganismos y la no-asimilable. El procedimiento que generalmente se utiliza para su determinación es la oxidación con dicromato potásico en medio ácido y posterior valoración con sulfato ferroso amónico (sal de Mohr).

- *Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)*: Es la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos para asimilar la materia orgánica presente en el residuo. La DBO informa sobre el contenido en materiales asimilables bioquímicamente. La determinación de la DBO se basa en la oxidación bioquímica de la materia orgánica, que es una reacción lenta. Así, a 20°C, al cabo de 20 días, se ha completado en un 95-99%. A efectos operativos, una determinación analítica que dure 20 días supone un período excesivamente largo, por ello se ha adoptado el criterio general de realizar la DBO₅, es decir, la medida del oxígeno consumido al cabo de 5 días a 20°C.

La diferencia entre DBO y DQO radica en el tipo de compuestos determinados en cada caso. El valor de DQO siempre es mayor puesto que engloba todos los compuestos oxidables mientras que la DBO corresponde a la fracción de estos compuestos que son asimilables por los microorganismos.

- *Sólidos*: Su naturaleza y contenido definen físicamente a un residuo e influyen en gran medida en la selección del proceso de tratamiento y de los equipos. El contenido en sólidos suspendidos, su tamaño, dureza y composición química, afectan a la biodegradabilidad, abrasividad y fluidez del residuo.

- *Nitrógeno*: Este elemento se encuentra formando parte de la materia orgánica como nitrógeno amoniacal y como nitrato. La importancia del nitrógeno se debe a su carácter de elemento esencial para la nutrición de los microorganismos responsables de los procesos biológicos.

- *Fósforo*: Aunque en menor medida que el nitrógeno, el fósforo también es un elemento esencial para el desarrollo de los microorganismos. En algunos casos puntuales es necesario añadir fósforo a un residuo para que pueda sufrir una bioconversión.

- *Azufre*: La determinación del contenido en sulfatos es necesaria cuando se requiere prever la formación de ácido sulfhídrico en el gas de digestión. Dicha determinación consiste en una turbidimetría, añadiendo una sal de bario a la muestra.

- *Compuestos inhibidores*: Son todos aquellos que afectan negativamente a los procesos biológicos, impidiendo o ralentizando las reacciones. Su naturaleza es muy variada. Pueden ser compuestos orgánicos que aparecen como consecuencia del proceso generador del residuo, como es el caso de detergentes, pesticidas, antibióticos, etc. También puede existir inhibición causada por metales pesados o por concentraciones elevadas de elementos que en sí no son tóxicos, como el sodio o el nitrógeno, cuando se encuentra en forma amoniacal.

4. EL BIOGAS

Biogás es el nombre genérico de los gases producidos como consecuencia de la degradación anaerobia o biometanización de los residuos orgánicos, con independencia de la materia prima y la técnica empleada. Está constituido principalmente por metano y dióxido de carbono (Figura 2). Su composición media es la siguiente (% en vol): 55-65% de CH₄, 30-40% de CO₂, <5% de H₂, H₂S, H₂O,...

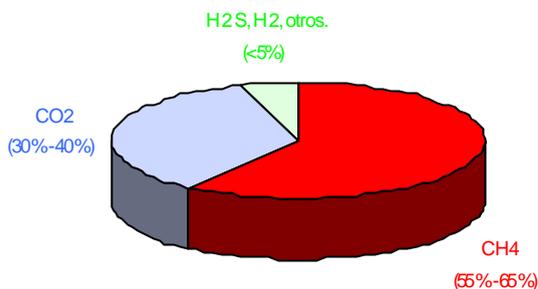


Figura 2: Composición media del biogás

El biogás generado en los vertederos de RSU, debido a la variabilidad de la materia orgánica de estos residuos, contiene además otros muchos gases que están presentes en mínimas cantidades dependiendo de la composición de los residuos, la edad del vertedero, las condiciones del lugar, la gestión del vertedero y la presencia de un sistema de recogida del biogás como son: compuestos organoclorados, mercaptanos, hidrocarburos, etc.

La densidad del biogás es de 1,2 Kg./m³, por tanto es menos denso que el aire, y su temperatura de inflamación es de 600°C. La propiedad más interesante del biogás es su valor energético debido a su elevado contenido de metano. El poder calorífico inferior (Pci) de un biogás con un contenido de metano del 60% es de 5.500 kcal/m³N.

4.1. EQUIVALENCIAS DEL BIOGAS CON OTROS COMBUSTIBLES

En cuanto a su utilización, la Figura 3 muestra algunas equivalencias del biogás con otras fuentes de energía.

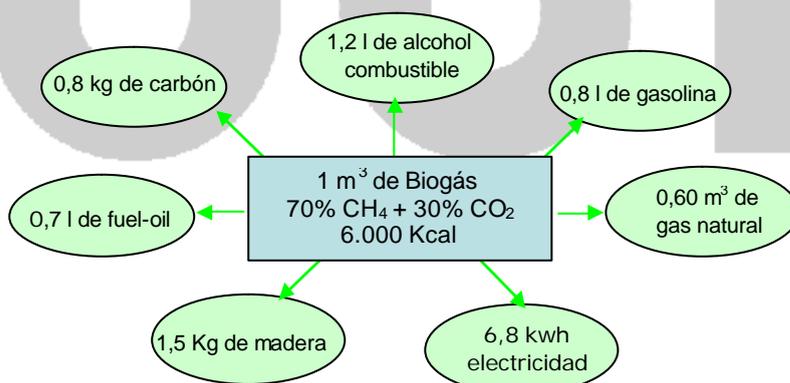


Figura 3: Equivalencias del biogás con otras fuentes de energía.

4.2. UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS

4.2.1. Motores

Cuando existe una producción de biogás importante, del orden de la generada en los vertederos, resulta interesante económicamente su utilización en motores de combustión interna para producir electricidad. Estos motores están especialmente adaptados para quemar un gas de las especiales condiciones de éste, con un bajo poder calorífico y una composición química que se separa de la habitual en combustibles similares como el gas natural. Los motores son muy valiosos, por lo que hay que extremar las precauciones respecto a la presencia de compuestos que pudieran dañarlos como el ácido sulfhídrico o los siloxanos.

El biogás tiene un número de octanos elevado (del orden de N.O.= 110), por lo que se puede aplicar a motores con elevada relación de compresión, alrededor de 9-10: 1 con motores Otto y de 15-16: 1 en motores Diesel.

También se tiende a aprovechar la energía térmica producida en los motores mediante intercambiadores de calor en el sistema de refrigeración y a la salida de los gases de escape. De este modo es posible recuperar un 45-60% de la energía total en forma de calor que se aprovecha para otros usos.

4.2.2. Quemadores

La combustión de biogás para uso térmico es actualmente menos frecuente que la aplicación eléctrica, y se concentra sobre todo en las instalaciones de producción de biogás a partir de residuos industriales biodegradables. Este calor suele ser empleado para la calefacción del digestor, que debe ser mantenido en un rango de temperatura determinado, y para otros usos dentro de la planta industrial o, en su caso, para la exportación a otras industrias, aspecto poco frecuente en nuestro país.

Es bastante sencillo adaptar quemadores de tipo comercial para funcionar con biogás. Los equipos comerciales de gas ciudad son aptos para ser utilizados con biogás garantizando la presión de entrada mencionada.

4.2.3. Otros usos

Hay otros usos pero todos son poco frecuentes. Podemos citar, por ejemplo, iluminación, cocina, instalaciones de refrigeración y vehículos. En este último caso se utilizan botellas de biogás a 200 bar de presión. El problema que presentan, aparte del coste económico y energético de comprimir el biogás a presiones tan elevadas, es que al principio sale prácticamente el CH₄ puro por haberse licuado el CO₂ y al final casi únicamente el CO₂. Para aplicaciones a presiones tan elevadas debería eliminarse previamente el CO₂ (se puede llevar a cabo haciendo burbujear el biogás a través de una solución de yeso o hidróxido cálcico). Estas botellas tienen normalmente una capacidad de 50l y pesan 65 kg, pudiendo almacenar hasta un máximo de 10 m³ de biogás, equivalentes a 6,2 l de gasóleo.

Cada vez está teniendo mayor importancia en países europeos su uso como combustible en automoción. En este sentido, en España se están estudiando diversos proyectos para este uso, estando en estado avanzado un proyecto para la utilización de biogás en autobuses de Madrid.

4.3. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE BIOGÁS EN ESPAÑA

Tomando como punto de partida el objetivo energético recogido en el Libro Blanco de la Comisión Europea, y a partir del compromiso asumido en la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, se elaboró el Plan de Fomento de las Energías Renovables, que fue aprobado por el Consejo de Ministros el 30 de diciembre de 1999, y en el que se definió el objetivo de desarrollo de cada área de energía renovable para cubrir, entre otras, al menos el 12% del consumo nacional en términos de energía primaria en 2010.

El consumo de biogás en España ascendió a finales de 2004 a 266,7 ktep. Este dato culmina una evolución que ha llevado al sector a triplicar su aportación al balance energético nacional desde 1998, y que le ha permitido superar en fecha tan temprana como finales de 2003 los objetivos establecidos por el Plan de Fomento de las Energías Renovables para 2010 (Figura 4).

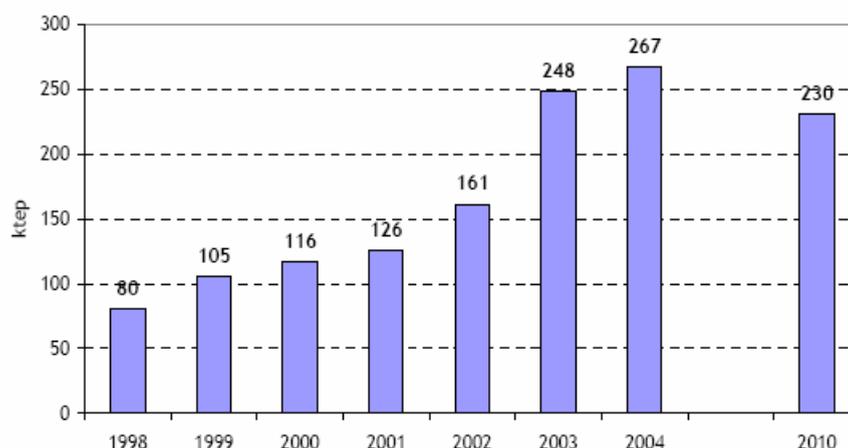


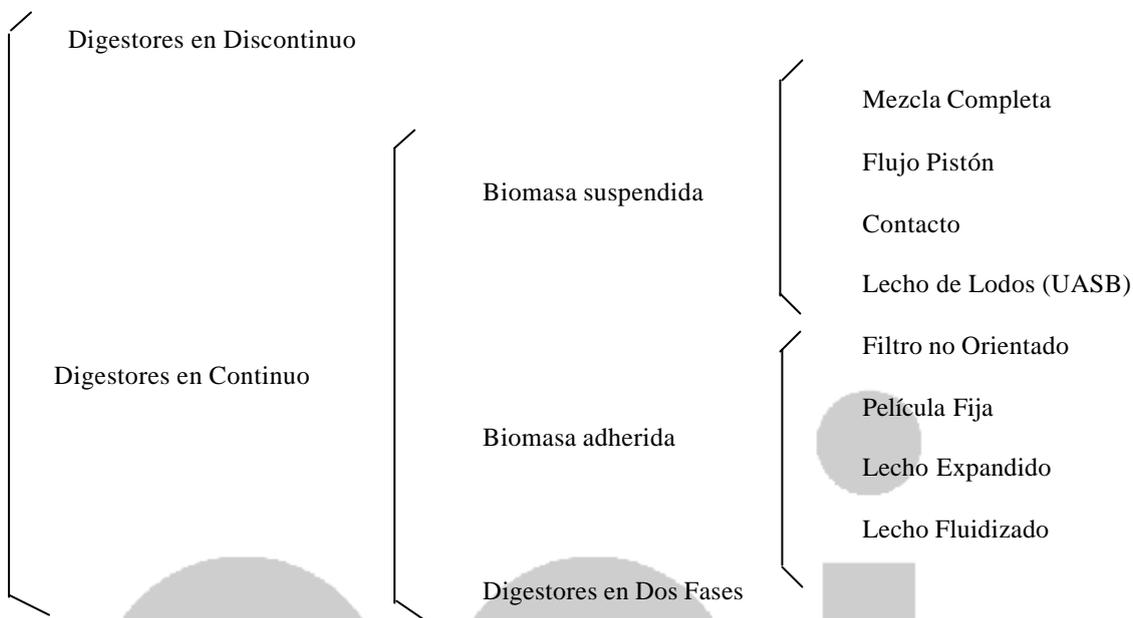
Figura 4: Evolución del consumo de biogás y previsiones en el marco del Plan de Fomento, en términos de energía primaria. (Fuente: IDEA).

5. TECNOLOGÍAS DE LOS DIGESTORES ANAEROBIOS

La transformación en energía de los residuos orgánicos mediante la fermentación anaerobia es un proceso que se viene practicando desde hace más de 100 años y actualmente, en países no desarrollados hay instalados millones de digestores familiares (China e India). Sin embargo, la tecnología utilizada en estos países es muy primitiva y no se puede aplicar en países desarrollados por su bajo rendimiento y el negativo impacto ambiental que producen.

El conocimiento más profundo del proceso, tanto en el ámbito microbiológico como de los parámetros que regulan esta fermentación ha permitido progresar notablemente en esta tecnología mejorando considerablemente su eficacia. Existe en la actualidad un gran número de tecnologías adaptadas al tratamiento de los residuos por digestión anaerobia. La elección de una u otra depende sobre todo de las características del vertido a tratar.

La tecnología de los digestores se puede definir por el sistema de carga y por el estado de la biomasa bacteriana dentro del digestor, tal y como se muestra en el siguiente esquema:



Así, según se lleve a cabo el proceso se puede hacer una primera división en: Digestores Discontinuos y Continuos.

5.1. DIGESTORES EN DISCONTINUO

En estos digestores la carga se realiza de forma discontinua es decir, una vez finalizada la fermentación es preciso descargar el digestor y volverlo a cargar nuevamente con residuo fresco. La eficacia del proceso es baja y el biogás que se produce es de forma intermitente lo que también dificulta su utilización.

Suele emplearse prácticamente sólo para residuos sólidos y se utiliza más en países poco desarrollados. El esquema del proceso queda recogido en la Figura 5.

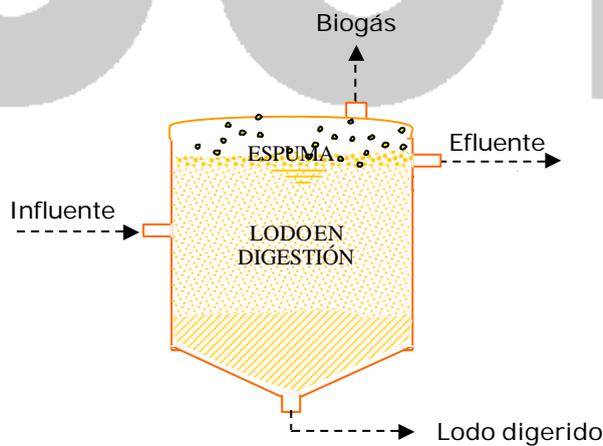


Figura 5: Esquema de un Digestor Discontinuo

5.2. DIGESTORES EN CONTINUO

Al no existir paradas de carga y descarga tienen un rendimiento mucho mayor que los digestores discontinuos. Este sistema ha sido el que más se ha estudiado en los últimos años desarrollándose a su vez nuevas tecnologías. En este sentido, atendiendo al mecanismo de retención de la biomasa en los digestores, éstos se pueden clasificar en:

- Sistemas con microorganismos en suspensión
- Sistemas con microorganismos adheridos a superficies fijas o móviles.

Estos digestores son los que primero se desarrollaron, en ellos los microorganismos se encuentran "flotando" es decir, no están fijados a ninguna superficie. A su vez, se pueden clasificar de menor a mayor grado de complejidad técnica en digestores de:

- Mezcla completa
- Flujo pistón
- Contacto anaerobio
- Lecho expandido de lodos (UASB)

5.2.1. Digestores con biomasa suspendida

5.2.1.1. Mezcla Completa

Los digestores de Mezcla Completa son técnicamente sencillos. No hay retención de la biomasa suspendida lo que supone que sus tiempos de retención de sólidos sean iguales a sus tiempos de retención hidráulica (TRH) y por tanto éstos han de ser altos (10-30 días). Las concentraciones de biomasa activa (anaerobia) que se pueden conseguir son limitadas lo que supone que las cargas volumétricas y las producciones de gas de estos reactores sean bajas. Se emplean principalmente para vertidos con alta concentración de sólidos en suspensión como, por ejemplo, residuos ganaderos y lodos de depuradoras.

Para mezclar el contenido del digestor y para romper o evitar las costras que pueden formarse se utilizan agitadores mecánicos y/o una recirculación de biogás. Los segundos tienen la ventaja de que no necesitan abrir el digestor para el mantenimiento.

Un esquema de un digestor de estas características se recoge en la Figura 6.

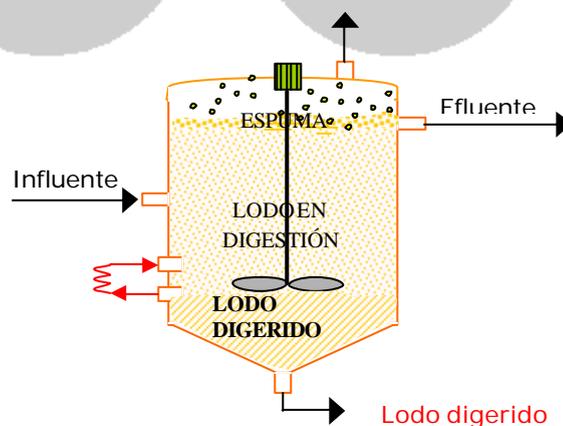


Figura 6: Esquema de un Digestor Mezcla Completa

5.2.1.2. Flujo Pistón

Este tipo de digester se emplea para el tratamiento de vertidos de ganadería es decir, aquellos residuos que contienen ya un inóculo de microorganismos anaerobios (Figura 7).

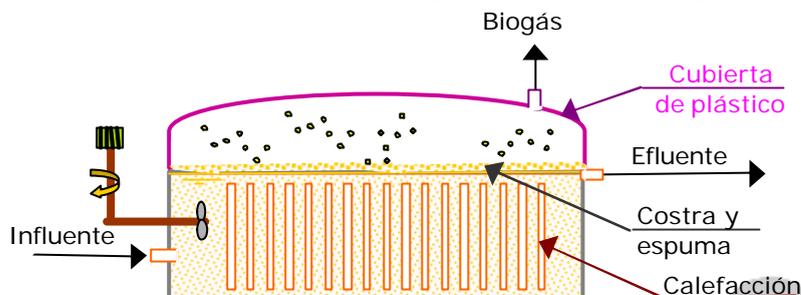


Figura 7: Esquema de un Digestor Flujo Pistón

Los digestores están constituidos por canales excavados en el terreno, cubiertos generalmente con plástico, que sirve a la vez como depósito del biogás y como aislamiento térmico. En estos digestores existe un flujo horizontal de las sustancias dentro del digester, por medio de agitación mecánica lateral o de inyección. Los tiempos de residencia hidráulica son similares a los de mezcla completa. Un problema típico de estos digestores es la formación de espuma y de costras que dificulta el desprendimiento del gas y la degradación de los sólidos en suspensión.

5.2.1.3. Contacto

En los digestores tipo Contacto existe una separación y recirculación de lodos en el efluente por medio de un decantador con lo que aumenta la concentración de biomasa (sólidos) en el digester, disminuye por tanto el TRH (2 a 6 días) y aumenta la eficacia del proceso (el tiempo de residencia del sólido es superior al hidráulico). Estos digestores, por lo tanto, pueden trabajar con cargas más altas que las vistas sin recirculación obteniendo a su vez producciones más altas de biogás (Figura 8). Se emplea principalmente para el tratamiento de residuos de industrias agroalimentarias (azucareras, papeleras,...).

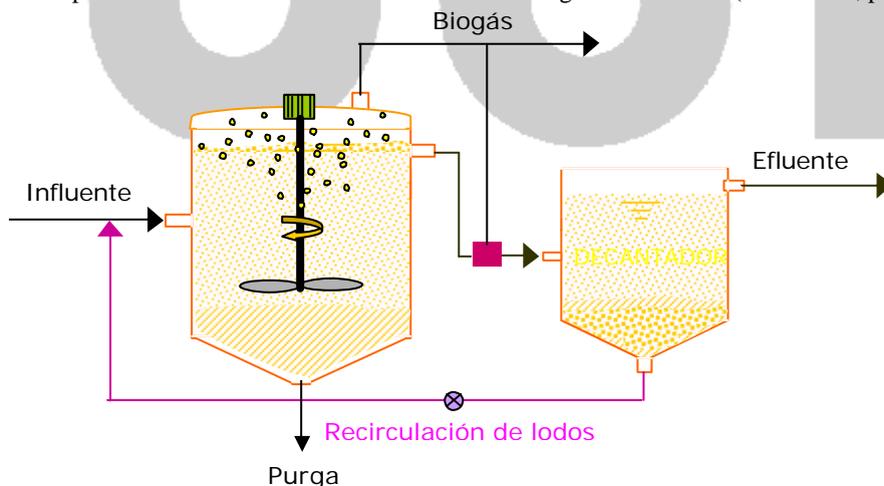


Figura 8: Esquema de un Digestor Contacto

5.2.1.4. Lecho expandido de lodos o UASB

La tecnología de lecho expandido de lodos está basada en la acumulación de microorganismos en un reactor con decantación interna. El agua a tratar entra repartida por toda la superficie inferior del digestor y atraviesa en flujo ascendente un lecho de partículas bacterianas agregadas mantenidas en expansión por el gas producido (Figura 9).

Los principales requisitos que deben reunir ese tipo de digestor son lodos con buenas características de sedimentabilidad, dispositivo de separación gas-líquido y un sistema que uniformice la entrada del influente en la base del reactor. Los mecanismos de formación de gránulos de alta densidad que se encuentran en los reactores UASB pueden ser biológicos o físico-químicos. En el primer caso se seleccionan bacterias que granulan y en el segundo se utilizan precipitantes (sulfuros, carbonatos) para arrastrar las bacterias. Se emplean para residuos de industrias agroalimentarias (patatera, azucarera, pasta de papel). El tiempo de residencia hidráulica para estos digestores es de 1-2 días. Se pueden conseguir cargas volumétricas mayores que en el proceso de contacto (del orden de 10-20 kg DQO/m³d).

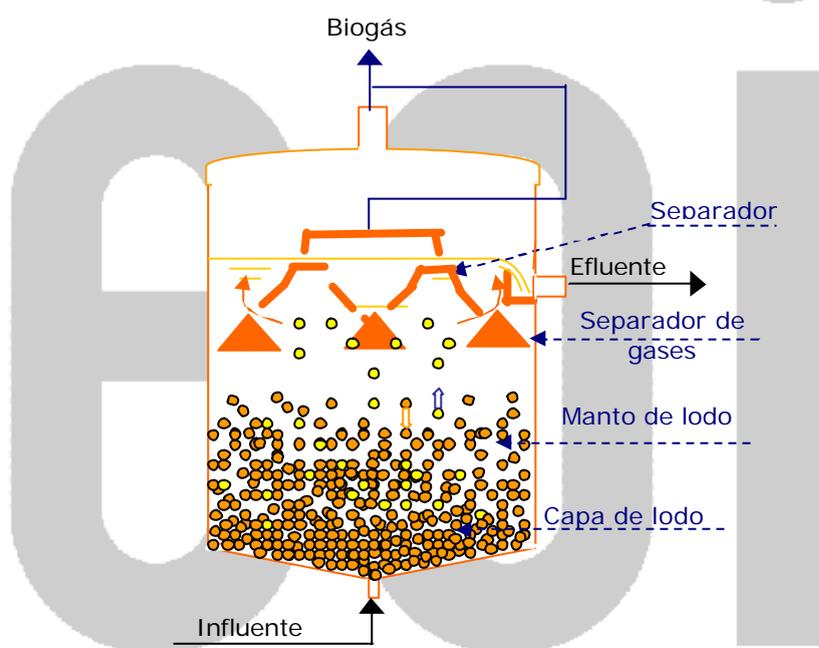


Figura 9: Esquema de un Digestor UASB (upflow anaerobic sludge blanket).

5.2.2. Digestores con biomasa adherida

Se caracterizan porque la biomasa es retenida en el interior del digestor mediante su adhesión a un soporte inerte que rellena el digestor y a través del cual se hace pasar agua residual para su depuración. Dependiendo de si el relleno está fijo o no se pueden clasificar en:

5.2.2.1. Biomasa adherida a superficies fijas

Dentro de éstos podemos diferenciar:

- . Filtros No Orientados
- . Filtros Orientados o de Película Fija

La diferencia entre ellos se basa en la colocación del soporte inerte en el interior del digestor, es decir, de si éste está o no orientado. Los digestores de Filtro No Orientado (Figura 10) suelen ser de flujo ascendente, tienen la entrada del influente por la parte inferior del digestor, lo que permite una mejor retención de los microorganismos, sin embargo a veces presentan problemas de colmatación y de caminos preferenciales.

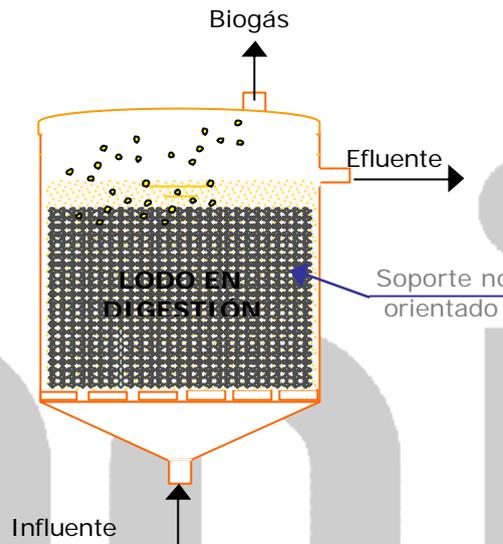


Figura 10: Esquema de un Digestor Filtro No Orientado

Los de Película Fija suelen ser de flujo descendente (Figura 11).

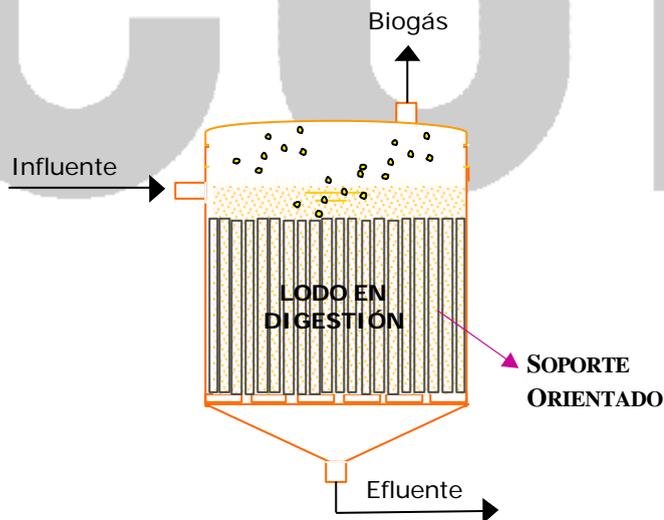


Figura 11: Esquema de un Digestor de Película Fija

El relleno ha de tener gran porosidad y una superficie específica de 100-200 m²/m³, además ha de ser de un material ligero y barato. Aunque no consiguen cargas muy elevadas (5-15 Kg DQO/m³.d) son reactores muy estables. Los tiempos de residencia hidráulica son similares a los de tecnología UASB, oscilan entre 0,5 y 3 días.

5.2.2.2. Biomasa adherida a superficies móviles

En estos digestores las bacterias colonizan partículas de material inerte (arena, plástico, etc.) de pequeño tamaño, formando un lecho a través del cual circula el fluido con una velocidad lo suficientemente elevada como para provocar una expansión o fluidización (Figura 12), según sea de una forma o de otra estos digestores, a su vez, se dividen en:

- *Lecho expandido*: Se considera de lecho expandido cuando se logra una expansión del orden del 20%.
- *Lecho fluidizado*: En este caso la expansión puede alcanzar el 100%. Para lograr estas elevadas velocidades de flujo suele ser necesario recircular parte del efluente.

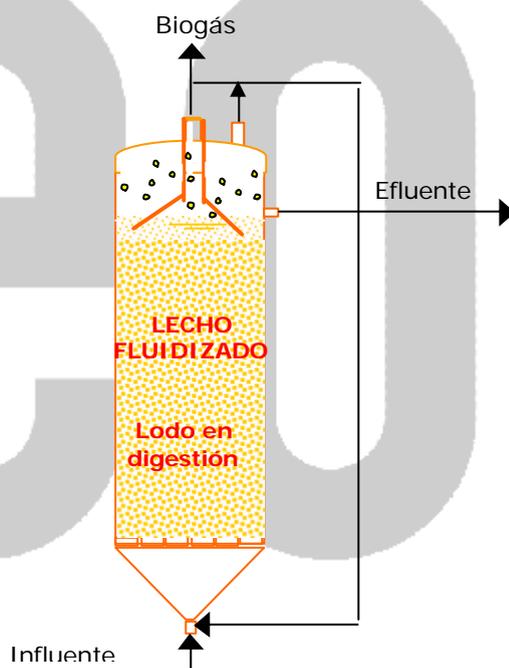


Figura 12: Esquema de un Digestor de Lecho Fluidizado

La superficie específica por unidad de volumen de las partículas es muy elevada, oscilando entre 1000 y 4000 m²/m³. Estas tecnologías pueden soportar cargas elevadas (10-40 Kg DQO/m³.d) y emplean unos tiempos de residencia hidráulica de 0,3-1 días.

5.2.3. Digestor de Dos Fases

Como ya se ha hecho referencia, el proceso de digestión anaerobia tiene lugar en varias etapas. En cada una de ellas intervienen diferentes tipos de microorganismos con características metabólicas diferentes.

El digestor en dos fases (Figura 13) está constituido por dos digestores en cada uno de los cuales se realiza una parte del proceso fermentativo. Esta separación de fases es muy interesante cuando las condiciones ambientales óptimas de las diferentes poblaciones bacterianas que intervienen en el proceso no son las mismas, de esta forma se pueden favorecer ambas por separado.

Se han realizado experiencias separando la fase acidogénica y la metanogénica y también realizando la hidrólisis en un digestor y, la acidogénesis y metanogénesis en el otro. Sin embargo, estas ventajas de los sistemas de dos fases son parcialmente compensados por una mayor complicación de la planta además, las interrelaciones que existen entre los microorganismos de las diferentes fases acidogénica y metanogénica hacen que el hecho de que estén separadas puede producir situaciones desfavorables en el sistema.

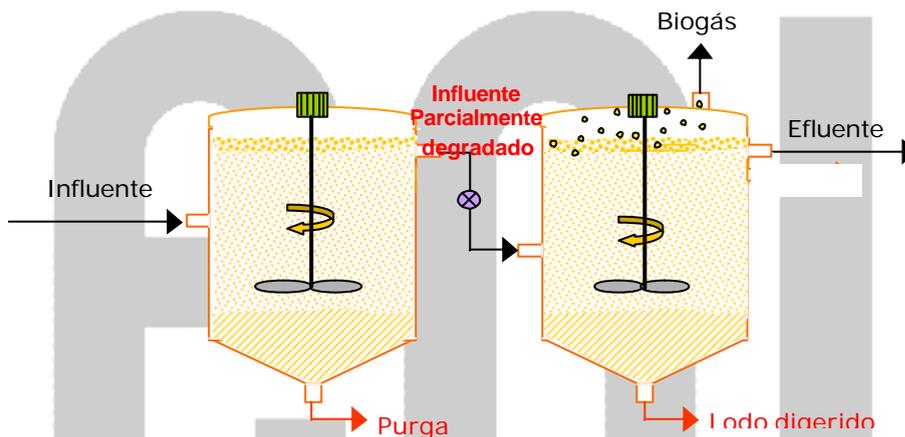


Figura 13: Esquema de un Digestor de Dos Fases.

5.3. APLICACIONES DE LOS DIGESTORES ANAEROBIOS

Los digestores anaerobios se han venido aplicando a una gran diversidad de residuos orgánicos y que agrupamos en tres grandes grupos:

- Residuos ganaderos
- Efluentes industriales con carga orgánica
- Lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR)
- Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)

La Figura 14 recoge un esquema de las aplicaciones y productos obtenidos en el proceso de digestión anaerobia.

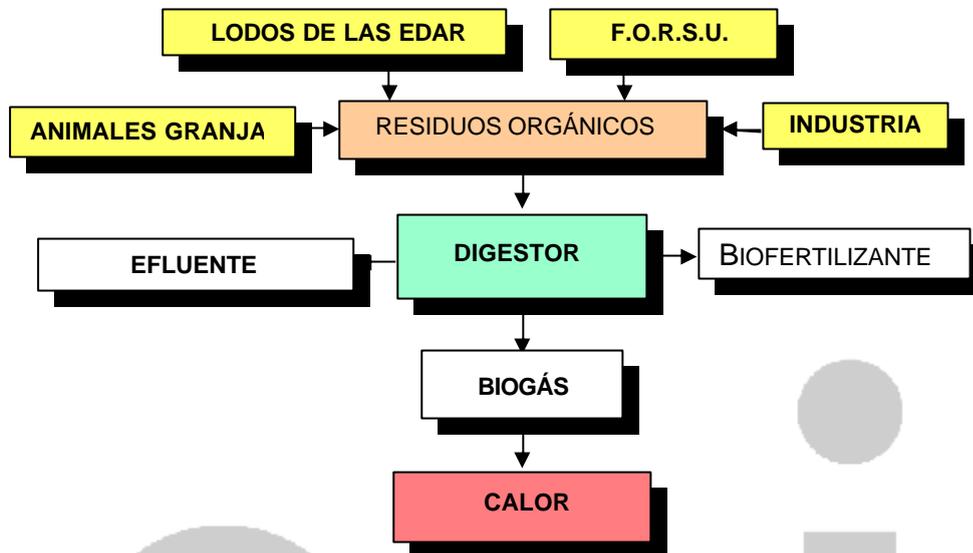


Figura 14: Aplicaciones y productos del proceso de Digestión Anaerobia

5.4. SITUACIÓN ACTUAL

La aplicación de procesos de digestión anaerobia en residuos ganaderos sólo es posible energéticamente a partir de una elevada concentración de cabezas de ganado en explotaciones intensivas. El nivel de aprovechamiento actual de estos residuos puede considerarse bajo.

El biogás producido a partir de la fracción orgánica de los RSU en digestores anaerobios tiene una aplicación energética creciente como lo demuestra el hecho de la creación de 25 plantas en los últimos cuatro años.

Con respecto a los residuos de instalaciones industriales y, sobre todo, de los lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas, un apreciable grado de aplicación se presenta ya en el biogás producido a partir de estos residuos.

6. VERTEDEROS CONTROLADOS DE RSU

El concepto de vertedero controlado apareció describiendo una operación de “cortar y cubrir” utilizada para los residuos depositados en California, en los años 30. En Europa esta técnica fue introducida en Bradfor (Inglaterra) en 1935, poco después en Francia, y en España después de 1945. Con el tiempo este sistema se ha ido perfeccionando y en los últimos años han tenido lugar considerables avances científicos y técnicos, tanto en el conocimiento del proceso de descomposición que sufren los residuos depositados, como en la realización de obras de ingeniería adecuadas y de la maquinaria empleada.

En un vertedero controlado los residuos urbanos se descargan sobre el terreno y se extienden formando capas de poco espesor. A continuación se compactan para reducir su volumen y se cubren con

materiales adecuados para minimizar los riesgos de contaminación ambiental y favorecer las transformaciones biológicas de los materiales fermentables. Estas capas se limitan por taludes, al objeto de que las lluvias no las arrastren, operándose sobre un frente limitado con el fin de limitar los taludes descubiertos.

De forma general se puede admitir que un vertedero controlado se comporta como un digestor anaerobio que, a través de una serie de procesos fisicoquímicos y principalmente microbiológicos (fermentación anaerobia) que tienen lugar en el interior de las plataformas de vertido, da como resultado la aparición de una mezcla de gases o "biogás" y un líquido con una elevada carga orgánica y por consiguiente con alto poder contaminante a la vez que maloliente conocido como "lixiviado".

Cuando un vertedero ha completado su capacidad para recibir residuos debe procederse a su clausura y sellado que deben estar especificados en el proyecto inicial. Deben contemplarse sistemas de control y seguimiento ambiental (control de gases, control y tratamiento de lixiviados,...) y acondicionar el espacio que ocupa para darle el uso final que se haya previsto en la fase de planificación.

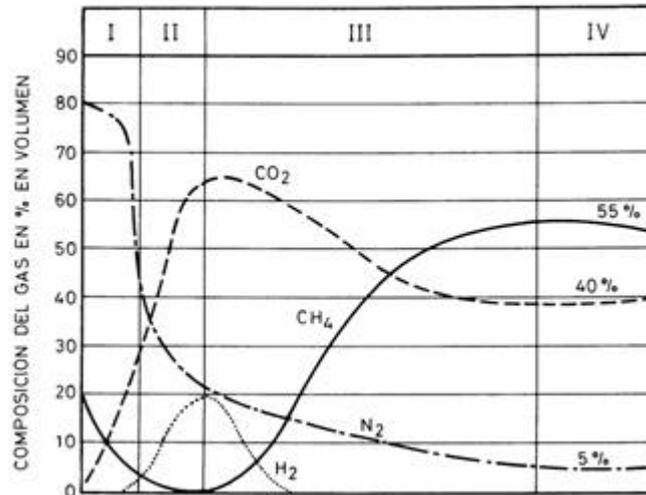
A pesar de su simplicidad, lo cual constituye una de sus ventajas, el vertido controlado no admite los actos improvisados. Debe contemplarse como una obra de ingeniería, y como tal exige un proyecto concreto que, basado en estudios adecuados, permita la selección apropiada de la solución más conveniente. Un vertedero se considera controlado cuando se toman todas las medidas oportunas para evitar todo lo que sea nocivo o molesto al medio ambiente.

En la actualidad, según datos del Ministerio de Medio Ambiente, el vertedero controlado, con 195 centros de tratamiento y más de 11 millones de toneladas tratadas al año, es el sistema de tratamiento aplicado a los RU más empleado en España.

6.1. ETAPAS DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE BIOGÁS EN UN VERTEDERO

El proceso de formación de gases en un vertedero tiene lugar a través de cuatro etapas que quedan recogidas en la Figura 15. Las características de estas etapas son las siguientes:

1. Fase aerobia: Es la fase inmediata al vertido, 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.
2. Primera fase anaerobia (ausencia de metano): Esta etapa se caracteriza por la ausencia de aire, es una fase anaeróbica donde se produce la formación de ácidos de fermentación y al final de la misma se alcanza la mayor concentración de CO_2 , la aparición de H_2 y el descenso de la proporción de N_2 . Su duración es aproximadamente de 2 meses.
3. Segunda fase anaerobia (formación y aumento de metano): Es una fase anaeróbica donde se produce el comienzo de la aparición de metano y el descenso de los demás productos. Se estima que tiene una duración de 2 años.
4. Tercera fase anaeróbica o de estabilización: tiene una duración de entre 10 y 20 años, dependiendo de las condiciones del vertedero. Se caracteriza por mantener las concentraciones de CH_4 y CO_2 en torno al 60 y 40% respectivamente.



Fase I: Aerobia
Fase II: Anaerobia (ausencia de CH₄)
Fase III: Anaerobia (formación en aumento de CH₄)
Fase IV: Anaerobia (estabilización de CH₄)

Figura 15: Proceso de formación de gases en un vertedero.

6.2. CONVENIENCIAS DE LA EXTRACCIÓN DEL BIOGÁS

La extracción del biogás se considera necesaria desde el punto de vista medioambiental y en muchos casos también desde el punto de vista energético. Estos gases generados se desplazan por la masa de vertido, alcanzan la superficie y fluyen al exterior, por tanto desde el punto de vista medioambiental es importante su extracción, ya que:

- Se eliminan compuestos que contribuyen de manera importante al efecto invernadero. El hecho de que el biogás esté constituido principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), dos gases con importante efecto invernadero, hace que su captación evite la liberación de estos compuestos a la atmósfera y, por tanto, disminuya de manera importante su contribución a dicho problema ambiental.
- Se eliminan posibles riesgos de explosiones (ya ocurridas en algunos vertederos) al alcanzar concentraciones críticas determinados gases que lo componen (CH₄ en este caso) al ser reactivos con el oxígeno del aire en determinadas proporciones
- Se evitan posibles riesgos de incendios, sobre todo en días donde se alcanzan elevadas temperaturas.
- Se eliminan posibles daños en la vegetación de la zona, ya que el biogás desplaza al aire del suelo e impide el correcto desarrollo de las plantas (no se debe plantar en la superficie de un vertedero si previamente no ha sido desgasificado).
- Se evitan olores desagradables, debido a la presencia en el biogás de compuestos que, si bien están presentes en pequeñas proporciones, tienen el inconveniente de ser extremadamente malolientes, tal es el caso del ácido sulfhídrico y los mercaptanos principalmente.
- Se evitan posibles riesgos de reducción de la concentración de ozono. El posible contenido

en hidrocarburos clorados y fluorados (freones) del biogás plantea un problema específico. Estos compuestos están contenidos en los botes de spray y pueden escapar al exterior cuando los envases de metal se hayan corroído. Debido a su estabilidad química, especialmente los hidrocarburos fluorados, alcanzan la estratosfera donde el átomo de cloro se separa y el radical provoca la ruptura de la molécula de ozono.

Desde el punto de vista energético también puede ser interesante su recuperación, ya que la extracción de este biogás puede constituir un potencial de energía.

6.3. EXTRACCIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS DE VERTEDERO

Un modo de reducir las molestias y riesgos relacionados con las emisiones de gas es proceder a extraerlo. Esto se consigue realizando en la plataforma de vertido un sistema de pozos a los que se les une un sistema de tuberías para transportar el gas al sitio donde pueda ser procesado.

Dependiendo de si la instalación del sistema de extracción se ha realizado durante la explotación del vertedero o después, el gas producido se podrá extraer en mayor o menor cantidad. Una vez depositado el residuo, durante los primeros años se va a producir una mayor cantidad de gas por unidad de volumen.

Existen diferentes tipos de sistemas de extracción, la extracción pasiva se aplica cuando el gas puede fluir por su propia presión al lugar donde se procesa. La diferencia de presión entre la plataforma de vertido y la atmósfera suministra la fuerza motriz para el flujo de gas. En la mayoría de los casos, con una extracción pasiva no se pueden evitar totalmente las emisiones incontroladas a la atmósfera.

La extracción activa de gas tiene una mayor eficiencia en la reducción de las emisiones de biogás de vertedero. En este caso se mantiene una sobrepresión en el sistema de extracción, por lo que el gas producido en la plataforma de vertido es arrastrado hacia los pozos de gas. Los más utilizados son los pozos verticales, perforados y enterrados en la plataforma de vertido. También se emplean pozos horizontales, pero son menos frecuentes.

Básicamente, la infraestructura de extracción y aprovechamiento del biogás en un vertedero controlado consta de:

6.3.1. Pozos de captación

A través de los pozos de captación regularmente distribuidos por toda la superficie del vertedero se realiza la extracción del biogás generado en el interior de la plataforma de vertido. En los pozos se introducen tuberías ranuradas, generalmente de polietileno de alta densidad, del mismo diámetro que los pozos con objeto de conseguir el drenaje del biogás. Pueden aprovecharse pozos de evacuación de gases ya existentes o, en su defecto, hacerlos nuevos. Los pozos están constituidos por un cabezal de cierre especial para evitar entradas de oxígeno al caudal de gas ni salidas de éste a la atmósfera.

La Figura 16 recoge la sección de un pozo de evacuación de gases. La altura de estos pozos irá en función del número de capas de vertido depositadas.

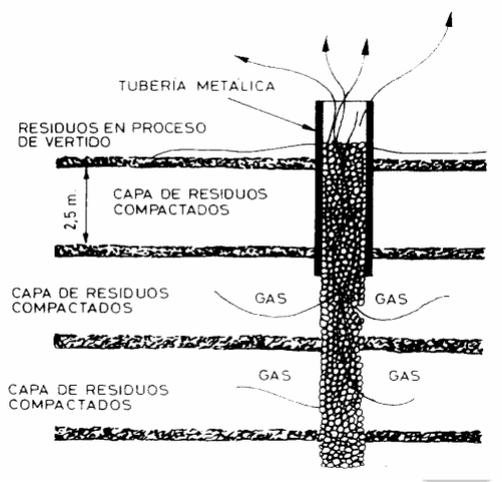
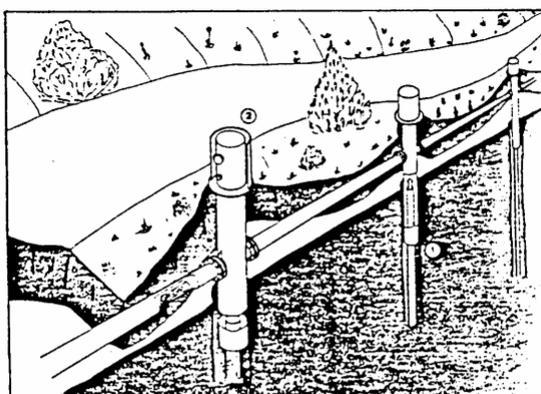


Figura 16: Corte transversal de un pozo de evacuación de biogás.

6.3.2. Líneas de conducción

La conducción del biogás hasta el centro de aspiración y medición se realiza a través de líneas o tuberías, en este caso ciegas, de polietileno de alta densidad desde la cabeza de los pozos hasta la planta de extracción o los colectores según el sistema empleado. Actualmente, siguiendo la nueva legislación sobre sellado de vertederos, estas tuberías quedan enterradas bajo varias capas de áridos, pero, para una gestión óptima desde el punto de vista de operatividad de la planta, convendría que se encontraran en la superficie del vertedero para que fuera sencillo cualquier trabajo de mantenimiento de las mismas como extracción de condensados, conservación de pendientes en los tendidos, etc.

La Figura 17 recoge un esquema donde pueden verse las sondas de evacuación y las cabezas de sonda en un vertedero clausurado.



- 1 = Sondas de evacuación
- 2 = Cabezas de sonda de aplicación en Vertederos ya agotados

Figura 17: Sondas de evacuación y cabezales de sonda en un vertedero clausurado.

6.3.3. Antorcha

Todas las instalaciones de extracción y aprovechamiento de biogás deben de estar equipadas con una antorcha para eliminar el biogás que no es aprovechado.

6.3.4. Estación de regulación y medida

Controla la cantidad y calidad (metano y oxígeno) del biogás extraído en cada línea. El emplazamiento de la instalación se dispondrá dentro de un área que no afecte a la explotación normal del vertedero y próximo en lo posible a los pozos de captación.

6.3.5. Sistema de eliminación de agua

Este sistema se dispone para eliminar la mayor parte del vapor de agua que arrastra el biogás. Normalmente suelen utilizarse instalaciones frigoríficas.

6.3.6. Sistema de eliminación de compuestos corrosivos

En el caso de que el biogás contenga una cantidad importante de algún compuesto corrosivo (por ejemplo, H_2S) es necesaria su eliminación por debajo de ciertos límites para que el biogás pueda ser utilizado por los equipos.

6.3.7. Sistema de aprovechamiento del biogás

En cuanto a la utilización del biogás, como se ha hecho referencia, hay básicamente tres opciones disponibles para su aprovechamiento: a) producción de electricidad utilizando motores a gas o turbinas a gas - un motor diesel típico tendrá una eficiencia eléctrica del 33% y una eficiencia de ignición del 25% -, b) producción de calor en calderas y c) adecuarlo a la calidad necesaria para que pueda ser introducido en la red de distribución. La opción más difundida y la que más se está empleando en los vertederos es la generación de energía eléctrica y calor a través de motores de cogeneración.

La Figura 18 recoge un esquema de la extracción global de biogás de un vertedero.

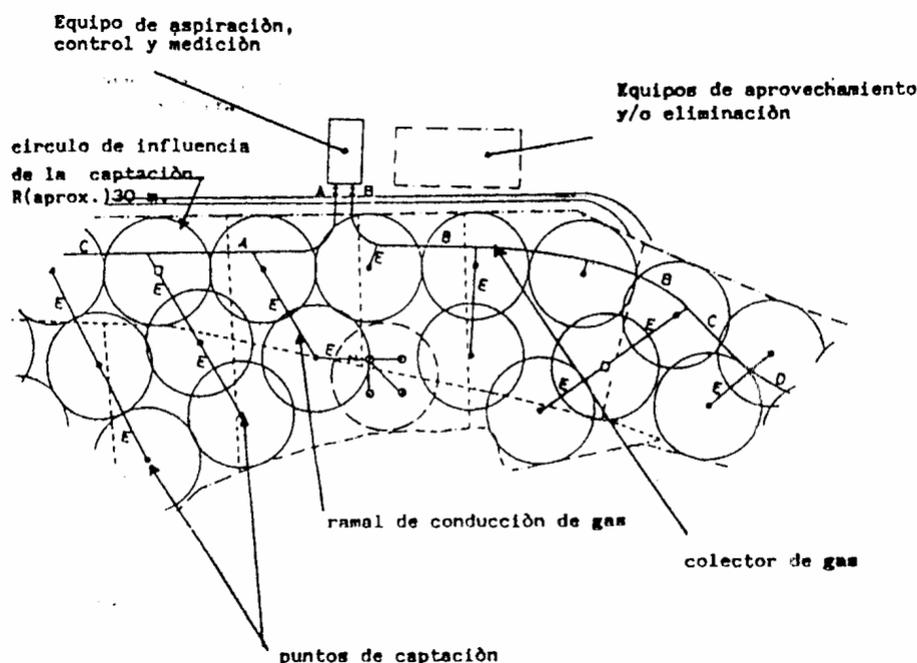


Figura 18: Sistema de extracción global de biogás en un vertedero controlado

6.4. POTENCIAL ENERGÉTICO DE UN VERTEDERO CONTROLADO

La propiedad más interesante del biogás es su valor energético, debido a su elevado contenido de metano. La composición del biogás afecta a las posibilidades de su aprovechamiento, ya que la concentración de metano determina su poder calorífico inferior (Pc_i) y una elevada concentración de alguno de sus componentes traza (ácido sulfhídrico, compuestos orgánicos halogenados,...) puede hacerle lo suficientemente corrosivo como para hacer inviable su aprovechamiento energético, principalmente en motores. El Pc_i de un biogás con un contenido de metano del 60% es de $5500 \text{ kcal/m}^3\text{N}$.

La estimación de la producción de biogás de un vertedero controlado es difícil de evaluar, ya que depende de diversos factores como la composición de los residuos, la temperatura, la climatología, las técnicas de vertido empleadas, las características de diseño, el procesado del vertedero, etc. Existen otros condicionantes que influyen no en la cantidad de biogás que se genera sino en la velocidad de generación. Así, si se reduce el contenido de humedad de la muestra, disminuye la velocidad de degradación anaerobia, pero se mantiene durante más tiempo la metanogénesis, ya que la cantidad final de biogás es la misma. Teóricamente, se puede considerar que se producen 370 m^3 de biogás por tonelada de residuos depositados, con un contenido aproximado al 50% en materia orgánica y con una humedad de 35%. Teniendo en cuenta que sólo una parte del residuo es biometanizable, que no todo el biogás puede ser extraído, (en general un 70% utilizando tecnologías de extracción eficientes) y que una parte puede escaparse a la atmósfera, se puede considerar que, como dato orientativo, por tonelada de residuo depositado pueden extraerse y utilizarse 100 m^3 de biogás en un periodo de tiempo de 10 a 15 años.

Los valores experimentales descritos en la bibliografía difieren considerablemente debido precisamente al carácter local de los factores anteriormente reseñados, incluso dentro de un mismo país estos factores pueden variar de unas regiones a otras, lo que dificulta la aplicación directa de los datos bibliográficos obtenidos de estudios realizados en su mayoría fuera de España. Debido a estas variaciones, la realización de un proyecto de desgasificación con aprovechamiento de biogás en un vertedero requiere ensayos previos para establecer la calidad y cantidad de biogás producido con objeto de poder estimar el potencial energético del mismo.

6.5. SITUACIÓN ACTUAL

La generación de energía eléctrica a partir del biogás extraído de vertederos controlados de RSU es relativamente nueva en España. A principios de la década de los 90, cuando en nuestro país no se había desarrollado ningún proyecto de estas características, ya existía en el mundo un número importante de vertederos que aprovechaban energéticamente el biogás que generaban. Hay autores que cifran en 481 las plantas con una recuperación de 5.142×10^6 m³ de biogás al año, de las cuales, el 43% correspondían a Europa y el 55% a América. Otros autores cifran estas plantas en cerca de 300, con una recuperación de metano de 1.229×10^6 m³ por año.

Sin embargo, los datos obtenidos de los estudios de viabilidad realizados en este campo y los buenos resultados de las primeras experiencias prácticas realizadas en España, junto con la entrada en vigor de la Directiva relativa al vertido de residuos (Directiva 1999/31/CE), han contribuido al gran desarrollo que se ha llevado a cabo en el aprovechamiento energético del biogás de vertedero en los últimos años. En la actualidad, existen 22 vertederos españoles que cuentan con plantas de generación de energía eléctrica a partir de biogás. La **tabla IV** recoge la potencia eléctrica de los motores de cogeneración, instalados en vertederos controlados españoles de RSU, que producen energía eléctrica a partir del biogás extraído de las plataformas de vertido.

Como se puede observar, existen 90 motores de cogeneración instalados en vertederos controlados españoles con una potencia global de cerca de 100 Mw. Además, está previsto la instalación de motores de cogeneración en otros vertederos españoles a lo largo del presente año.

Tabla IV: Vertederos controlados españoles con generación de energía eléctrica

VERTEDERO	AÑO	POTENCIA INSTALADA
Artigas (Vizcaya)	1992	2 motores de 405 kWe
	1997	1 motor de 470 kWe
La Zoreda (Asturias)	1990	1 motor de 220 kWe
	1992	6 motores de 740 kWe
	1999	2 motores de 910 kWe
	2000	1 motor de 450 kWe
San Marcos (Guipúzcoa)	1995	2 motores de 651 kWe
	1996	1 motor de 651 kWe
Meruelo (Cantabria)	1996	2 motores de 496 kWe
	1999	2 motores de 480 kWe
	2003	1 motor de 480 kWe
Góngora (Navarra)	1997	1 motor de 725 kWe
Gardelegui (Vitoria)	1998	2 motores de 636 kWe
	2001	1 motor de 636 kWe
Mula (Murcia)	1998	1 motor de 1006 kWe
	2000	1 motor de 1048 kWe
	2003	1 motor de 1413 kWe
Logroño (La Rioja)	1998	1 motor de 480 kWe
Garraf (Barcelona)	1999	1 motor de 480 kWe
	2003	12 motores de 1037 kWe
Coll Cardús (Barcelona)	1999	2 motores de 850 kWe
Arico (Tenerife)	2000	4 motores de 660 kWe
Cerceda (Coruña)	2001	3 motores de 725 kWe
Sasieta (Guipúzcoa)	2001	1 motor de 475 kWe
Montemarta-Cónica (Sevilla)	2001	2 motores de 1006 kWe
	2003	1 motor de 1006 kWe
	2005	1 motor de 1048 kWe
Les Valls (Barcelona)	2001	1 motor de 1065 kWe
Can Mata (Barcelona)	2002	1 motor de 1048 kWe
Basseta Blanca (Barcelona)	2003	2 motores de 1065 kWe
Pinto (CAM)	2003	11 motores de 1413 kWe
Valdemingómez (Madrid)	2003	8 motores de 2124 kWe
Alicante	2003	1 motor de 1065 kWe
Viznar (Granada)	2003	1 motor de 624 kWe
Sta. María de Palautordera (Barcelona)	2003	1 motor de 1048 kWe
Igorre (Vizcaya)	2004	1 motor de 480 kWe
Jata (Vizcaya)	2004	1 motor de 480 kWe
Abanilla (Murcia)	2004	1 motor de 625 kWe
Salamanca	2005	1 motor de 470 kWe
Colmenar Viejo (CAM)	2005	3 motor de 1416 kWe
		1 motor de 1048 kWe
Toledo	2005	1 motor de 1048 kWe
Málaga	2005	2 motor de 1048 kWe

La Figura 19 muestra la evolución de la potencia instalada en los vertederos de RSU españoles desde sus inicios hasta el año 2005.

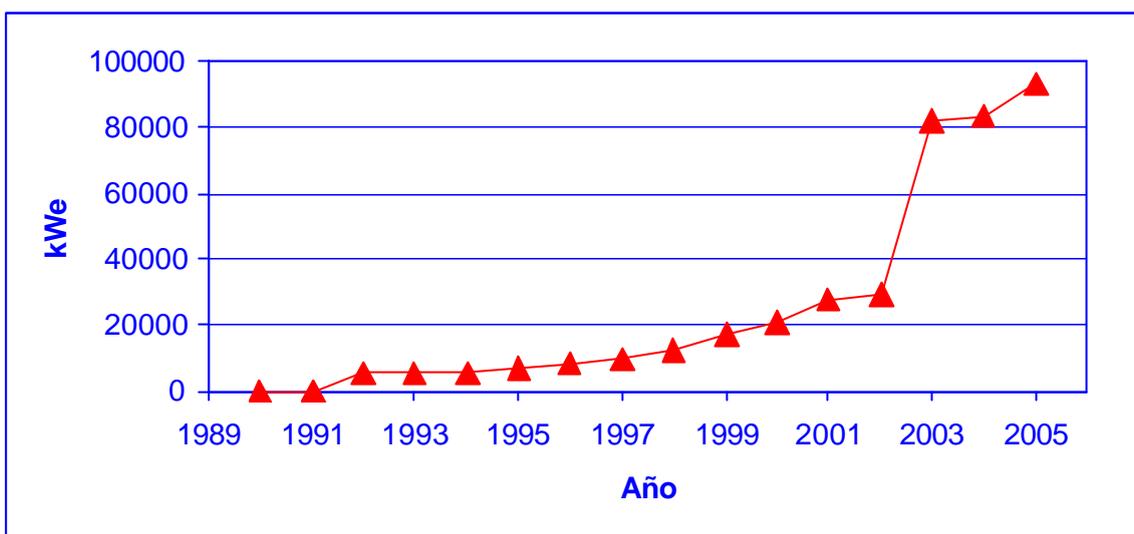


Figura 19: Evolución de la potencia instalada en los vertederos españoles.

Como se puede observar, la generación de energía eléctrica producida a partir del biogás extraído de los vertederos españoles ha experimentado un aumento considerable y todo parece indicar que el crecimiento se mantendrá en los próximos años.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Europea de Medio Ambiente (2001). El Medio Ambiente en la Unión Europea en el umbral del siglo XXI. Ed. Ministerio de Medio Ambiente.
- Boletín IDEA (2007).
- Carreras, N. (2001). Estado del Desarrollo Tecnológico del Aprovechamiento del Biogás. Revista Energía Nº 161. Edición especial.
- Carreras, N. (2007). Residuos Sólido Urbanos. Master en Gestión y Tratamiento de Residuos. Universidad Autónoma de Madrid. Tomo I.
- Carreras, N. (2007). Residuos Agropecuarios. Master en Gestión y Tratamiento de Residuos. Universidad Autónoma de Madrid. Tomo II.
- Carreras, N. (2005). Estado energético de los vertederos controlados. XXXIII Conferencia Anual ATEGRUS sobre Vertederos Controlados. 19-20 Octubre 2005. Lérida.

- Carreras, N. (2007). Producción y recuperación de biogás en vertederos. Master en Gestión y Tratamiento de Residuos. UAM.
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos. DOCE nº L 182, de 16.7.99.
- Directiva 91/156/CEE del Consejo, de 18 de marzo de 1991, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los Residuos. DOCE nº L 078, de 26.03.91.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al Tratamiento de Aguas Residuales.
- IDEA. Plan de Energías Renovables en España 2005-2010.
- Ley 10/1998 de Residuos, de 21 de abril. (1998). BOE nº 96, de 22.4.98.
- Ley 29/1985 de Aguas, de 2 de agosto. (1985). BOE nº 189, de 08.08.1985.
- Ley 22/1988 de Residuos, de 28 de julio. (1998).
- Los Residuos como fuente de recursos. (1995). Ed. Ciemat.
- MAPA. Subdirección General de Estadísticas Agroalimentarias. Encuestas ganaderas 2006
- Medio Ambiente en España (2003). Ministerio de Medio Ambiente.
- Medio Ambiente en España. (2002). Ministerio de Medio Ambiente. Fundación para la Gestión y Protección del Medio Ambiente (FUNGESMA).
- Medio Ambiente en España (2000). Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Calidad. Evaluación Ambiental.
- Muñoz Valero, J.A.; Ortiz Cañavate, J.; Vázquez Minguela, J. (1985). "Técnica y Aplicaciones Agrícolas de la Biometanización". Mº Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Oromendía, E. (2003). Plan Nacional de Residuos. Master en Gestión y Tratamiento de Residuos. Universidad Autónoma de Madrid. Tomo I.
- II Plan Nacional de Residuos Urbanos. MMA. 2007
- Santos, M. (2003). Normativa estatal. Master en Gestión y Tratamiento de Residuos. Universidad Autónoma de Madrid. Tomo II.