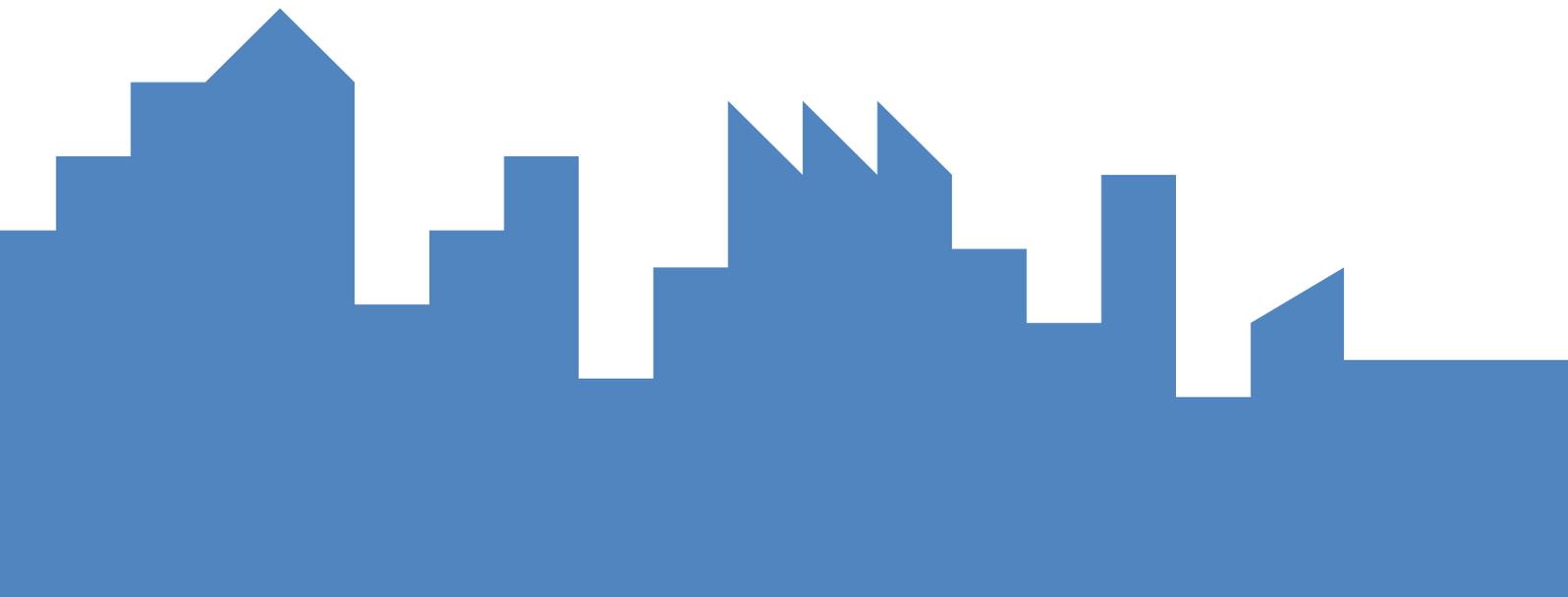


ESTUDIO DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN LOS VERTEDEROS MUNICIPALES



ESTUDIO DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES EN LOS VERTEDEROS MUNICIPALES



Autor: FEMP -
Federación Española
de Municipios y
Provincias

Edita: FEMP -
Federación Española
de Municipios y
Provincias

Diseño y realización:
Azira 3, S.L.
www.azira.com

Depósito legal:
M-44868-2011



Índice

PRÓLOGO.....	7
RESUMEN EJECUTIVO	8
EXECUTIVE SUMMARY.....	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Objeto y alcance del informe.....	12
1.2. Principales etapas metodológicas.....	12
1.3. Marco Legislativo	14
2. EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS EUROPEOS.....	17
2.1. España	22
2.2. Alemania	24
2.3. Dinamarca	26
2.4. Italia.....	29
2.5. Reino Unido	30
3. ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN VERTEDEROS.....	35
3.1. Ejemplos de producción y utilización de biogás en vertederos	37
4. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS ESPAÑOLES MÁS IMPLANTADOS. BUENAS PRÁCTICAS	41
4.1. Combustión	44
4.2. Generación de energía térmica.....	45
4.3. Generación de energía eléctrica	47

4.4. Cogeneración. Generación de energía eléctrica y energía térmica	51
4.5. Integración en la red de gas natural	53
4.6. Combustible para vehículos	54
4.7. Combustible para pilas de combustible	57
4.8. Otros usos del biogás	60
4.9. El vertedero como biorreactor	61
4.10. Buenas Prácticas y Recomendaciones	62
4.11. Resumen de las respuestas de las encuestas y análisis de la información recopilada	68
4.12. Identificación de los principales problemas y obstáculos para el aprovechamiento energético del biogás	89
5. ANÁLISIS DAFO. MEJORES ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS.	91
5.1. Resultados del análisis DAFO	94
5.2. Valoración de alternativas planteadas.	100
5.3. Análisis multicriterio. Jerarquización de alternativas.	115
6. VIABILIDAD ECONÓMICA DE LOS PROYECTOS DE RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS	117
6.1. Factores que influyen en la viabilidad.	118
6.2. Estudios de viabilidad	118
6.3. Posibles vías de financiación.	130
7. CONCLUSIONES.	135
8. BIBLIOGRAFÍA	137
9. ÍNDICE DE FIGURAS	139
10. ÍNDICE DE TABLAS	143

Agradecimientos

POR PARTE DE LA FEMP HAN PARTICIPADO:

Directores del Proyecto:

José María Velázquez Andrés

Ana Estebaranz Berzal

Coordinador del Proyecto:

Eduardo Peña González

Técnicos y personal de apoyo:

Ana Barroso Bosqued

Carmen González Sánchez

Sandra Rentero Gutiérrez

POR PARTE DEL MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO HA PARTICIPADO:

Personal técnico de la Oficina Española de Cambio Climático

La Federación Española de Municipios y Provincias quiere agradecer la colaboración prestada por los representantes políticos y técnicos de los Gobiernos Locales pertenecientes a la Red Española de Ciudades por el Clima por la información facilitada a través de las encuestas que han servido de apoyo en la elaboración de este estudio.

Ayuntamiento de Alcorcón

Ayuntamiento de Algeciras

Ayuntamiento de Alicante

Ayuntamiento de Burgos

Ayuntamiento de Castellón de la Plana

Ayuntamiento de Chiclana de la Frontera

Ayuntamiento de Galapagar

Ayuntamiento de Gijón

Ayuntamiento de Lorca

Ayuntamiento de Los Barrios

Ayuntamiento de Murcia

Ayuntamiento de Pajares de Adaja

Ayuntamiento de Pamplona

Ayuntamiento de San Sebastián de los Reyes

Ayuntamiento de Segovia

Ayuntamiento de Soria

Ayuntamiento de Torreveja

Ayuntamiento de Valladolid

Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz

Vertedero de Artigas (Bilbao - Vizcaya)

Vertedero de Beuda (Beuda – Girona)

Prólogo

La gestión de residuos ha vivido una importante transformación durante las dos últimas décadas en España dando respuesta al desafío que supone una gestión sostenible de los residuos. En la actualidad, los sistemas de recogida selectiva, reciclaje, compostaje y aprovechamiento energético de los residuos se han extendido hasta cubrir todo el territorio nacional, cumpliendo de esta manera con los objetivos establecidos en la normativa comunitaria y nacional.

Este cambio se ha debido principalmente a tres factores: el importante esfuerzo realizado por todas las Administraciones Públicas, la creación de un mercado estable para el aprovechamiento de los materiales y la energía contenida en los residuos y la implicación de la ciudadanía en la correcta separación de los residuos. Esta línea de trabajo debe potenciarse para que en años venideros todos los residuos sean recursos que gestionemos eficientemente.

En el marco de la lucha contra el cambio climático se creó una línea estratégica de residuos y gestión de estiércoles, para afrontar el gran reto de la reducción de los gases de efecto invernadero provenientes de los residuos, en particular del metano. Las medidas principales de esta línea son el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (PNIR), las medidas para la captación de gas en vertedero y el Plan de biodigestión de purines.

La aprobación de la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, que transpone la Directiva 2008/98/CE marco de residuos, constituye un nuevo impulso a esta línea estratégica, a través de una revisión de los objetivos específicos de preparación para la reutilización, reciclado y valorización, la promoción de la recogida separada de biorresiduos, la elaboración de programas de prevención de residuos, la regulación de las obligaciones de información sobre la gestión de residuos, etc.

Actualmente, la recogida selectiva de los residuos biodegradables se encuentra en una fase incipiente en España, centrándose en determinados tipos de municipios y en algunas zonas geográficas del país; hasta el momento, la eliminación de esta fracción de residuos en vertedero sigue siendo la principal opción para su tratamiento final.

Por ello, tanto el Gobierno central como las Entidades Locales han puesto en marcha numerosas iniciativas para minimizar la presencia de esta fracción de residuos en los vertederos españoles. Así mismo, este esfuerzo se complementa con el fomento del aprovechamiento del gas de vertedero, que se ha fijado como una de las prioridades de acción en la lucha contra el cambio climático.

El presente informe nace con el objetivo de estudiar el potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en los vertederos municipales, llevando a cabo una compilación de buenas prácticas respecto a su gestión. En este sentido, se ha recogido, especialmente para los municipios de tamaño intermedio, información actualizada sobre las diferentes tecnologías existentes, la viabilidad económica de las distintas opciones y las diferentes fuentes de financiación disponibles. Todo ello en base a experiencias nacionales.

Esta contribución hacia un mejor conocimiento de las buenas prácticas que permitan implantar modelos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero constituye un avance en el camino ya emprendido por nuestro país en cuanto a la gestión sostenible de los residuos.



Resumen ejecutivo

El marco legal que se ha diseñado para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) procedentes de vertederos se recoge en la Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos, traspuesta al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Los objetivos y actuaciones establecidos, tanto en la Directiva como en el Real Decreto, suponen un importante cambio en la gestión de los residuos depositados en los vertederos. Estos cambios implican fundamentalmente una reducción de los residuos biodegradables destinados a vertedero y la realización de un control de los gases emitidos en los vertederos, orientado a la recogida, tratamiento y aprovechamiento energético de los mismos.

La principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero dentro del sector de los residuos es la eliminación en vertedero. Por este motivo, y en cumplimiento de la anterior normativa, surge la necesidad de realizar un estudio del potencial de reducción de las emisiones generadas en los vertederos municipales.

Este estudio pretende servir como documento de referencia a los municipios para mejorar la gestión de los vertederos de residuos municipales, prestando especial atención a todas aquellas medidas dirigidas a reducir las emisiones de metano generadas por la fermentación anaerobia de los residuos orgánicos eliminados en vertedero.

Para ello, el estudio se ha dirigido específicamente a:

- Analizar la situación actual de los vertederos de residuos municipales en España en relación con la aplicación de medidas de reducción de las emisiones de metano.
- Identificar los principales problemas y obstáculos a los que se enfrentan los municipios españoles respecto al aprovechamiento energético de los gases emitidos en los vertederos.
- Recopilar las buenas prácticas desarrolladas por diferentes municipios referentes a la eliminación de residuos en vertedero y a la reducción de las emisiones.
- Analizar los diferentes sistemas de reducción de emisiones de GEI en los vertederos municipales y realizar una posterior valoración en base a criterios técnicos, ambientales y económicos.
- Realizar un estudio de viabilidad económica de proyectos de recuperación de biogás centrado en municipios de tamaño intermedio y analizar las posibles vías de financiación y colaboración entre Gobiernos Locales y empresas del sector de gestión de residuos.



Executive summary

The legal framework created to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from landfills is the Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, adapted to the Spanish regulations by the Royal Decree 1481/2001, of December 27th, on the disposal of waste in landfills.

The objectives and actions established by the Directive and the Royal Decree represent an important change in the management of waste disposed in landfills. These changes mainly involve a reduction of biodegradable waste destined to landfills and the control of the biogas, aimed at collecting, processing and using it to produce energy.

The main source of greenhouse gas emissions in the waste sector is the waste disposal in landfills. For this reason, in compliance with the regulations cited above, a study on the potential to reduce emissions in municipal landfills is needed.

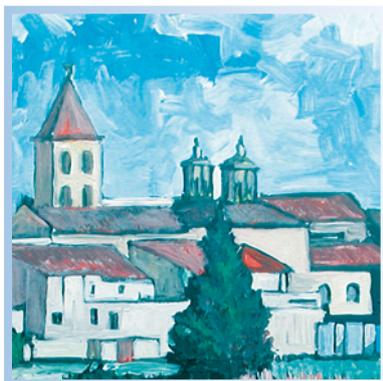
This study is intended to serve as a reference document to the municipalities that want to improve the management of municipal waste landfills, paying special attention to the measures aimed at reducing methane emissions, the greenhouse gas generated by the anaerobic fermentation of organic waste disposed in landfills.

The study has the following objectives:

- Analyze the current situation of municipal waste landfills in Spain related to the implementation of measures to reduce methane emissions.
- Identify the main problems and obstacles faced by Spanish Local Authorities regarding the energy use of the gas produced in landfills.
- Compile a collection of good practices developed by different municipalities in relation to waste disposal in landfills and emissions reduction.
- Analyze the different systems available to reduce GHG emissions in municipal landfills and evaluate them based on technical, environmental and economical criteria.
- Conduct an economic feasibility study of landfill gas recovery projects, focused on middle sized municipalities, and identify different funding sources and means of collaboration between Local Authorities and private companies in the waste management sector.



1. Introducción



1.1. Objeto y alcance del informe

El presente informe tiene como objeto estudiar el **Potencial de Reducción de Emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEIs) en los Vertederos Municipales**, con el fin de servir de documento de referencia para mejorar la gestión de los mismos y reducir las emisiones fugitivas de gas metano de elevado impacto sobre el cambio climático.

España, como Estado miembro de la Unión Europea, participa activamente en el proceso de negociación internacional, que se desarrolla principalmente a través de reuniones anuales de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático y del Protocolo de Kyoto. Su objetivo es no aumentar sus emisiones de GEI en más de un 15% en el periodo 2008-2012 sobre los valores de 1990.

La **Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999**, relativa al vertido de residuos, adaptada al ordenamiento jurídico español mediante el **Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero**, incluye entre otros objetivos que *"a más tardar el 16 de julio de 2016, la cantidad total (en peso) de residuos urbanos biodegradables destinados a vertedero no superará el 35 por 100 de la cantidad total de residuos urbanos biodegradables generados en 1995"*.

El sector de los residuos contribuye un 3,8% a las emisiones totales de GEI en España, siendo las principales fuentes de emisión en este sector la eliminación de residuos en vertedero y el tratamiento de aguas residuales. El principal gas causante de estas emisiones es el metano, que tiene un poder de calentamiento global mucho más elevado que el CO₂ y se produce por la fermentación anaerobia de la materia biodegradable contenida en los residuos depositados en los vertederos.

El cumplimiento de la normativa anteriormente mencionada sobre vertederos resultaría en una importante reducción de GEI, pasando de un flujo positivo de 50 Kg. CO₂eq. por tonelada de residuo en el año 2000 a un flujo negativo de 200 Kg. CO₂eq./t en 2020.

Dada la situación actual en relación al cumplimiento de esta normativa y ante la necesidad de alcanzar estos objetivos de reducción, nace el presente estudio dirigido específicamente a:

- Analizar la situación actual de los vertederos de RSU en España, especialmente en relación con la aplicación de medidas de reducción de las emisiones de metano.
- Identificar y desarrollar un conjunto de medidas prácticas dirigidas a mejorar la gestión de los vertederos municipales, incluyendo la aplicación de nuevas tecnologías de aprovechamiento de gas de vertedero y las posibles vías de colaboración entre el sector público y privado.

El alcance del proyecto es todo el territorio español, aunque centrando sus prioridades en municipios de tamaño intermedio, es decir, ni tan poblados que ya tengan estudiada y resuelta la gestión del biogás de sus vertederos, ni tan pequeños que no sea planteable una recuperación de biogás desde el punto de vista de la viabilidad económica.

1.2. Principales etapas metodológicas

Como paso previo, se considera necesario conocer la situación actual de los vertederos de residuos municipales españoles respecto a la aplicación de medidas de reducción de las emisiones de metano asociadas a la descomposición de la materia orgánica.

El estudio de los vertederos existentes y de los sistemas implantados para reducir las emisiones de metano permitirá estimar el grado de cumplimiento de la Directiva 1999/31/CE y el Real Decreto 1481/2001 y evaluar las Debilidades, Fortalezas, Amenazas y Oportunidades (análisis DAFO) de los distintos sistemas de reducción de emisiones.

Como complemento, se analizan los sistemas de reducción de emisiones de metano implantados en otros países europeos, de tal forma que puedan servir como ejemplo de buenas prácticas.

El desarrollo metodológico de los trabajos objeto de la presente propuesta se ha llevado a cabo según las etapas siguientes:

Fase 1. Análisis del estado de los vertederos municipales españoles en lo que se refiere a emisión de biogás.

- Identificación de las corrientes de gases procedentes de la descomposición de los residuos que se producen en un vertedero
- Elaboración de un formato de encuesta para conocer el estado de los vertederos en los Gobiernos Locales adheridos a la Red Española de Ciudades por el Clima.
- Envío de la encuesta y seguimiento a los Gobiernos Locales que se consideren prioritarios (en general Gobiernos Locales de tamaño intermedio).
- Análisis del estado del arte de los sistemas de reducción de emisiones de GEI generadas en vertederos, tanto implantados en España como en otros países europeos.

Fase 2. Análisis DAFO de los actuales sistemas de reducción de emisiones de GEI implantados en vertederos, respecto al cumplimiento de la Directiva y Real Decreto de vertederos.

- Identificación de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades de cada sistema de reducción de emisiones de GEI en vertederos.
- Grado de ajuste de cada sistema respecto al cumplimiento de los objetivos de la Directiva 1999/31/CE y el Real Decreto 1481/2001.

Fase 3. Valoración de alternativas a los sistemas de reducción de emisiones GEI implantados en vertederos.

- Aspectos técnicos de las alternativas propuestas.
- Aspectos económicos.
- Aspectos ambientales.
- Matriz multicriterio.

Fase 4. Elaboración del contenido del informe, incluyendo un conjunto de medidas prácticas dirigidas a mejorar la gestión de los vertederos municipales.

- Descripción de la metodología utilizada.
- Mejores tecnologías destinadas a reducir emisiones de GEI en vertederos.
- Métodos de estimación de la generación de biogás en vertedero y fracción aprovechable para valorización energética.
- Posibles vías de financiación para el desarrollo de estos proyectos.

- Posibilidades de colaboración entre Gobiernos Locales y empresas privadas para el desarrollo conjunto de proyectos de aprovechamiento del biogás generado en vertederos.
- Recopilación de buenas prácticas aplicadas en España y en otros países europeos.
- Conclusiones.

1.3. Marco Legislativo

En este apartado se cita la legislación, en materia de vertederos, que hace referencia a las emisiones de GEI.

1.3.1. Relación de normativa aplicable y resumen de los aspectos más relevantes de cada texto legal

Actualmente existen tres normativas que hacen referencia a los gases emitidos en vertederos.

- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

La *Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos*, establece un régimen concreto para la eliminación de los residuos mediante su depósito en vertedero. El objetivo de la Directiva es establecer, mediante rigurosos requisitos técnicos y operativos sobre residuos y vertidos, medidas, procedimientos y orientaciones para impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos, en particular la contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el suelo y el aire, y del medio ambiente mundial, incluido el efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud humana, durante todo el ciclo de vida del vertedero.

Las líneas básicas de esta norma son: la clasificación de los vertederos en tres categorías (vertederos de residuos peligrosos, vertederos de residuos no peligrosos y vertederos de residuos inertes), la definición de los tipos de residuos aceptables en cada una de dichas categorías, el establecimiento de una serie de requisitos técnicos exigibles a las instalaciones, la obligación de gestionar los vertederos después de su clausura y una nueva estructura e imputación de los costes de las actividades de vertido de residuos.

España es uno de los países europeos en los que, en gran medida, se utiliza el vertedero para la eliminación de los residuos. Esta situación, junto con las obligaciones impuestas por la normativa comunitaria, justifica la adopción del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre que incorpora al derecho interno la Directiva 1999/31/CE.

El *Real Decreto 1.481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, tiene por objeto el establecimiento de un marco jurídico y técnico adecuado para las actividades de eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, al tiempo que regula las características de éstos y su correcta gestión y explotación.

- ▶ El Artículo 14 regula el "Procedimiento de clausura y mantenimiento postclausura del vertedero". En este artículo, en relación con los gases generados, se establece que:

Tras la clausura definitiva del vertedero, y de conformidad con lo que al respecto se fije en la autorización, la entidad explotadora será responsable de su mantenimiento, vigilancia, análisis y control de los lixiviados del vertedero, **y, en su caso, de los gases generados**, así como del régimen de aguas subterráneas en las inmediaciones del mismo, todo ello conforme a lo dispuesto en el anexo III. El plazo de la fase postclausura durante el que la entidad explotadora será responsable del vertedero, en los términos de la autorización, será fijado por la autoridad competente, teniendo en cuenta el tiempo durante el cual el vertedero pueda entrañar un riesgo significativo para la salud de las personas y el medio ambiente, sin perjuicio de la legislación en relación con la responsabilidad civil del poseedor de los residuos. En ningún caso dicho plazo podrá ser inferior a treinta años.

- ▶ El Anexo I de este Real Decreto establece los “Requisitos generales para todas las clases de vertederos”. En este Anexo, en relación con el control de gases (punto 4), se establece:
 1. Se tomarán las medidas adecuadas para controlar la acumulación y emisión de gases de **vertedero**.
 2. En todos los **vertederos** que reciban residuos biodegradables se recogerán los gases de **vertedero**, se tratarán y se aprovecharán. Si el gas recogido no puede aprovecharse para producir energía, se deberá quemar.
 3. La recogida, tratamiento y aprovechamiento de gases de vertedero se llevará a cabo de forma tal que se reduzca al mínimo el daño o deterioro del medio ambiente y el riesgo para la salud humana.
- ▶ El Anexo III del Real Decreto establece los “Procedimientos de control y vigilancia en las fases de explotación y de mantenimiento posterior”.

El control de gases deberá ser representativo de cada sección del vertedero. En aquellos vertederos en que no se proceda al aprovechamiento energético de los gases, su control se realizará en los puntos de emisión o quema de dichos gases.

Por otra parte, y al objeto de dar cumplimiento al mandato de la Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, que establece que los Estados miembros pondrán en vigor las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a lo dispuesto en la misma a más tardar el 16 de junio de 2001, se hace necesario incluir un nuevo apartado en el artículo 15 del Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, en virtud del cual será de aplicación a los vertederos que hayan solicitado u obtenido autorización entre el 16 de julio de 2001 y el 30 de enero de 2002.

2. Emisiones de GEI

en vertederos europeos



2. Emisiones GEI en vertederos europeos

El presente capítulo tiene como objetivo recopilar, realizar una prospección y sistematizar la información existente en varios países europeos con el fin de conocer el **estado del arte** de los sistemas actuales de reducción de los GEI en los vertederos europeos y su situación frente a la Directiva 1999/31/CE, a fin de servir de instrumento de referencia para desarrollar propuestas tecnológicas de aplicación en España.

Dentro de las emisiones de GEI debidas a residuos, las que se originan en vertederos representan la mayor contribución (en el mundo aproximadamente 700 Mt CO₂ equivalente en 2009 (*Bogner et al* 2007)). En comparación, las siguientes en orden de importancia son las emisiones que se originan en procesos de valorización energética (incineración) que suponen del orden de 40 Mt en 2009 (estimación por *Bogner et al* en 2007).

La principal causa de las emisiones de metano en vertederos es la degradación de residuos orgánicos. Por ello, la Directiva limita la cantidad de residuos orgánicos eliminados en vertedero al 65% para 2006, al 50% para 2009 y al 35% para 2016 respecto a la cantidad de residuos total generada en 1995. La aplicación de la Directiva implica que los nuevos vertederos deben incluir instalaciones de recuperación del biogás y que los vertederos existentes deberían haber adaptado sus instalaciones, incluyendo instalaciones de recuperación, para el año 2009. La consecución de estos objetivos implica una importante reducción de las emisiones de metano; sin embargo, muchos Estados miembros se encuentran aún lejos de lograr los objetivos de la Directiva.

En comparación con el resto del mundo, Europa es el continente con mayor número de instalaciones de recuperación de biogás de vertedero, tal y como puede apreciarse en las figuras 1 y 2. El número de instalaciones ha crecido sostenidamente desde los años 80.

Figura 1. Número de instalaciones de recuperación de biogás en distintas zonas del mundo. Fuente: Willumsen, 2004.

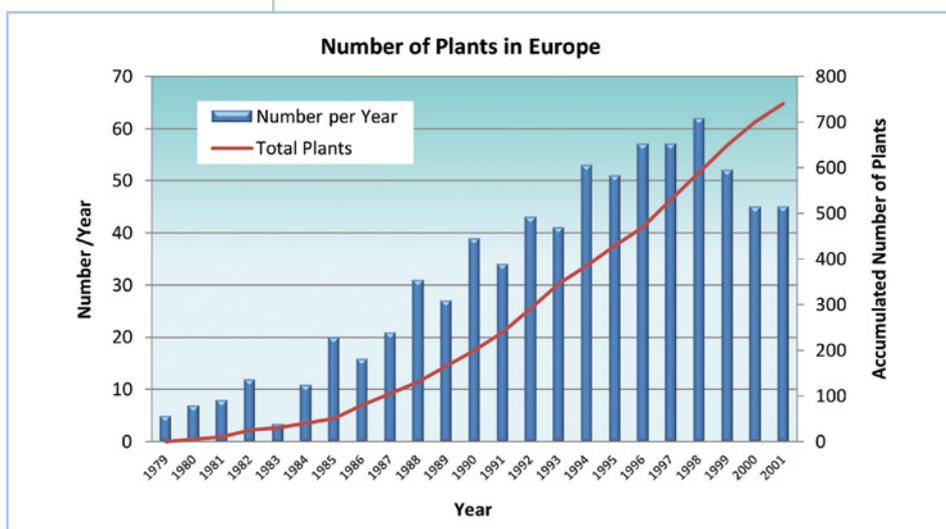
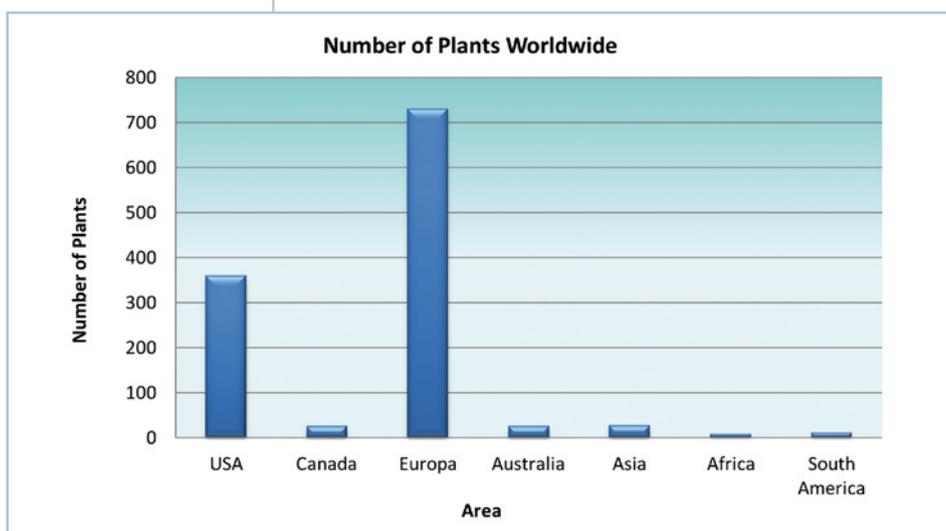


Figura 2. Número de vertederos con plantas de recuperación de biogás en Europa. Fuente: Willumsen, 2004.

Con el fin de realizar una introducción a nivel europeo, se han tomado como referencia los documentos técnicos publicados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC en sus siglas en inglés), que tiene como misión analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático antropogénico, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo.

El IPCC, en su inventario, agrupa las emisiones en seis sectores diferentes según los procesos que las originan. Así el sector 6 engloba "todas las emisiones procedentes de residuos depositados en vertederos, aguas residuales, residuos de incineración y de cualquier otra actividad de gestión de residuos".

Asimismo, define la categoría 6A, dentro del análisis de las emisiones de metano procedente de vertederos de residuos urbanos, como: "El metano que es producido por la descomposición anaerobia microbiana de la materia orgánica depositada en los vertederos de residuos urbanos. También se produce CO₂, pero sólo el CO₂ procedente del residuo inorgánico y no biológico se tiene en cuenta para el inventario de las emisiones".

Según la información incluida por el IPCC en su estudio, y teniendo en cuenta la anterior definición a la hora de analizar la contribución de los vertederos a las emisiones totales de GEIs, resulta que entre 1999 y 2007 el número de vertederos de residuos descendió en todos los países miembros dentro del grupo de los llamados Europa de los 15 (EU-15), excepto en Francia, Grecia, Irlanda, Portugal y España. Dentro de este grupo, Alemania fue el primer país miembro europeo que dejó de depositar residuos biodegradables en vertederos.

Como se puede observar en la Tabla 1, en la denominada Europa de los 27 (EU-27), la contribución de los vertederos a las emisiones de GEI totales fue decreciendo en el rango de años de 1990 a 2007. En los años 2000 a 2007 se ha seguido reduciendo la contribución de los vertederos a las emisiones de GEI, pero esta reducción ha sido menor que en el total del periodo considerado.

Emisiones de CH ₄ de 6A	Contribución en 1990 sobre el total de GEIs	Contribución en 2007 sobre el total de GEIs	Variación 1990-2007	Variación 2000-2007
EU-15	3,3%	1,8%	-45%	-28,4%
EU-27	3,0%	2,0%	-39%	-22,8%

Tabla 1. Emisiones de metano en la categoría 6A. Fuente: EEA, 2009 (originalmente de IPCC)

En la Tabla 2 se muestra la variación de las emisiones de metano y de los residuos orgánicos depositados en vertedero entre 1990 y 2007 en los 27 Estados miembros.

Relative Change (1990-2007)	CH ₄ emissions	deposited waste	CH ₄ recovery
Austria	-48.3%	-79.7%	286.6%
Belgium	-77.9%	-61.3%	-
Bulgaria	-37.7%	-53.9%	-
Cyprus	65.0%	2.4%	-
Czech Republic	45.4%	39.8%	536.9%
Denmark	-20.4%	-69.9%	1423.0%
Estonia	-13.9%	-29.0%	-
Finland	-43.5%	-41.2%	-
France	-25.0%	19.8%	1377.3%



2. Emisiones GEI en vertederos europeos

Tabla 2. Variación de las emisiones de CH₄ y residuos biodegradables depositados en vertedero entre 1990 y 2007 en los 27 Estados miembros. Fuente: Agencia Ambiental Europea EEA, 2009.

Relative Change (1990-2007)	CH ₄ emissions	deposited waste	CH ₄ recovery
Germany	-77.1%	-100.0%	114.3%
Greece	35.6%	51.1%	-
Hungary	30.6%	-1.2%	-
Ireland	32.9%	64.0%	-
Italy	0.3%	-12.0%	292.5%
Latvia	91.1%	79.6%	-
Lithuania	-15.8%	-43.9%	-
Luxembourg	-47.8%	-36.1%	-
Malta	108.8%	8.0%	-
Netherlands	-56.2%	-85.8%	118.6%
Poland	-51.2%	-17.9%	-
Portugal	63.1%	31.7%	-
Romania	122.6%	76.3%	-
Slovakia	283.7%	-	-
Slovenia	31.4%	20.8%	2953.3%
Spain	105.5%	74.2%	4100.5%
Sweden	-41.7%	-86.4%	104.6%
United Kingdom	-59.2%	-28.4%	696.5%

En cuanto a la variación en la cantidad de residuos biodegradables depositados, se observa en la Tabla 2 como **Alemania** está en cabeza, con vertido cero de este tipo de residuos, seguido de Suecia y Países Bajos. España, sin embargo, todavía debe realizar un importante esfuerzo para reducir la eliminación de residuos biodegradables en vertederos e incrementar los sistemas de aprovechamiento de biogás implantados, aunque estos hayan experimentando un crecimiento del 4.100,5% desde 1990.

En la Figura 3 puede observarse, a través de una serie temporal, el acoplamiento entre las emisiones de metano de vertederos y la cantidad de residuos depositados en vertedero para la Europa de los 27. Como se puede ver, la pendiente de la curva de producción de metano se hizo más pronunciada con

la entrada en vigor de la Directiva, reduciéndose la influencia de los residuos depositados en vertedero y las emisiones de los mismos.

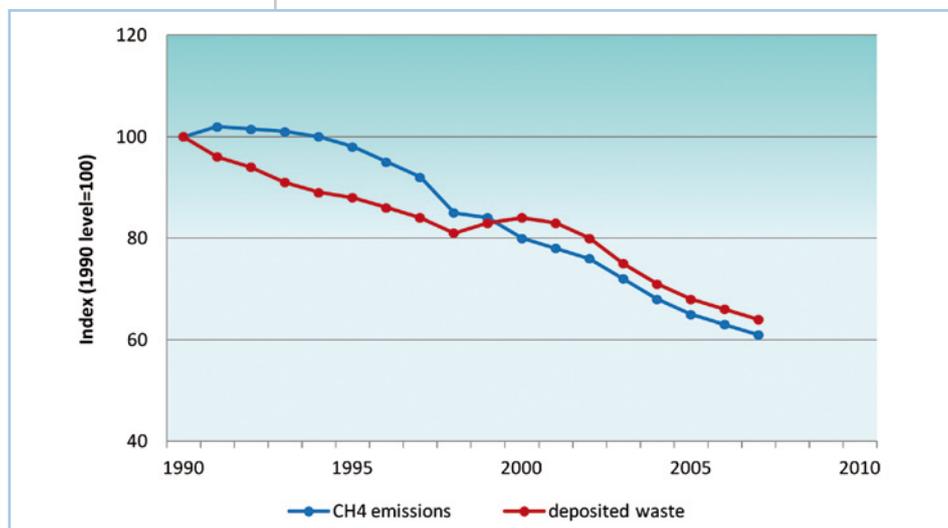
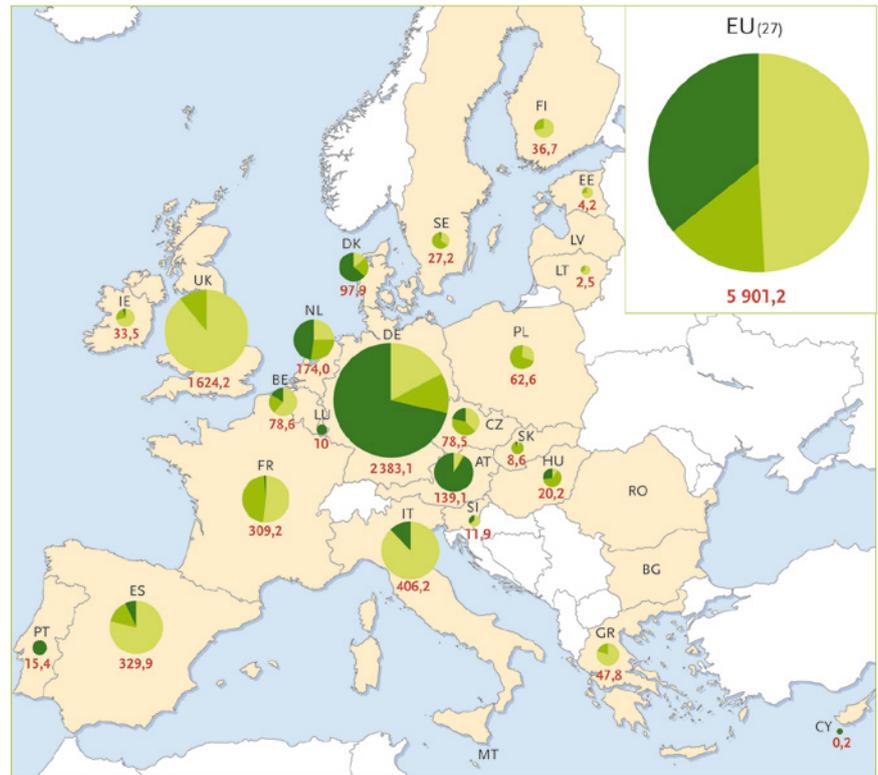


Figura 3. Relación entre los residuos eliminados en vertedero y la emisión de metano en vertederos para la Europa de los 27. Fuente: EEA, 2009

Para la selección final de los países de referencia para conformar el estudio del arte se ha tenido en cuenta la generación de biogás procedente de vertederos en la UE, resultando elegidos, de acuerdo a la Figura 4, Alemania, Dinamarca, Italia y Reino Unido.

PRODUCTION D'ÉNERGIE PRIMAIRE DE BIOGAZ EN EUROPE EN 2007*
PRIMARY ENERGY PRODUCTION OF BIOGAZ IN EUROPE IN 2007*



LÉGENDE/KEY

Production d'énergie primaire de biogaz de l'Union européenne en 2007 (en ktep)/
Primary energy production of biogas of the European Union in 2007 (in ktep)

- Biogaz de décharges/Landfill gas
- Biogaz de stations d'épuration/Sewage sludge gas
- Autres biogaz (unités décentralisées de biogaz agricole, etc.)/Other biogases (decentralised agricultural plant, etc.)

5 901,2 Les chiffres en rouge indiquent la production totale en ktep/Red figures show total production in ktep

* Estimation/Estimate.

Figura 4. Generación de biogás en la UE. Fuente: EurObserver.

El documento "Waste Management Options and Climate Change", publicado por la Comisión Europea en 2001, identifica las distintas corrientes de biogás en un vertedero de acuerdo con la Figura 5:

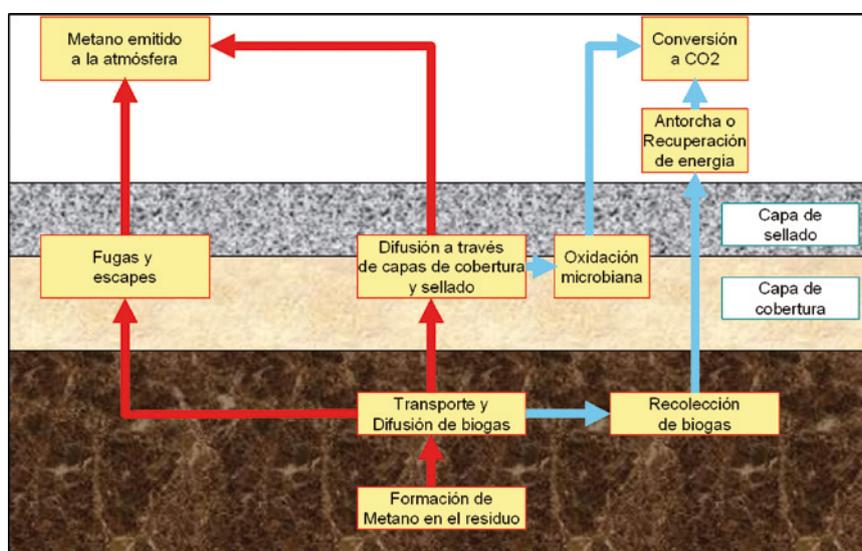


Figura 5. Posibles corrientes de metano en un vertedero. Fuente: "Waste Management Options and Climate Change." Comisión Europea.

2. Emisiones GEI en vertederos europeos

En los capítulos siguientes se incluye el análisis de los sistemas de recogida y aprovechamiento más utilizados en estos cuatro países, tratando de dar respuesta a todas las corrientes identificadas en la Figura 5.

Asimismo, se ha realizado una descripción de la situación actual en España en cuanto a emisiones de GEI.

2.1. España

La Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia (EECCCEL) forma parte de la Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (EEDS). Esta Estrategia cuenta como marco de referencia a la "Estrategia Española para el cumplimiento del Protocolo de Kyoto", aprobada por el Pleno del Consejo Nacional del Clima el 5 de febrero de 2004, y aborda diferentes medidas que contribuyen al desarrollo sostenible en el ámbito del cambio climático y la energía limpia.

Por un lado, se presentan una serie de políticas y medidas para mitigar el cambio climático, paliar los efectos adversos del mismo y hacer posible el cumplimiento de los compromisos asumidos por España en este campo, facilitando iniciativas públicas y privadas encaminadas a incrementar los esfuerzos de lucha contra el cambio climático en todas sus vertientes y desde todos los sectores, centrándose en la consecución de los objetivos que permitan el cumplimiento del Protocolo de Kyoto.

Por otro lado, se plantean medidas para la consecución de consumos energéticos compatibles con el desarrollo sostenible. Estas medidas configuran una base para la planificación en materia energética de las administraciones públicas y demás entes públicos y privados, además de facilitar la contribución de la ciudadanía a la lucha contra el cambio climático.

El crecimiento de la población y el desarrollo económico registrados en España en los últimos años son factores críticos en la evolución de las emisiones de GEIs y, por tanto, deben de tenerse muy en cuenta a la hora de tomar decisiones.

La evolución de las emisiones de GEI, expresadas en CO₂ equivalente, ha tenido una tendencia descendente en los últimos años. Como se observa en la figura 6, las emisiones totales se situaron en 2009 en un 26,8% por encima del año base (1990). En conjunto, la evolución del índice ha venido marcada por un crecimiento en el periodo inventariado, a excepción de los años 1993, 1996 y 2006 en los que se registran descensos respecto al año anterior, finalizando la serie con dos caídas consecutivas muy importantes en los años 2008 y 2009.

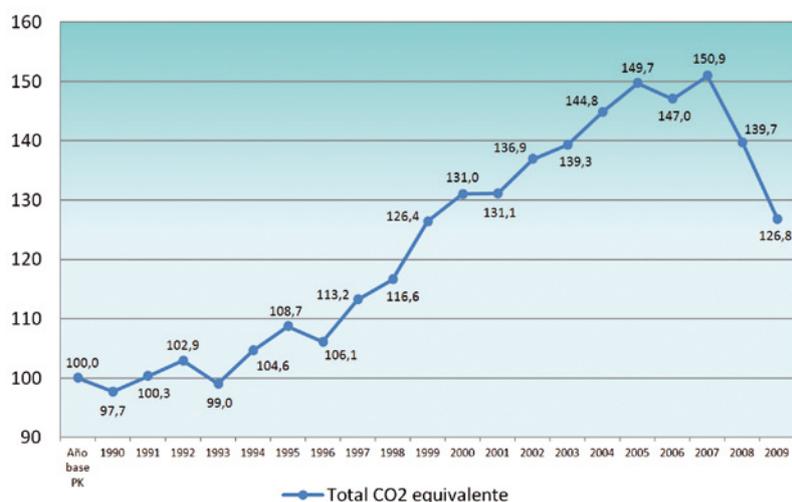


Figura 6. Evolución de las emisiones de GEI expresadas en CO₂ equivalente (fuente: Inventario de emisiones de GEI 2011 MARM)

No todos los sectores contribuyen por igual a dicha evolución. La proyección del reparto en el inventario nacional entre emisiones imputables a sectores difusos (transporte; residencial, comercial e institucional; agrario; residuos y gases fluorados) y a los sectores industrial y energético refleja, para el quinquenio 2008-2012, una tendencia al crecimiento más acentuada en los sectores difusos, en concreto en el transporte y en el residencial.

Uno de los objetivos marcados en esta estrategia para el sector Residuos es el “*Impulso prioritario a la reducción de los residuos y el aprovechamiento de las materias en ellos contenidas, así como la biometanización y recuperación de biogás en vertederos*”. Para su consecución, entre otras, se establecen las siguientes medidas:

- Incentivar la aceleración de planes autonómicos y locales en materia de vertederos controlados, apoyando el establecimiento de instalaciones de tratamiento que incluyan entre sus procedimientos los de biometanización y recuperación de biogás.
- Clausurar, sellar y restaurar los vertederos incontrolados.

Según los datos incluidos en el Inventario de GEI de España, edición 2011, la evolución de las emisiones de GEI en España para los diferentes sectores de actividad (según categorías IPCC) son los que se muestran en la Tabla 3. Estos índices de variación temporal han tomado como base 100 para el año 1990.

Índice de evolución anual (año 1990 = 100)								
SECTOR	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009
1. Procesado de la energía	100,0	113,9	136,5	163,2	158,4	163,1	150,4	134,7
2. Procesos industriales	100,0	103,3	131,2	130,3	133,2	132,3	122,8	104,0
3. Uso de disolventes y otros productos	100,0	129,3	139,9	151,7	156,2	154,3	148,0	141,1
4. Agricultura	100,0	96,9	116,6	107,8	109,7	112,4	102,4	102,6
6. Tratamientos y eliminación de residuos	100,0	128,5	159,9	180,7	188,5	196,1	205,0	212,6
Total sectores	100,0	111,2	134,0	153,2	150,4	154,4	142,9	129,8

En el grupo de “Tratamiento y eliminación de residuos”, que incluye depósito en vertederos, tratamiento de aguas residuales, incineración de residuos y otros, se registra una evolución creciente a lo largo de los años. Este incremento está en parte determinado por el afloramiento de mayores cantidades de residuos tratados en vertederos, incluidos los rechazos del proceso de afino del compost. En la Figura 7, se puede observar dicho crecimiento en función de cada una de las categorías establecidas en este grupo.

El desplazamiento temporal característico de la degradación de los residuos en vertedero provoca la tendencia al alza de las emisiones del depósito de residuos en vertederos, a pesar de las medidas alternativas adoptadas para la eliminación de residuos y de las técnicas implantadas para la captación del biogás generado.

Aunque actualmente se está haciendo un importante esfuerzo por fomentar la captación de biogás, la información registrada en el inventario de emisiones de GEI (2011) refleja un estancamiento en los últimos años de los volúmenes de captación, lo que se traduce en un aumento relativo de la cantidad de biogás generado que no ha sido captado respecto a la cantidad de biogás captado (véase Figura 8).

Tabla 3. Inventario de emisiones de GEI – Año 2011 (MARM)

2. Emisiones GEI en vertederos europeos

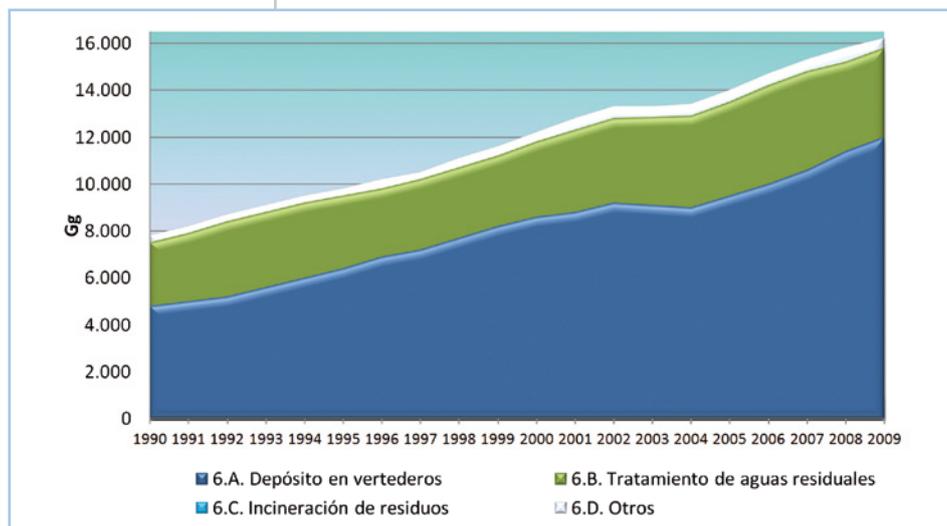


Figura 7. Evolución de las emisiones de CO₂ equivalente en el sector de los residuos. Inventario 2011.

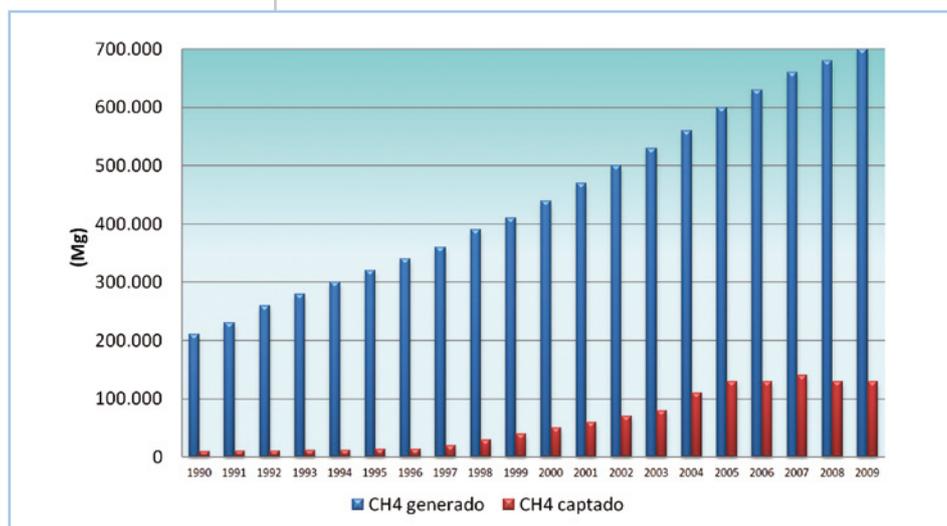


Figura 8. Comparación Generación vs Captación. Periodo 1990 - 2009

En todo caso, es necesario subrayar que las emisiones procedentes de la valoración energética del biogás se encuentran incluidas en el sector de la Energía, contabilizándose en el sector Residuos únicamente la parte de la incineración de residuos que no se valoriza energéticamente.

2.2. Alemania

Alemania se ha comprometido a reducir los gases de invernadero un 21% con respecto al año 1990 para el periodo 2008-2012 dentro del acuerdo de la UE. Sin embargo, su objetivo a largo plazo, para 2020, es alcanzar una reducción del 40% de los GEI respecto a 1990. Para ello ha desarrollado una estrategia integrada de energía y clima con un triple objetivo: seguridad energética, eficiencia económica y mitigación del cambio climático. La estrategia comprende 29 medidas costo-eficientes y 14 nuevas normas legales basadas principalmente en la eficiencia energética y las energías renovables.

En comparación con el resto de países europeos, el peso relativo de los GEI derivados del sector residuos respecto del total es reducido, representando un 1,1% según el informe "Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009", realizado por la Agencia Europea de Medio Ambiente. Esto se debe al avanzado estado de las políticas de gestión de residuos de Alemania, que hace ya tiempo apostaron por la valorización frente al vertedero, tal y como puede verse en la Figura 9 y en la Figura 10.

Figura 9. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Alemania. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009-EEA

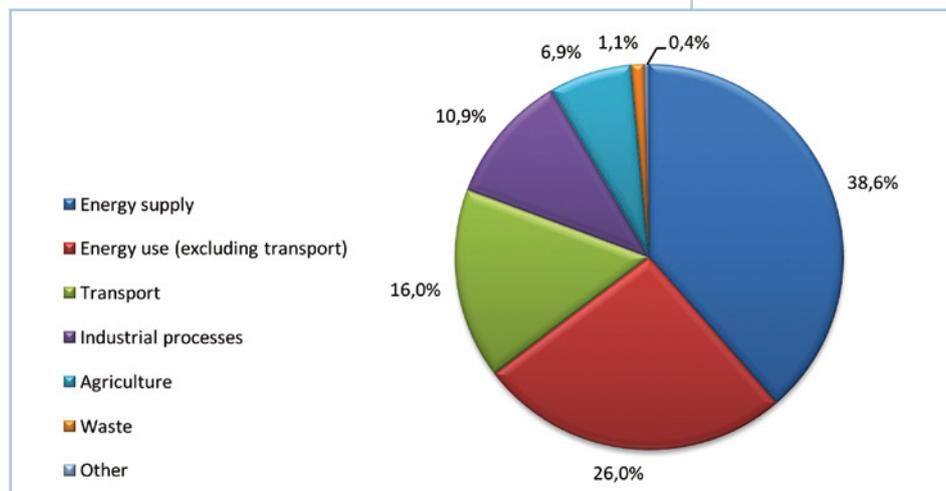
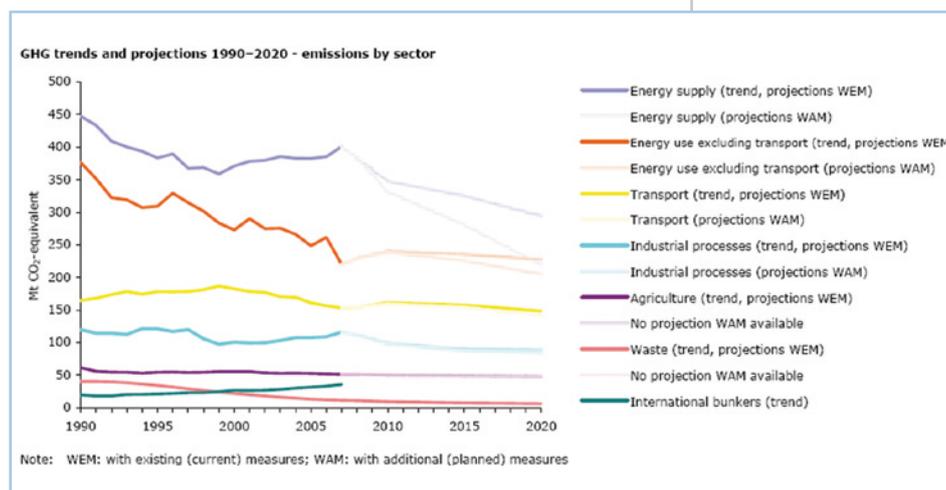


Figura 10. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEI por sectores en Alemania. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009-EEA



Esta tendencia a reducir el uso de los vertederos puede observarse al analizar la publicación sobre estadísticas de residuos del Instituto Estadístico Alemán: en el año 2000, existían en Alemania 2.228 vertederos, a los que llegaron 63.060.000 toneladas de residuos, mientras que en 2008 existían 1.645 vertederos activos (de los cuales 269 eran de residuos peligrosos), que recibieron 41.598.600 toneladas de residuos, es decir, sólo un 24% del total de los residuos generados en Alemania.

De los vertederos anteriormente citados, sólo 230 están afectados por el Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Su distribución en el país puede observarse en la Figura 11:

Figura 11. Situación de los vertederos en Alemania. Fuente: Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Comisión Europea, 2010.



2. Emisiones GEI en vertederos europeos

En lo referente al aprovechamiento del gas de vertedero, en la actualidad existen 243 instalaciones en el país, que recogieron 537.000.000 m³/h de gas con una riqueza media en metano del 49%. El uso de dicho biogás ha sido en un 56% de los casos para generación de calor o electricidad en el propio vertedero, en un 36,2% para generación y venta de electricidad a la red, un 4% ha sido quemado en antorcha y el restante ha sido destinado a otros usos. Es destacable que la producción de gas de vertedero ha ido decreciendo desde los años 90, principalmente por la reducción de la cantidad de residuos destinados a este tipo de instalación (ver Figura 10). Como ejemplo, mencionar que en 2004 se recogieron 668.300.000 m³/h de gas de vertedero.

El aprovechamiento del gas de vertedero fue identificado como una de las medidas con mejor relación coste/eficiencia recogidas en la Estrategia Alemana de Cambio Climático. Para potenciarlo optaron por utilizar el mercado, tal y como recoge "The Integrated Energy and Climate Programme of the German Government" y amplía el "Report on implementation of the key elements of an integrated energy and climate programme adopted in the closed meeting of the Cabinet on 23/24 August 2007 in Meseberg". Así, la normativa para la gestión del gas natural fue modificada con el fin de facilitar que el biogás de vertedero pudiera ser directamente inyectado en la red de distribución. Se estimó que el biogás producido puede suplir de esta forma el 6% del gas natural consumido en Alemania para 2020, alcanzando una cuota del 30% para 2030.

Por otra parte, en cuanto a buenas prácticas para evitar la emisión de gas de vertedero, el documento "Evaluation of waste policies related to the Landfill Directive. Germany" identifica las siguientes, que ya vienen siendo utilizadas en el país desde el final de la década de los 80:

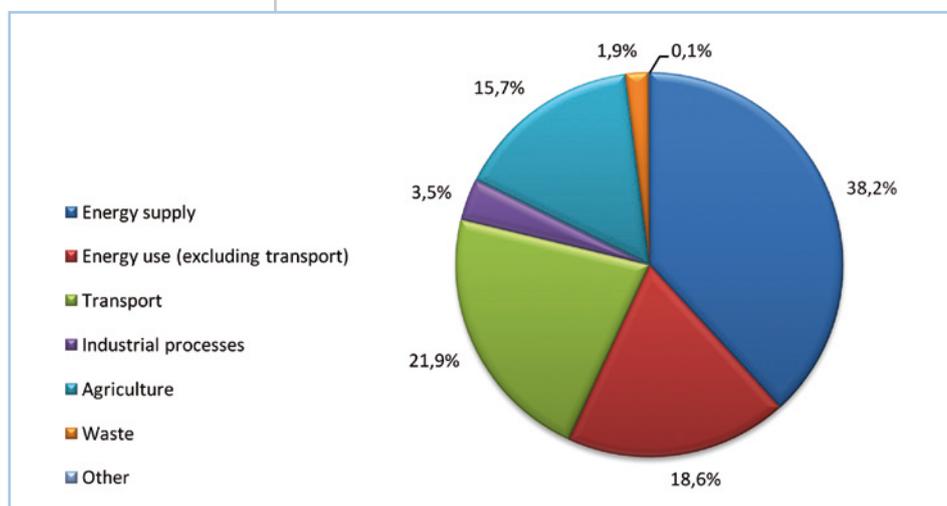
- Localización apropiada del vertedero.
- Sellado de fondo, incluyendo un sistema de drenaje de lixiviados.
- Depósito de residuos lo más inertes posibles.
- Sellado superior, incluyendo extracción de gas.
- Control del uso del suelo después del cierre del vertedero, monitorización y mantenimiento.

2.3. Dinamarca

La Estrategia Climática del Gobierno de Dinamarca establece una reducción de GEI a 2012 de 21% respecto a 1990, lo que significa una reducción anual de 25 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Mientras que la mitad de esta reducción deberá ser realizada por las empresas reguladas

por el Régimen de Comercio de Emisiones, la otra mitad deberá centrarse en los sectores difusos. De acuerdo con el informe "Greenhouse gas emissions: trends and projections in Europe 2009", realizado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, en la actualidad la gestión de residuos y aguas residuales suponen un 1,9% de las emisiones de GEIs totales en Dinamarca (ver Figura 12).

Figura 12. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Dinamarca.

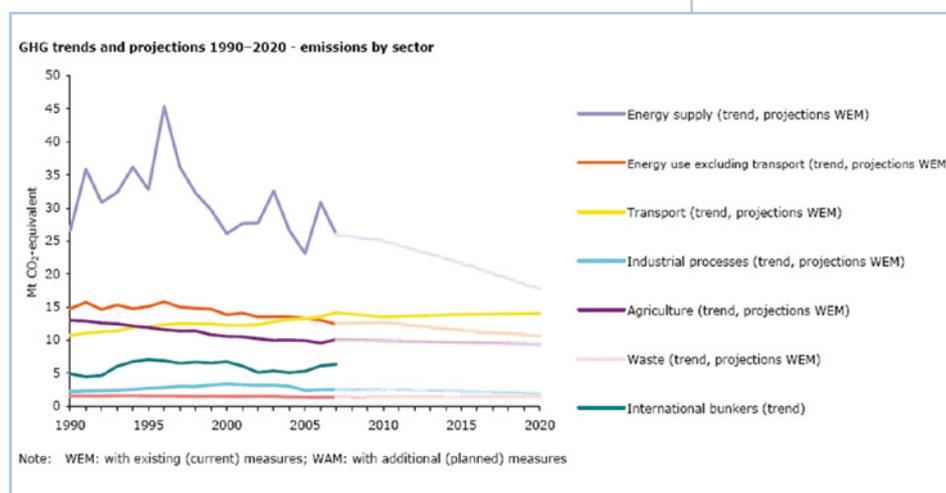


Como dato comparativo, destacar que en 2002 sólo los GEI de los vertederos suponían el 1,9% de las emisiones totales.

Según el informe, la tendencia en este ámbito desde 1990 es positiva, con una reducción progresiva de GEI (ver Figura 13). Los principales motores de esta tendencia son la reducción del volumen de residuos eliminados en vertederos, las mejoras en la gestión del gas de vertedero y en las plantas de tratamiento de aguas.

La principal apuesta de la Estrategia de Residuos de este país está enfocada a aumentar la fracción destinada a la valorización, reduciendo todo lo posible los residuos que son eliminados en vertederos. Esto significa que todos los residuos no reciclables que pueden valorizarse energéticamente, deben someterse a este tratamiento.

Figura 13. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEI por sectores en Dinamarca.



De esta forma se ha reducido drásticamente la cantidad de material biodegradable que se envía a vertedero, por lo que el gas de vertedero generado también se ha reducido considerablemente. Sin embargo, se considera que aún existe potencial para la reducción de emisiones de GEI mediante actuaciones en los vertederos ya existentes.

Para desarrollar la línea de actuación relativa a la reducción de emisiones de GEI mediante la mejora de la gestión de gases de vertedero, el Ministerio de Medio Ambiente de Dinamarca desarrolló en 2005 el estudio "Optimización de la gestión del gas de vertedero en Dinamarca", con el objetivo de optimizar la extracción de gas de vertedero en las instalaciones existentes y de incrementar el número de vertederos con plantas de extracción de biogás.

A fecha de 2004, existían en Dinamarca 26 vertederos con plantas de recuperación de biogás en un rango entre 30 y 700 m³/h y con un volumen total de biogás recuperado de 24.000.000 m³. El uso final del biogás es la producción de electricidad (36.000 MWh), producción de calor (38.000 MWh) o cogeneración.

Durante el desarrollo de dicho estudio se visitaron 14 de las 26 citadas instalaciones, con las siguientes sugerencias de mejora de las plantas de recuperación de biogás.

- En muchas ocasiones, cuando baja la calidad del biogás por debajo de porcentajes umbrales de metano, las plantas de recuperación se paran durante horas o hasta días, esperando a una mejora de la calidad del biogás. El resultado de esta práctica es que durante el tiempo de parada el gas es emitido a la atmósfera. Por ello se propuso utilizar motores estilo Dual-Fuel, que pueden utilizar una mezcla de diesel y biogás, lo que evitar tener que parar el motor cuando baja la calidad del biogás.
- En algunos vertederos, la calidad del biogás puede variar en función de la zona de producción.

2. Emisiones GEI en vertederos europeos

En esos casos se propone establecer sistemas de recogida diferenciados por zonas, de forma que se evite mezclar el biogás de buena calidad con el de mala calidad, destinando cada tipo a su uso más adecuado.

- Establecimiento de un mayor número de pozos de recogida de biogás.
- Extracción del biogás existente en el sistema de tratamiento de lixiviados.
- Evacuación del agua que puede quedarse en los pozos, dificultando la extracción del gas.
- Instalación de trampas de condensado en los puntos bajos de las tuberías de gas, para evitar la acumulación del mismo.
- Instalación de caudalímetros en las tuberías de gas de cada pozo.
- Calibración de los analizadores de gas y de los caudalímetros.

Basándose en las premisas descritas anteriormente, el estudio *"Cost-effective interventions in the non-ETS sectors"* establece que el desarrollo de dichas medidas en 6 instalaciones existentes de recuperación de biogás y la implantación de nuevas instalaciones de recuperación de biogás en otros 9 vertederos tiene un potencial de reducción de emisiones de 60.000 toneladas al año durante el período 2008-2012. Sin embargo, para apoyar el desarrollo de estas medidas sería necesario implantar un esquema de subvenciones.

La Directiva 166/2006/EC relativa al Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (PRTR) exige que todos los vertederos que reciben más de 10 t/día de residuos o con una capacidad total superior a 25.000 t deben calcular sus emisiones y hacerlas públicas. La norma afecta a 52 instalaciones en Dinamarca, tal y como puede observarse en la Figura 14.



Figura 14. Situación de los vertederos en Dinamarca. Fuente: Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Comisión Europea, 2010.

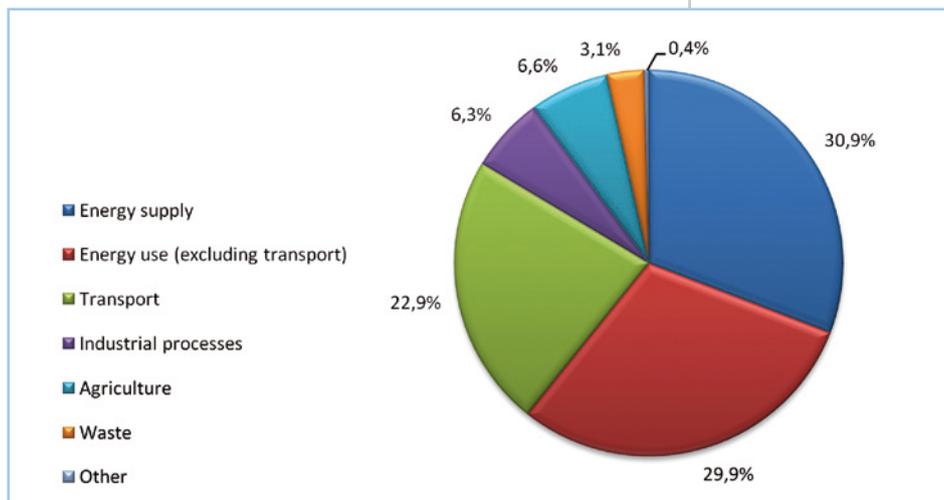
Para estandarizar el procedimiento de cálculo, la Agencia de Protección del Medio Ambiente y la Universidad Técnica de Dinamarca han publicado en 2010 una metodología común, "Metodología para la estimación de emisiones de los vertederos de Dinamarca para el PRTR" que recoge dos métodos con diferente grado de detalle para el cálculo de las emisiones en vertederos, con especial atención al metano.

2.4. Italia

El objetivo de reducción de gases de efecto invernadero en Italia para el período 2008-2012 es del 6,5% menos que en el año 1990.

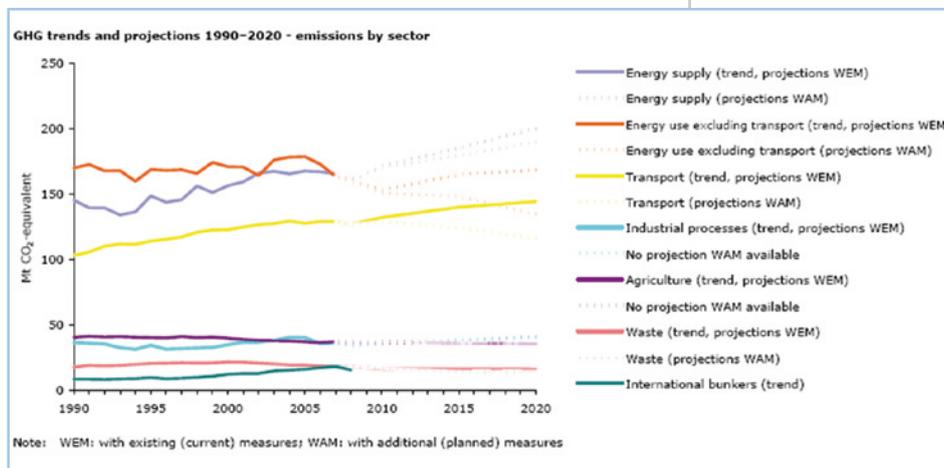
De acuerdo con el informe "Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009", realizado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, en la actualidad la gestión de residuos y aguas residuales suponen un 3,1% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero en Italia, tal y como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Italia. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009-EEA.



En la Figura 16 se puede apreciar la tendencia de las emisiones de GEI para cada sector en Italia.

Figura 16. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEI por sectores en Italia. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009-EEA.



Como se puede observar, en el sector residuos la tendencia es que las emisiones se mantendrán constantes o se reducirán levemente.

La gestión de los residuos en Italia ha experimentado un cambio estructural desde principios de los años 90, cuando los vertederos eran la única opción de eliminación de los residuos en la mayoría de las regiones del país. Apenas existían plantas de reciclaje de residuos y la incineración únicamente estaba presente en las regiones de Lombardía, Emilia Romagna, Toscana, Cerdeña y Liguria.

Debido a la influencia de las nuevas leyes nacionales y europeas sobre gestión de residuos, la tendencia al depósito de los residuos en vertedero ha ido decreciendo paulatinamente hasta situarse en un 54% en 2004, como se puede apreciar en la Tabla 4. De la misma manera, también han aumentado los materiales que se reciclan y el número de instalaciones de incineración, aunque a un ritmo más lento.

2. Emisiones GEI en vertederos europeos

Tabla 4. Cambios en el destino de los residuos en Italia.

	1993	2004
Landfill	85%	54%
Incineration	7%	11%
MBT + RDF	6%	22%
Recycling and composting	2%	13%
Total MSW disposed (tonnes)	23,000,000	30,000,000

(Nota: MBT => Tratamiento Mecánico-Biológico; RDF => Combustibles Derivados de Residuos)

Sin embargo, este cambio en la política de gestión de residuos todavía no ha dado lugar a una disminución de las emisiones de metano de los vertederos, que por el contrario, han aumentado un 10,5% entre 1990 y 2004, principalmente por el aumento de la cantidad de residuos que se tratan de forma anaeróbica y el desfase temporal existente entre el depósito de residuos en vertedero y la emisión de metano.

En la Tabla 5 en la que se presenta el escenario previsto para el 2020 en cuanto al metano generado en vertedero, la cantidad recogida y la emitida.

Tabla 5. Emisiones históricas y estimaciones de emisión de CH₄ en vertederos Italianos. Fuente: Italian report on demonstrable progress under article 3.2 of the Kyoto Protocol

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Total CH ₄ generated by municipal landfills	797.7	968.4	1092.5	1125.1	985.2	908.9	838.9
Amount of CH ₄ which is collected	164.7	217.2	279.7	439.5	504.8	507.3	510.2
CH ₄ emissions from municipal landfills	633	751.2	812.7	685.6	480.4	401.5	328.7

Como se puede apreciar, el total de metano generado se reducirá en la próxima década, manteniéndose estable la cantidad de metano valorizado energéticamente, por lo que el metano emitido a la atmósfera disminuirá de forma progresiva.

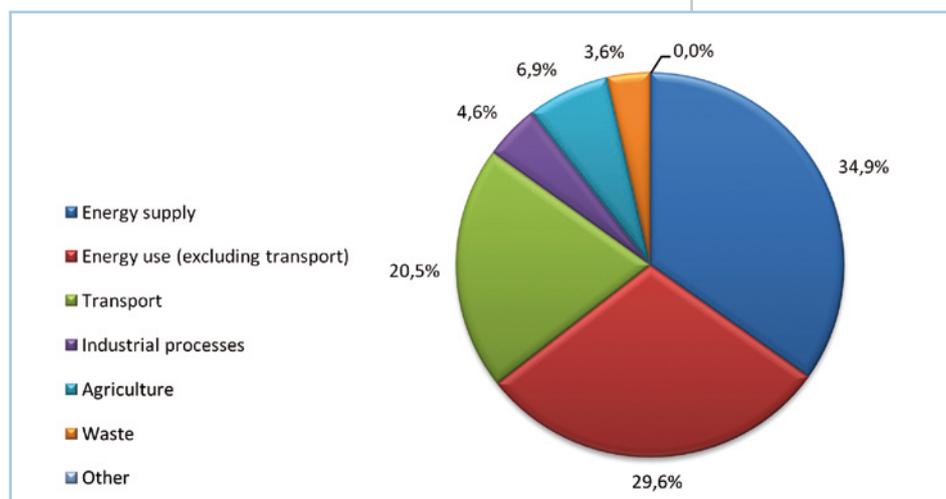
2.5. Reino Unido

Reino Unido es uno de los países europeos más avanzados en materia de cambio climático, al contar desde 2008 con una ley que establece obligaciones legales en cuanto a mitigación, adaptación, monitorización e información sobre cambio climático (*Climate Change Act*). En cuanto a mitigación, la ley establece unos objetivos específicos muy ambiciosos: reducir la emisión de GEI en 2050 en un 80%, alcanzando para 2020 una reducción mínima del 26%.

De acuerdo con el informe "*Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009*" (Emisiones y proyecciones de GEI en Europa), realizado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, en la actualidad la gestión de residuos y aguas residuales suponen un 3% de las emisiones totales de GEI en el Reino Unido (ver Figura 17).

En el caso concreto de Inglaterra, la cuota del sector residuos asciende a 3,7%, de la cual el 77,6% proviene de vertederos, lo que implica que los vertederos ocupan la 6ª posición en el ranking de fuentes emisoras de GEI, por delante de la agricultura, las refinerías y la industria del acero. En el total del Reino Unido, los vertederos produjeron la emisión de 966.110 toneladas de CH₄ en 2008.

Figura 17. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Reino Unido. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009- EEA

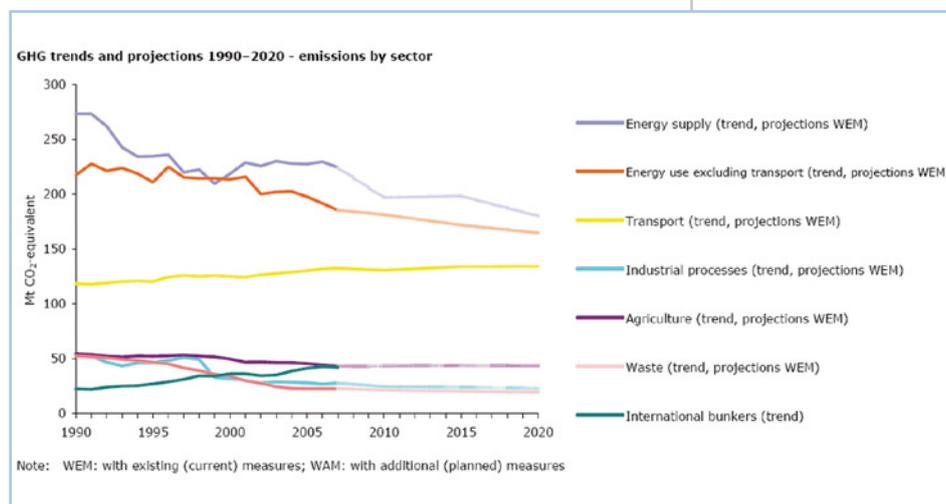


Summary of Main Emission Sources, England 2008 (kt CO ₂ e)				
Rank	Sector Name	IPCC code	Emission	Percentage of total GWP Weighted Emissions
1	Power stations	1A1a	139943	28,9
2	Road Transport	1A3b	97373	20,1
3	Residential Combustion	1A4b	64004	13,2
4	Other Industrial Combustion	1A2f	48037	9,9
5	Commercial and Institutional Combustion	1A4a	18720	3,9
6	Landfill	6A1	15629	3,2
7	Agricultural Soils	4D	15958	3,3
8	Iron and Steel	1A2a	11943	2,5
9	Refineries	1A1b	10251	2,1
10	Enteric fermentation - Cattle	4A1	6607	1,4

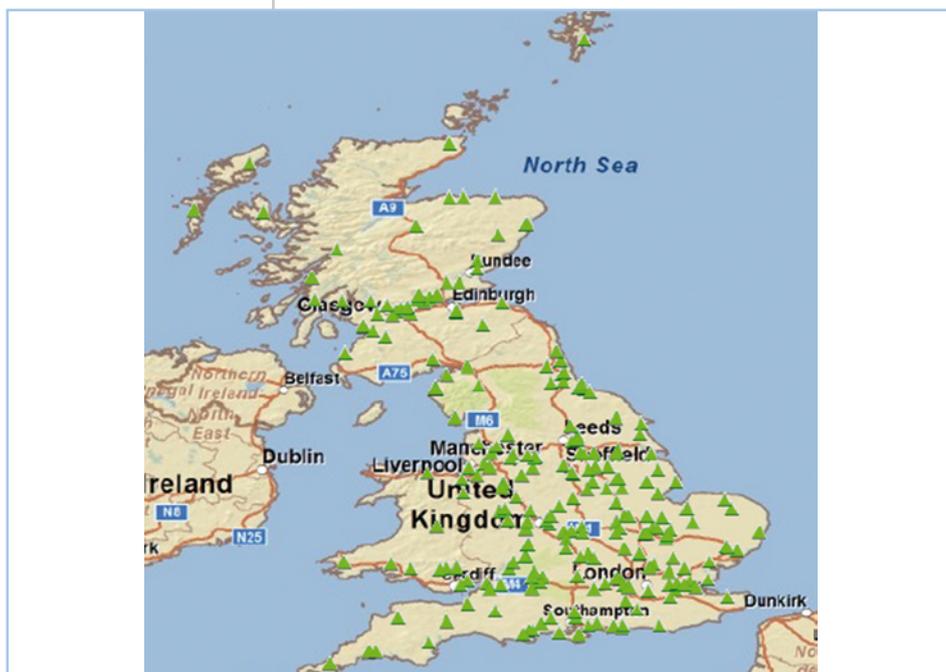
Tabla 6. Resumen de las principales fuentes de emisión en Inglaterra en 2008. Fuente: Greenhouse Gas Inventories for England, Scotland, Wales and Northern Ireland: 1990 – 2008 Report –AEA.

Como se puede ver en la Figura 18, desde 1990 las emisiones relacionadas con el sector residuos se han reducido en un 57%, principalmente por la implantación de sistemas de recuperación de biogás en los vertederos, aunque desde 2004 las emisiones del sector se han estabilizado.

Figura 18. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEIs por sectores. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009- EEA



2. Emisiones GEI en vertederos europeos



En el Reino Unido existen 237 vertederos afectados por la Directiva 166/2006/EC relativa al Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (PRTR). Su distribución geográfica puede observarse en la Figura 19.

Figura 19. Situación de los vertederos en Reino Unido. Fuente: Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Comisión Europea, 2010.

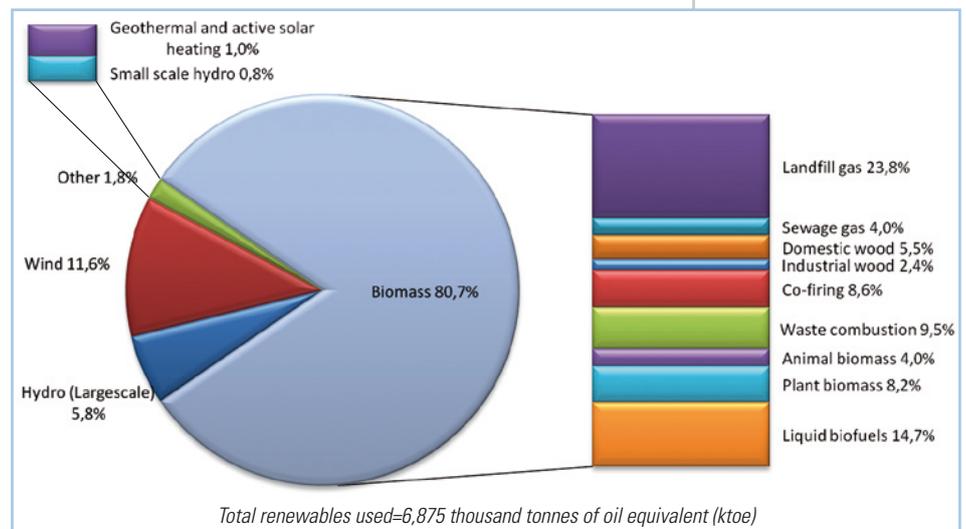
Para reducir las emisiones de GEI de los vertederos, el Reino Unido ha avanzado en dos direcciones. Por un lado, el desvío de residuos que en el pasado iban a vertedero hacia operaciones de valorización; y por otro lado, la mejora de la gestión del gas de vertedero. Recientemente, el Departamento de Energía y Cambio Climático del Gobierno británico ha renovado su apuesta por estas dos direcciones, al incluirlas en la política de residuos de su *“Low Carbon Transition Plan”* (Plan para una transición hacia un desarrollo bajo en carbono).

Para fomentar las operaciones de valorización, el Reino Unido ha desarrollado dos importante herramientas de índole económica: por una parte un sistema de comercio de derechos de eliminación de residuos en vertedero (denominado *“cap and trade”*), que permite a los municipios comprar y vender derechos, y que establece sanciones para los municipios que superan los derechos que les han sido asignados. Por otro lado, se ha fijado una tasa de vertedero que se incrementa cada año en 3 libras esterlinas (3,5 euros) por tonelada de residuo eliminado en vertedero, hasta que alcance su valor de diseño: 35 libras (41 euros) por tonelada. Estas medidas han servido para que, por ejemplo en Inglaterra, se hayan reducido los residuos eliminados en vertedero en un 19% entre 2001 y 2006.

Con el fin de mejorar la gestión del gas de vertedero a través del mercado, el Reino Unido ha decidido incluirlo dentro del esquema de *“Obligaciones de renovables”*. Este esquema obliga a los productores de energía a producir una cuota mínima de energías renovables a través de certificados de obligaciones de renovables (ROCs en sus siglas en inglés), asignando a cada tipo de energía un número concreto de ROCs. Así, por cada MWh producido utilizando biogás, la compañía eléctrica obtiene 0,25 ROCs (como dato comparativo, decir que la energía eólica obtiene 1 ROC por MWh producido).

La distribución de energías renovables entre las distintas fuentes en 2009 puede observarse en la Figura 20, representando la energía producida a partir de gas de vertedero un 23,8% del total. En términos absolutos, el gas de vertedero supuso, en 2009, 1.637 ktep, de los cuales 1.624 ktep se utilizaron en la producción de electricidad.

Figura 20. Distribución de la producción de energías renovables en UK en 2009 por fuentes. Referencia: Digest of UK Statistics 2010.



Desde un punto de vista más técnico, para actuar directamente sobre los sistemas y equipos de gestión del biogás en la fase de diseño del vertedero, la Agencia de Medio Ambiente de Inglaterra (*Environmental Agency-EA*) publicó entre 2002 y 2004 una colección de documentos en los que establece las mejores prácticas para la gestión y monitorización de gases de vertedero, necesarias para dar cumplimiento a la Directiva Europea de Vertederos 1999/31/EC:

- *Guidance on the management of landfill gas* (Guía para la gestión del gas de vertedero).
- *Guidance for monitoring trace components in landfill gas* (Guía para la monitorización de componentes traza en el gas de vertedero).
- *Guidance on landfill gas flaring* (Guía para la combustión en antorcha del gas de vertedero).
- *Guidance for monitoring enclosed landfill gas flares* (Guía para la monitorización de antorchas del gas de vertedero).
- *Guidance for monitoring landfill gas engine emissions* (Guía para la monitorización de emisiones de motores del gas de vertedero).
- *Guidance for monitoring landfill gas surface emissions* (Guía para la monitorización de emisiones superficiales del gas de vertedero).
- *Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines* (Guía sobre las tecnologías de tratamiento para motores del gas de vertedero).

La parte C del documento *Guidance on the management of landfill gas* identifica las mejores prácticas para reducir las emisiones de GEI de las siguientes fuentes en fase de diseño:

- Residuos recién depositados.
- Residuos sin sellar correctamente.
- Excavaciones y trabajos de ingeniería en el vertedero.
- Lixiviados y tratamiento de lixiviados.
- Recogida de residuos y transporte.
- Grietas, fisuras y agujeros en el sellado.

2. Emisiones GEI en vertederos europeos

- Migración lateral del gas a través de capas geológicas permeables.
- Utilización in situ de antorchas y motores de biogás.
- Emisiones en las juntas del sistema de recogida de gas.

En lo relativo a actuaciones sobre vertederos existentes, es necesario mencionar que éstas se encuentran entre las prioridades de la EA, ya que de los sectores sobre los que este organismo tiene competencias, los vertederos representan el más significativo en términos de emisiones. Por ello, en los últimos años su planificación ha incluido las siguientes actuaciones:

- Auditorias: Entre 2008 y 2009, la EA auditó 14 de los 15 vertederos más relevantes en activo. Este ejercicio permitió reducir las emisiones en 19.000 toneladas de metano. Entre 2009 y 2010 estaba planificado realizar auditorias a otros 30 vertederos activos y empezar las auditorias en vertederos inactivos.
- Promoción de la acción local en materia de reducción de emisiones de GEI en vertederos: la EA coordinó un *lobby* para obtener más recursos económicos para la investigación sobre la reducción de las emisiones de GEI en vertederos.
- Inclusión de un compromiso de reducción de GEI en vertederos más allá del escenario tendencial en el *"Low Carbon Transition Plan"* (Plan para una transición hacia un desarrollo bajo en carbono) del Departamento de Energía y Cambio Climático, publicado en 2009.
- Propuesta de inclusión de un indicador de metano en la evaluación de la acción local (*"National Indicator 186 of the Local Performance Framework"*).
- Actitud ejemplarizante: auditoria de los cuatro vertederos propiedad de la EA y verificación de que las emisiones de GEI son despreciables.
- Promoción de líneas de I+D+i en tecnologías de reducción de CH₄ en vertederos: se ha realizado un proyecto de demostración en dos emplazamientos para un nuevo tipo de antorcha para quemar gas de vertedero con bajas concentraciones de metano. Por otra parte, se está investigando una tecnología para descomponer el metano en CO₂ y agua mediante sistemas biológicos.

3. Estimación de la producción de biogás en vertederos



3. Estimación de la producción de biogás en vertederos

La formación de metano, como parte del proceso de descomposición de las materias fermentables contenidas en los residuos, se ve influida por numerosos factores de difícil control y estimación. A continuación se enumeran algunos de los condicionantes que influyen en la producción de metano y consecuentemente en el biogás de vertedero:

- Fracción biodegradable existente en los residuos depositados en vertedero, incluyendo materia orgánica, papel, restos de jardín y poda, madera y paja.
- Período de descomposición de cada uno de los residuos (vida media). La vida media está afectada por una amplia variedad de factores relacionados con la composición de los residuos, especialmente las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra situado el vertedero y las características del vertedero (cantidad de residuos depositados, humedad del lugar, temperatura, etc.).
- La técnica de explotación del vertedero es también importante, ya que aspectos tales como si la realización de recubrimientos intermedios, el espesor, la cobertura inmediata o diferida de la masa de residuos y el sellado final condicionan la mayor o menor proliferación de bacterias y, por consiguiente, la generación de biogás.
- Antigüedad de los residuos depositados en el vertedero. Como resulta lógico, a mayor antigüedad de los residuos, la producción de biogás disminuye considerablemente. Normalmente la producción de biogás se corresponde con este tipo de gráfica:

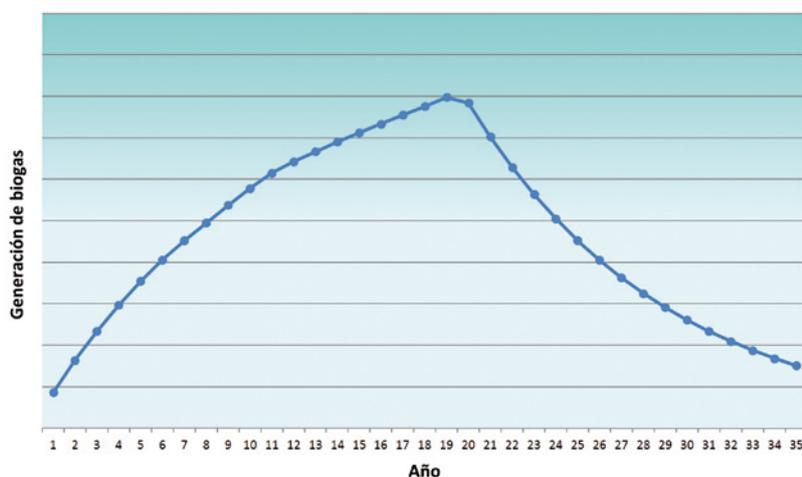


Figura 21. Modelo de curva de generación de biogás en vertederos.

De todo ello se deduce que las emisiones de CH_4 generadas por los residuos eliminados en un vertedero son más altas durante los primeros años siguientes a la deposición de los residuos y que, posteriormente, éstas decaen a medida que el carbono degradable de los desechos es consumido por las bacterias responsables de la descomposición.

En los residuos urbanos existe materia orgánica fácilmente degradable y materia orgánica que se degrada lentamente. La materia orgánica fácilmente degradable se descompone en 5 años y alcanza la tasa máxima de producción de gases el primer año, mientras que la materia orgánica lentamente degradable se descompone en 15 años y alcanza su tasa máxima de producción de gases el quinto año.

- Presencia de sustancias inhibitorias de algunas reacciones químicas del proceso de degradación o materiales inertes.

Por otro lado, la captación del biogás en el vertedero también se verá influida por otros condicionantes tales como:

- Características constructivas de la red y elementos de captación de biogás (pozos, líneas, aspiración, etc.).
- Existencia de sellados intermedios.
- Áreas de migración no cubiertas por la red de captación.
- Eficacia del sellado superficial.
- Condiciones atmosféricas.

Se debe tener en cuenta que los cálculos teóricos son importantes, entre otros aspectos, para hacer estimaciones sobre el comportamiento del biogás en el vertedero y para predecir las necesidades técnicas del sistema de captación y valorización energética. Sin embargo, no se debe obviar que los resultados derivan de la aplicación de modelos y que, en condiciones reales, interactúan infinidad de parámetros que pueden condicionar la producción de biogás.

Por este motivo, es conveniente contrastar los datos teóricos con campañas de medición *in situ* de composición y volumen del biogás en diferentes puntos del vertedero, para obtener una estimación de la cantidad de biogás acumulado, así como una idea de la distribución del gas en el vertedero (existencia de balsas de biogás, etc.).

A modo de aproximación y, teniendo en cuenta que existen una serie de variables y condicionantes locales que determinan la generación de biogás en los vertederos, algunos de ellos citados anteriormente, se pueden indicar una serie de valores de referencia:

1. Por cada tonelada de residuos eliminados en vertedero con un porcentaje de materia orgánica del 50% se podrían generar en torno a unos 200 m³ de biogás durante su degradación, compuesto en un 50% de metano.
2. La máxima captación de biogás en un vertedero se encuentra alrededor del 70% del total del biogás generado. Teniendo esto en cuenta, el tiempo de degradación para obtener los 200 m³ será de unos 20 años (80%). El resto se obtendrá en unos 50 años.
3. Rentabilidad de los proyectos: se estima viable un proyecto de generación de energía eléctrica cuando se utilizan motores superiores a 400 kWe de potencia (aproximadamente 240 m³/h) y cuando la distancia al punto de enganche no supera los 5 Km, debido a que el periodo de recuperación de la inversión suele ser inferior a 5 años. Con motores de menor potencia, el periodo de recuperación sería superior a 5 años y no resultaría rentable.

3.1. Ejemplos de producción y utilización de biogás en vertederos

A continuación se muestran datos de varios tipos de vertederos reales: en algunos de ellos se quema el biogás, mientras que en otros se genera energía eléctrica. Los datos mostrados corresponden a las principales variables necesarias para el cálculo teórico de la producción de biogás. No se incluyen los valores correspondientes a temperatura, humedad, etc. ni los valores que se toman por defecto para el cálculo.

Con estos ejemplos se intenta orientar sobre la posible producción y valorización energética de biogás en un vertedero en función de la cantidad de residuos eliminados, así como de su antigüedad y composición. Es necesario subrayar nuevamente que estos valores son orientativos y que la producción de biogás en un vertedero depende de gran cantidad de variables y condicionantes locales.

1. Vertedero A: quema de biogás en antorcha. La generación de biogás es insuficiente para realizar la valorización energética.

- Año de inicio de la explotación: 2002.
- Año de clausura de la explotación: actualmente en explotación.
- Año de sellado del vertedero e inicio de la desgasificación: 2005.
- Toneladas de RSU depositadas: 54.750 toneladas/año.
- Porcentaje de materia orgánica: no disponible.
- Producción de biogás: 126 m³/h (2010).

2. Vertedero B: quema de biogás en antorcha. La generación de biogás es insuficiente para realizar la valorización energética.

- Año de inicio de la explotación: 1985.
- Año de clausura de la explotación: 2004.
- Año de sellado del vertedero e inicio de desgasificación: 2010.
- Toneladas de RSU depositadas: 570.464.
- Porcentaje de materia orgánica: 56,9% aproximadamente.
- Producción de biogás: máxima producción en 2003 (296 m³/h), la producción en 2010 (año de sellado) fue de 150 m³/h.

3. Vertedero C: generación de energía eléctrica.

- Año de inicio de la explotación: 1976.
- Año de clausura de la explotación: actualmente en explotación.
- Año de inicio de la desgasificación: 1992.
- Toneladas de RSU depositadas: 6.727.000.
- Porcentaje de materia orgánica: 47% (2010).
- Producción de biogás: 597 m³/h (2010).
- Distancia a infraestructuras eléctricas: 500 m.

4. Vertedero D: generación de energía eléctrica.

- Año de inicio de la explotación: 1976.
- Año de clausura de la explotación: actualmente en explotación.
- Año de inicio de la desgasificación: 2001.
- Toneladas de RSU depositadas: 233.677 toneladas/año.
- Porcentaje de materia orgánica: no disponible.

- Producción de biogás: 661 m³/h (2010).
- Distancia a infraestructuras eléctricas: 25 Km.

5. Vertedero E: generación de energía eléctrica.

- Año de inicio de la explotación: 1992.
- Año de clausura de la explotación: actualmente en explotación.
- Año de inicio de la desgasificación: 1998.
- Toneladas de RSU depositadas: 130.000 toneladas/año.
- Porcentaje de materia orgánica: 59% (2010).
- Producción de biogás: 1.172 m³/h (2010).
- Distancia a infraestructuras eléctricas: 8 Km.

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas



4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

El biogás que se genera en diferentes instalaciones, como los vertederos de residuos sólidos urbanos, está considerado como un subproducto que contiene elevadas concentraciones de GEI (en concreto de CH₄ y CO₂). Se genera en grandes cantidades y, en muchos casos tras un mínimo tratamiento, se libera a la atmósfera o se quema en antorchas, con los consiguientes impactos ambientales.

Por ello, la recuperación y utilización de este biogás en su lugar de origen se contempla como una alternativa de gran interés, al conllevar el beneficio doble de la reducción de las emisiones de efecto invernadero y el aprovechamiento energético de un recurso valioso que puede permitir la generación propia y combinada de calor y electricidad (cogeneración) de un modo eficiente.

Además del metano y el dióxido de carbono, el biogás también está formado por determinadas impurezas en pequeñas proporciones. Estas impurezas y sus efectos se muestran en la Tabla 7:

Sustancia	Efecto
H ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión • Toxicidad • Formación de ácido sulfúrico
Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de condensados • Formación de soluciones ácidas
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de poder calorífico
Partículas	<ul style="list-style-type: none"> • Decantación, obturación
NH ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión

Tabla 7. Sustancias contaminantes en el biogás y sus efectos. Fuente: IDAE

Dependiendo del uso final que tenga el biogás, es necesaria una limpieza del combustible, más o menos exhaustiva, para eliminar H₂S, NH₃, agua y partículas sólidas, tal y como se muestra en la Tabla 8.

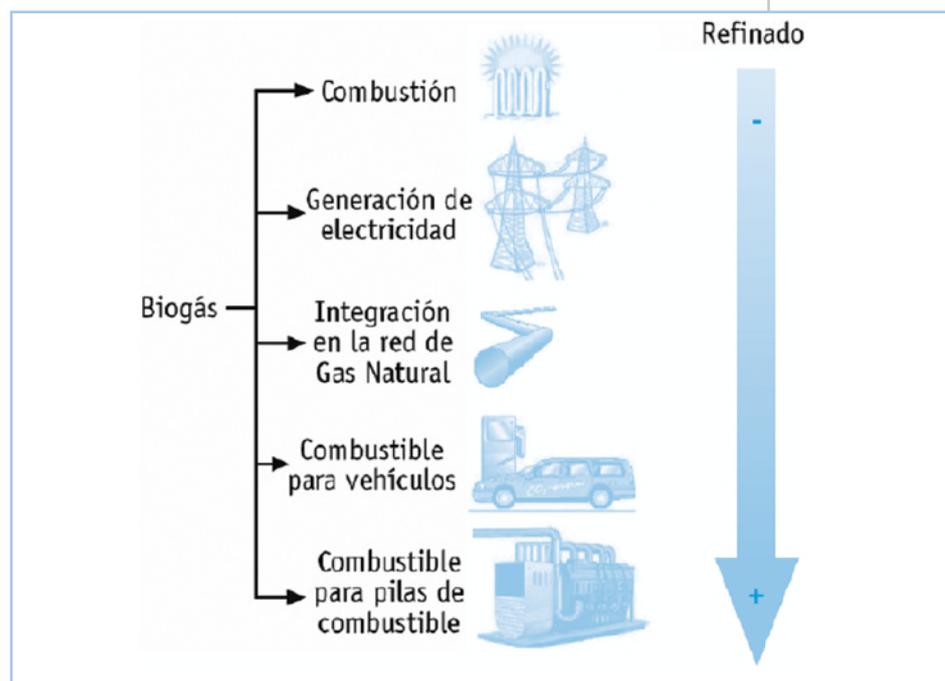
Usos del biogás	Eliminación de agua	Eliminación de dióxido de carbono	Eliminación de sulfuro de hidrógeno
Producción térmica en calderas	Parcial	No	No/Parcial/Elevado
Producción eléctrica y térmica en motores de cogeneración	Parcial/Elevado	No/Parcial/Elevado	Parcial/Elevado
Combustible para vehículos	Elevado	Elevado	Elevado
Red de gas natural	Elevado	Elevado	Elevado
Pilas de combustible	Elevado	Elevado	Elevado

Tabla 8. Nivel de tipo de tratamiento del biogás según su uso final. Fuente: IDAE

La purificación del biogás es de crucial importancia para garantizar el mejor rendimiento de los procesos de explotación de biogás y para reducir el impacto de las emisiones. Naturalmente, los tratamientos de purificación afectan a los costes de producción y consecuentemente al precio final de la energía generada.

Los métodos de depuración del biogás pueden clasificarse según diversos criterios, en función de la tecnología utilizada o según el contaminante a eliminar. El biogás debe ser depurado previamente en cualquiera de sus aplicaciones energéticas, pero los requerimientos en cuanto al refinado son mayores cuando se utiliza como combustible de vehículos, se inyecta en la red de gas natural o se usa en pilas de combustible, tal y como muestra la Figura 22.

Figura 22.
Diferentes tipos de aprovechamiento del biogás en función de su grado de depuración. Fuente: Colección de informes de vigilancia tecnológica madri+d.



Los métodos de depuración del biogás más comunes son:

- **Desulfuración:** es el proceso de depuración del biogás más habitual, ya que se encuentra presente en el diseño de todas las plantas. Existen tres tipos de desulfuración: microaerofílica, desulfuración biológica externa y por adición de sales férricas.

La desulfuración microaerofílica consiste en la inyección de pequeñas cantidades de aire en el espacio de cabeza del digestor donde se forman unas bacterias sulfooxidantes, que degradan el H_2S , dando lugar a azufre elemental.

En el caso de la desulfuración biológica externa, se hace pasar al biogás a través de un biofiltro con relleno plástico sobre el que se adhieren las bacterias desulfurizantes; también se elimina el NH_3 .

Por último, el proceso de adición de sales férricas consiste en añadir compuestos férricos al sustrato; de este modo se producen sulfatos insolubles que evitan la salida de azufre en forma de H_2S al biogás. Con este último método conviene ser muy cuidadoso porque se puede causar la corrosión de los materiales y una gran disminución del pH del proceso.

- **Deshumidificación:** es un proceso de reducción del agua presente en el biogás, por condensación. El gas pasa a través de unos tubos refrigerantes que condensan el agua. Existen otros métodos de deshumidificación menos habituales, como por ejemplo el filtrado del gas, el enfriamiento con agua a una temperatura de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, etc.
- **Eliminación de CO_2 :** en el caso en el que se utilice el biogás para cualquier otro proceso que no sea su valorización en motores de cogeneración, será necesaria la eliminación del dióxido de carbono. Los métodos posibles de eliminación de CO_2 del biogás son los siguientes: lavado con agua, lavado con disolventes orgánicos, filtración en carbón activo (el gas circula por el carbón activo, donde se retiene el CO_2), separación por membranas (proceso de alta efectividad) y separación criogénica de las materias según el punto de ebullición (proceso que en la actualidad se encuentra en desarrollo). Estos métodos se han enumerado en orden creciente en cuanto a su coste y eficiencia.

4.
Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

Todas las plantas de biogás deben estar equipadas con algún tipo de filtro para reducir la cantidad de partículas finas presentes en el biogás. Sin tratamiento alguno, el biogás sólo puede ser usado en su lugar de producción.

A continuación, se realiza una descripción de los diferentes sistemas de aprovechamiento de biogás que recogerá los aspectos técnicos, el grado de implantación del sistema y una valoración final.

4.1. Combustión

El biogás genera impactos sobre el medio ambiente, por lo que es necesario extraerlo del vertedero. Cuando la cantidad de biogás producido no es suficiente para realizar la valorización energética, se debe realizar la combustión sin aprovechamiento energético mediante una antorcha.

Descripción técnica

El proceso de combustión es muy simple: se realiza la extracción del biogás del vertedero y se conduce a un equipo donde se quema el biogás. En la Figura 23 se indican los pasos a seguir para realizar la combustión:

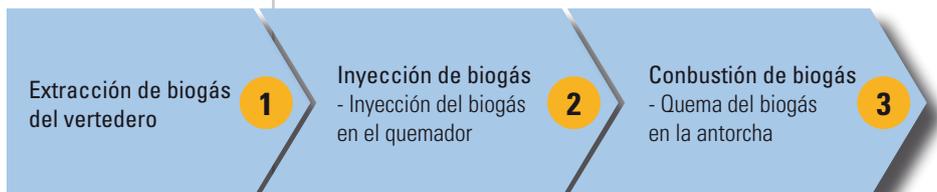


Figura 23. Esquema del proceso de combustión del biogás

El equipo utilizado para la quema de biogás es una antorcha. La elección de la antorcha se realiza en función de las características de biogás extraído (caudal, composición, etc.).



Foto 1: Antorcha de alta temperatura.

Grado de implantación del sistema

Este sistema se utiliza cuando no hay posibilidad de valorización energética del biogás. Normalmente, se realiza la combustión de biogás en vertederos pequeños con escasa producción de biogás.

Como se puede observar en la Figura 24, en 2006 existían en España 24 vertederos, de los cuales en el 13% del total se realizaba la quema de biogás en antorcha.

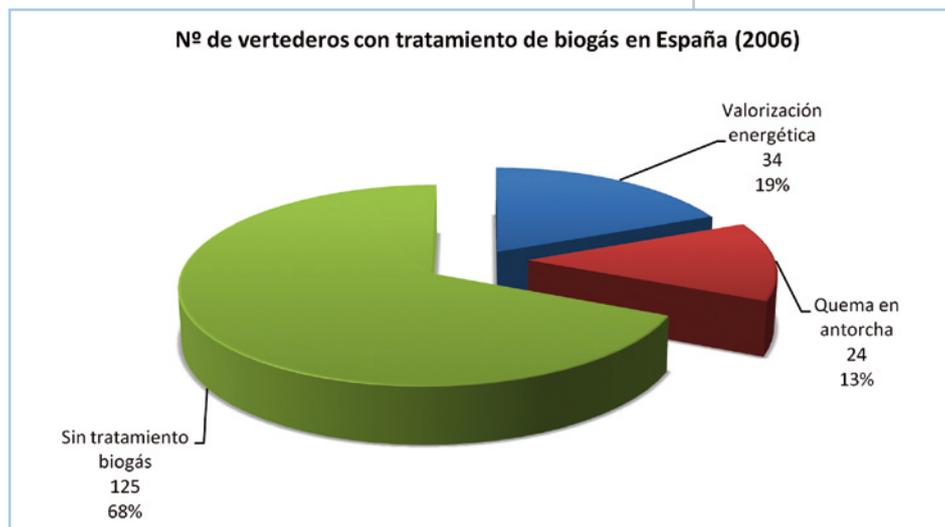


Figura 24. Número de vertederos por tratamiento del biogás en España (2006)

Valoración

Ventajas:

- Reducción de las emisiones de GEI.
- Bajo coste de la instalación.

Inconvenientes:

- Sin aprovechamiento energético del biogás.

4.2. Generación de energía térmica

Generalmente el volumen de biogás generado determina el mejor método de aprovechamiento del mismo. En el caso de volúmenes bajos se puede optar por utilizarlo como carburante en una caldera para la obtención de energía térmica.

Descripción técnica

El proceso al que se somete el biogás para la producción de energía térmica es el siguiente:

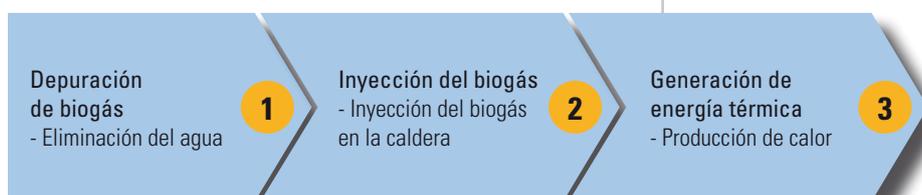


Figura 25. Esquema del proceso de generación de energía térmica

4.
Descripción de
los modelos de
reducción de
emisiones de GEI
en vertederos
españoles más
implantados.
Buenas prácticas

El biogás, al que previamente se le ha eliminado el agua, se inyecta en la caldera para generar calor. A continuación se muestra una fotografía de una caldera de biogás utilizada en vertederos.

Las calderas convencionales de gas pueden ajustarse para funcionar con biogás, modificando el ratio aire/gas. Se recomienda reducir los valores de H₂S por debajo de 1000 ppm y mantener el punto de rocío a 150 °C.



Foto 2: Caldera de biogás en un vertedero

La aplicación más habitual de la energía térmica generada en los vertederos es la evaporación de lixiviados. El calor generado permite la evaporación del agua contenida en los lixiviados, obteniendo como resultado una concentración de sales y otros contaminantes que pueden ser devueltos al sitio de relleno para su contención. Hasta un 97% del contenido de agua puede ser extraído con este método y el vapor es normalmente descargado a la atmósfera. Se requiere un control cuidadoso de la temperatura de evaporación para minimizar la evaporación de contaminantes junto con el vapor de agua descargado.

Grado de implantación del sistema

En España existen 4 vertederos que utilizan el biogás en plantas de secado de lixiviados. A continuación se muestran imágenes de una planta de secado de lixiviados.



Foto 3: Ejemplo de planta de secado de lixiviados

Valoración

Ventajas:

- Posibilidad de implantación en vertederos con poca producción de biogás.
- El biogás no debe someterse a exigentes procesos de purificación.
- Generación de calor para aprovechamiento en la propia planta.
- Posibilidad de utilizar calderas convencionales con pocas modificaciones.

Inconvenientes:

- Método menos eficiente que la cogeneración.

4.3. Generación de energía eléctrica

El aprovechamiento de la biomasa (en este caso el biogás) con fines energéticos ha sido y seguirá siendo una actividad con múltiples y diversas aplicaciones. En los últimos años las aplicaciones cuyo objetivo se centra en la generación eléctrica están incrementándose notablemente. En muchas de estas aplicaciones la piedra angular de las mismas es un motor capaz de aprovechar la energía disponible en un combustible, generado a partir de dicha biomasa, mediante procesos más o menos complejos.

Desde el punto de vista del motor, la complejidad de la valorización del combustible generado a partir de la biomasa depende principalmente de la composición del mismo (tanto de los componentes mayoritarios como, sobre todo, de los contaminantes que presenta el mismo), así como de su variabilidad.

Descripción técnica

El biogás puede ser utilizado como combustible en motores de combustión interna, diesel y gasolina, así como en turbinas a partir de los cuales se puede producir energía eléctrica por medio de un generador.

El proceso de producción de energía eléctrica en ambos casos es similar, ya que se realiza un tratamiento al biogás previo a su inyección en el motor/turbina. Posteriormente, se utiliza un generador para producir energía eléctrica.

A continuación se indica el proceso al que debe someterse el biogás.



Figura 26. Esquema del proceso de generación de energía eléctrica

El biogás producido se enfría durante su transporte hasta la planta de aprovechamiento, por lo que se debe eliminar el agua condensante contenida en el flujo de gas. Para ello, se utiliza un colector de condensados de gas. Una vez eliminado este agua, se realiza la depuración del biogás.

4.
Descripción de
los modelos de
reducción de
emisiones de GEI
en vertederos
españoles más
implantados.
Buenas prácticas

Los sistemas de depuración utilizados van a depender de las características del biogás exigidas por los fabricantes de motores y turbinas. Dependiendo de la elección de un equipo u otro, el biogás necesitará ser sometido a diferentes tratamientos.

Generación de energía eléctrica mediante la utilización de motores de combustión interna

Para emplear gases combustibles en motores de combustión interna es necesario cumplir con determinadas exigencias de tipo físico y químico. Son muy importantes, entre otras, el valor calórico, los límites de combustión, el límite de detonación y la limpieza de gases nocivos. Lógicamente, el gas debe cumplir otras propiedades que garanticen el funcionamiento del motor en cuanto a temperatura y presión. Del motor se debe tener en cuenta la relación de compresión y la relación aire-combustible.

El biogás, con un mínimo de un 40% de CH_4 , puede ser utilizado como combustible para motores diesel y gasolina. En el caso de los motores diesel, el biogás puede reemplazar del 70 al 80% del combustible; la baja capacidad de ignición del biogás no permite reemplazar la totalidad del combustible diesel en este tipo de motores que carecen de bujía para la combustión.

Aunque en los motores a gasolina el biogás puede reemplazar la totalidad de la misma, en general se le ha dado preferencia a los motores diesel, ya que se trata de un motor más resistente y eficiente. El rendimiento eléctrico de estos motores oscila entre el 33% y el 37%.

A continuación se pueden observar dos tipos de motores:



Foto 4: Generador con motor diesel adaptado



Foto 5: Generador con motor para biogás

El biogás presenta H_2S y CO_2 , componentes que son necesarios eliminar para lograr un funcionamiento satisfactorio del motor. Una concentración elevada de H_2S es corrosiva y ocasiona severos daños al motor, aunque no solo afecta al motor, sino también al conjunto de sus accesorios. Otro de los problemas es la presencia de CO_2 : este gas constituye un lastre dentro de la mezcla, pues ocupa un volumen apreciable y no produce aporte energético durante la combustión, sino que solamente consume parte de la energía liberada durante este proceso para incrementar su temperatura.

Generación de energía eléctrica mediante la utilización de microturbinas

El rango de potencia eléctrica de las microturbinas está comprendido entre 30 y 200 kW. Al tratarse de equipos modulares, que pueden conectarse en serie, son muy interesantes para aplicaciones en las que se dispone de pequeños caudales de biogás. Otra de sus características es que pueden trabajar con biogás con un contenido mínimo de metano de hasta un 35%, lo que permite las aplicaciones con gases pobres. Además, a diferencia de los motores térmicos, se trata de equipos que toleran contenidos elevados de ácido sulfhídrico, otro aspecto que las hace adecuados para trabajar con biogás procedente de la digestión anaerobia.

Las microturbinas están integradas por un compresor y una turbina radial, con un recuperador que permite precalentar el aire de combustión para mejorar la eficiencia eléctrica. Normalmente, constan de un eje simple en el que se acoplan la turbina, el compresor y el generador, y que alcanza velocidades de giro de hasta 100.000 rpm.



Foto 6: Microturbina de biogás

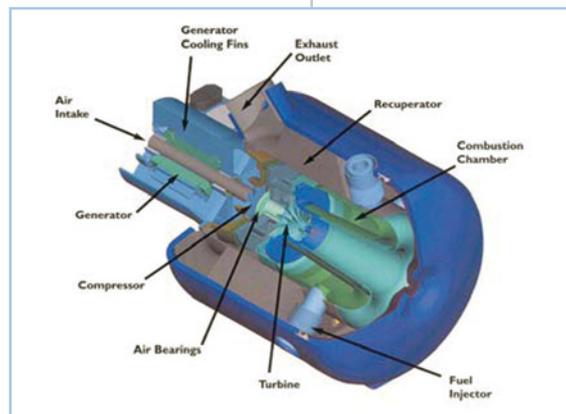


Foto 7: Partes en las que se divide la microturbina de biogás

A diferencia de los motores, las turbinas precisan de una presión de biogás entre 3 y 5 bar, suficiente para ser inyectado a la cámara de combustión.

En cuanto a rendimientos eléctricos, éstos varían entre el 15% y el 33% en función del modelo de microturbina. No obstante, el rendimiento puede verse incrementado mediante el aprovechamiento energético de los gases de escape. En este caso, se puede llegar a obtener rendimientos de hasta el 83%.

Otra de las ventajas de esta tecnología respecto a otras alternativas es que presentan una elevada tolerancia a la presencia de ácido sulfhídrico en el biogás, estando el límite exigido por los fabricantes alrededor de los 70.000 ppm. Este aspecto permite reducir costes en los sistemas de depuración del biogás, al disminuir la exigencia de calidad.

El diseño de una planta de aprovechamiento de biogás depende de diversos factores. En el caso concreto de las microturbinas, en función de la producción de biogás se definirá el número de equipos a utilizar.

Grado de implantación del sistema

El gas de los vertederos fue utilizado por primera vez en Estados Unidos a finales de los años setenta. Desde entonces, la tecnología necesaria para recogerlo y utilizarlo no ha dejado de desarrollarse. En España, esta tecnología empezó a utilizarse a principios de los años 90, pero ha sido a principios de siglo cuando ha evolucionado de manera considerable, de forma que en los últimos años ha aumentado el número de motores en los vertederos españoles.

Se produce energía eléctrica en varios vertederos españoles, entre los que se encuentran Serin (Asturias), Artigas (Bilbao), San Marcos (San Sebastián), Góngora (Pamplona), Meruelo (Cantabria), Cañada Hermosa (Murcia), Parque tecnológico de Valdemingómez (Madrid), etc.

Por ejemplo, en el vertedero del Garraf (Barcelona), clausurado en el año 2006, se ha instalado una planta de valorización de biogás que produce aproximadamente 100 GWh/año de energía eléctrica. En esta planta se han instalado 12 motores que transforman el biogás en energía eléctrica.

Otro ejemplo lo constituye el proyecto Microphilox, mediante el cual se ha desarrollado instalado y puesto en marcha un sistema de aprovechamiento de biogás mediante microturbinas para la generación de energía eléctrica en el vertedero comarcal de Orís (Barcelona). La electricidad generada se utiliza para alimentar la planta de lixiviados situada en las mismas instalaciones.

La innovación tecnológica de este proyecto consiste en la utilización de microturbinas como alternativa a los tradicionales motores de combustión interna, abriendo un nicho de mercado en aquellos vertederos en los que la cantidad de biogás generada no es suficiente para alimentar un motor de gas. Además, el proyecto incluye el desarrollo de un sistema de depuración biológica del ácido sulfhídrico y de los siloxanos, contaminantes contenidos en el biogás que es necesario eliminar para cualquier posterior aprovechamiento del mismo.

Valoración

Motores de combustión interna

Ventajas:

- Gran gama comercial de equipos.
- Instalaciones modulares y transportables.
- Facilidad de vertido de energía a la red eléctrica.
- Posibilidad de aprovechamiento térmico (gases de escape a 500°C y agua caliente a 90°C).

Inconvenientes:

- El biogás debe tener una concentración superior al 40% de CH₄.
- Muy sensible a la presencia de elementos corrosivos.
- Coste de mantenimiento elevado.

Microturbinas

Ventajas:

- Presentan una tolerancia elevada a la presencia de ácido sulfhídrico.
- Modularidad y reducidas emisiones atmosféricas.
- Menos partes móviles que los motores y costes de mantenimiento menores.

Inconvenientes:

- El biogás debe tener un contenido mínimo en CH₄ del 35%.
- No existen prácticamente utilidades en turbinas grandes.
- Rendimiento inferior al de los motores.
- Inversiones específicas elevadas, debido al pequeño tamaño de las microturbinas.

4.4. Cogeneración. Generación de energía eléctrica y energía térmica

La vía más eficaz de aprovechamiento de biogás es la cogeneración, que permite la generación de energía eléctrica y, al mismo tiempo, de energía térmica. La cogeneración se define como la producción simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de un mismo combustible. La ventaja de la cogeneración frente a los sistemas que únicamente generan electricidad es la mayor eficiencia energética global del proceso.

Descripción técnica

Actualmente la tecnología más utilizada en el mundo para la valorización energética del biogás son los motores de cogeneración, los cuales presentan algunos inconvenientes como, por ejemplo, que no son ni técnica ni económicamente viables en ciertas instalaciones.

Así, determinados usos del biogás sólo son viables económicamente a partir de ciertas producciones. Este es el caso de los motores de cogeneración, los cuales solo son rentables en plantas con generaciones superiores a 600 kWe, lo que implica caudales de biogás por encima de los 300 Nm³/h. Otro de los inconvenientes que presenta esta tecnología es que el biogás ha de tener un contenido mínimo en metano del 40%. Es decir, en aquellas instalaciones en las que no se cumplen ninguno de estos dos requerimientos, se hace necesario buscar nuevas alternativas tecnológicas que hagan viable el proceso de aprovechamiento energético del biogás.

A su vez, el biogás que se utiliza como combustible debe tener una composición específica, ya que muchas de las impurezas presentes en el biogás (H₂S, N₂, CO₂, NH₃, etc.) afectan de manera directa al motor de cogeneración. Por este motivo, es necesaria la realización de un análisis de composición del biogás. Los análisis se realizan para la selección del tipo de motor a utilizar y la verificación del cumplimiento de especificaciones del productor. Adicionalmente, deberán realizarse análisis del gas siempre que existan dudas sobre la aparición de componentes dañinos para el motor y como medida de control de la instalación.

El proceso al que se debe someter el biogás, para realizar la cogeneración, es similar a los casos anteriores de generación de energía eléctrica. El único cambio radica en los sistemas de purificación del biogás, debido a que son más estrictos por las especificaciones de los motores de cogeneración.



Figura 27. Esquema del proceso de cogeneración

4.
Descripción de
los modelos de
reducción de
emisiones de GEI
en vertederos
españoles más
implantados.
Buenas prácticas

La cogeneración se puede llevar a cabo con diferentes sistemas como turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna alternativos, microturbinas, motores Stirling o ciclos Rankine. Según el grado de potencia, son más adecuadas unas tecnologías u otras.



Foto 8: Ejemplo de equipo de cogeneración

La mayor parte de la energía eléctrica generada se vierte a la red y el calor puede utilizarse en instalaciones cercanas. La implantación de módulos de cogeneración por biogás en vertederos es muy sencilla y su explotación permite la generación de recursos económicos que ayudan a sufragar los importantes costes de explotación de los vertederos.

Grado de implantación del sistema

Debido a las características que debe poseer el biogás, no existen gran número de vertederos en España en los que se utilice la cogeneración.

El vertedero de Can Mata, en Hostalets de Pierola (Barcelona), es uno de los vertederos que está dotado con un motor de cogeneración. Gracias a ello, el biogás producido se utiliza para generar electricidad para el propio vertedero y energía térmica para el tratamiento de los lixiviados. A su vez, existe un acuerdo de colaboración con una empresa cercana al vertedero a la que proporcionan biogás para calentar los hornos de su fábrica de cerámica.

Valoración

Ventajas:

- Mayor eficiencia energética que otros sistemas de aprovechamiento de biogás.
- Producción de energía eléctrica y térmica.

Inconvenientes:

- Necesita caudales de biogás por encima de los 300 Nm³/h.
- Biogás con un contenido mínimo en metano del 40% y una composición específica.

4.5. Integración en la red de gas natural

Cuando el biogás se inyecta en las redes de gas natural recibe el nombre de biometano (biogás con más del 97% de su contenido en metano). Para conseguir este porcentaje de concentración de metano, el biogás tiene que ser depurado previamente hasta alcanzar los requerimientos de calidad exigidos para introducirlo en la red de distribución del gas natural.

Ya hay varios países de la UE que han propuesto estándares para la inyección del biogás purificado, como por ejemplo Suecia, Suiza, Alemania y Francia, fijando límites al contenido de azufre, oxígeno, partículas y punto de rocío, entre otros. Sin embargo, por el momento, en España todavía no se dispone de ninguna especificación técnica. Los procesos de purificación de biogás deben adecuarse para que el biogás tratado se ajuste a estos estándares de calidad.

Descripción técnica

Los procesos a los que se tiene que someter el biogás para su posterior inyección a la red de gas natural son los siguientes:



Figura 28. Esquema del proceso de inyección en gasoducto

La desulfuración del biogás consiste en un lavado completo del biogás, para desulfurar casi totalmente y purificar el gas, o un lavado suave para obtener un biogás con un contenido en ácido sulfhídrico bajo y un contenido en metano alto.

Uno de los sistemas utilizados está basado en el principio PSA/TSA: adsorción mediante presiones y temperaturas fluctuantes. Este método de adsorción se basa en la captura selectiva de las impurezas del gas con la ayuda de materiales sólidos granulados, los cuales contienen una gran superficie específica. La aplicación de elevadas presiones mejora sustancialmente el resultado final. Este sistema y otros se utilizan principalmente para eliminar el agua, el CO₂ y el H₂S presentes como contaminantes en el biogás.

El proceso más conocido utiliza un sistema PSA, donde el gas es comprimido a 60-100 psig, antes de ser introducido en el sistema de adsorción Guild. Este sistema PSA de adsorción elimina el agua, el CO₂ a valores entre el 1 y el 3%, y el H₂S a valores típicos entorno a 4 ppm, obteniéndose un gas de producto que se encuentra dentro los límites normalmente exigidos para su distribución.

Tras la desulfuración y enriquecimiento del biogás, éste debe ser comprimido y secado hasta la presión necesaria para la distribución en la red, lo que repercute en unos costes de inversión y explotación elevados.

Grado de implantación del sistema

El complejo de biometanización de Valdemingómez (Madrid) es el primero en España que aprovechará el biogás que generan los residuos mediante su distribución a través de la red de gas natural, una vez limpiado de impurezas. En la actualidad se encuentra a la espera de obtener los permisos pertinentes del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio para la conexión a la red. Este biogás no se produce por procesos naturales, sino que se genera controladamente en un digestor bajo condiciones técnicamente controladas.

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

El proceso llevado a cabo en este complejo exige que los residuos que van a ser sometidos al proceso de digestión anaerobia tengan unas condiciones determinadas de tamaño y pureza en materia orgánica. Por ello, debe realizarse un proceso de pretratamiento para adecuar las condiciones de los residuos procedentes de la instalación actual a las condiciones requeridas por el proceso de biometanización.

La materia orgánica pretratada se introduce en un digestor en el que se realizará la digestión anaerobia mediante la cuál se generará el biogás. Este biogás es tratado para adecuar su composición a la requerida por la red de gas natural.

Como ejemplo, cabe destacar que en Alemania se está inyectando biogás en la red de gas natural desde el año 2006. La legislación alemana obliga a las redes de distribución de gas natural a inyectar en el red el biogás, siempre y cuando sea posible llevarlo a cabo tanto técnica como económicamente. La mayoría de la plantas de biogás generan el gas empleando cultivos energéticos más que residuos orgánicos.

Valoración

Ventajas:

- Permite cualquier tipo de uso (igual que el gas natural).
- Reducción de los costes de transporte de esta energía.
- Reducción de la dependencia energética exterior y la emisión de GEI.

Inconvenientes:

- Necesidad de una depuración muy estricta, que cumpla con la normativa de distribución de gas natural.
- Compresión del biogás hasta la presión de distribución.
- Ausencia de regulación nacional de referencia para la conexión a la red de gas natural.
- Costes de inversión y explotación muy elevados (muy sensible a la distancia del gasoducto al punto de generación), que en principio no son competitivos con el gas natural.

4.6. Combustible para vehículos

En la sociedad actual el transporte se ha consolidado como el principal consumidor de energía final y el automóvil en uno de los mayores contaminantes. Pero los combustibles fósiles son limitados y las emisiones que generan tienen efectos muy negativos para el medio ambiente, incluyendo los gases de efecto invernadero. Por este motivo, se buscan alternativas al uso de combustibles fósiles; una de ellas es la utilización del biogás procedente de los vertederos.

El biogás extraído de los vertederos de cualquier gran ciudad puede abastecer de combustible a su flota de vehículos de recogida de basura, además de una parte importante de los autobuses urbanos, con gran ahorro económico y una baja contaminación atmosférica. El biogás es mucho más respetuoso con el medio que el gasóleo, equivalente al propio gas natural comprimido. A su vez, tiene un potencial de reducción de combustibles fósiles del 15-20%.

Las características del biogás son muy similares a las del gas natural empleado en automoción (CH_4 en un elevado porcentaje), por lo que los motores adaptados a este combustible también están en condiciones de trabajar con biogás, siempre que este haya sido sometido a un adecuado proceso de purificación.

Para conseguir una mayor autonomía en los vehículos, es conveniente eliminar la mayor cantidad posible de CO_2 y del resto de elementos gaseosos (O_2 , N_2 , etc.), incrementando así el contenido en metano. Por otra parte, algunas de las impurezas minoritarias pueden dar lugar, durante la combustión, a productos que son causa de corrosión (como H_2SO_4 , HCl ó HF , formados en la combustión a partir de ácido sulfhídrico y haluros) o de desgaste y abrasión en algunas partes del motor. Estos últimos también forman depósitos que producen una disminución del volumen de la cámara de combustión y, como consecuencia, mayor relación de compresión y mayor tendencia a la detonación.

Para eliminar todos estos contaminantes y conseguir que el biogás cumpla con las normativas específicas establecidas para la utilización del gas natural en vehículos, es preciso someter al biogás a un adecuado proceso de purificación.

Descripción técnica

El uso del biogás como combustible en el transporte es similar tecnológicamente al del gas natural. Para su utilización es necesario eliminar previamente todos los compuestos distintos del metano hasta convertirlo en un gas asimilable al gas natural. Una vez transformado, las posibilidades de uso son las mismas que las del Gas Natural Comprimido (GNC) o Licuado (GNL).

Figura 29. Esquema del proceso de utilización en vehículos



El tratamiento al que debe ser sometido el biogás para poder utilizarlo como combustible de vehículos es similar al descrito para la inyección en la red de gas natural: se eliminan los componentes superfluos para poder utilizarlo como combustible y se aumenta la concentración de metano (96% o más) presente en el biogás. El resultado es un gas similar en composición al gas natural pero cuyo origen (la digestión de la materia orgánica presente en el ciclo natural) no es fósil, sino totalmente renovable. Como consecuencia, las emisiones de CO_2 generadas al aprovecharlo energéticamente tienen un impacto cero en términos de emisiones de GEI.

Este biogás puede ser empleado por vehículos de ciclo Otto (gasolina cuatro tiempos) o Diesel mezclándolo con gasóleo. Un motor preparado para GNC puede funcionar con biogás con pequeñas modificaciones.

Algunos fabricantes dotan a los motores con la capacidad de usar biogás, como el Fiat Siena Tetrafuel en Brasil que funciona con gasolina, bioetanol E85 y E100, GNC y biogás. La calidad del combustible es importante para evitar daños en la mecánica.

Grado de implantación del sistema

Existen en España varias plantas que convierten el biogás procedente del vertedero en biocombustible para ser utilizado en automoción.

Por ejemplo, en el Centro de Recursos de Coll Cardús (Vacarisses-Barcelona) se ha construido una planta que trata el biogás procedente del vertedero, convirtiéndolo en biocombustible para ser utilizado en automoción. La planta tiene una capacidad de tratamiento de biogás sucio de $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$, suficiente

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

para la producción de 60 Nm³/h de biogás tratado. Con esta cantidad de biogás se puede alimentar una flota de aproximadamente 35 vehículos diarios.

Por otro lado, la planta procesadora de biogás de Valdemingómez (Madrid) abastece a los vehículos de recogida de residuos de Madrid y podría llegar a abastecer las necesidades de todos los autobuses de la capital.

En España se incentiva la producción con biogás pero no la producción de biogás y ésta es una de las causas por las que países como el nuestro no avanzan mucho en este terreno, mientras que sí lo hacen Alemania e Italia, con más de 450.000 vehículos que llenan sus depósitos con biogás gracias a la adaptación de los motores y la disponibilidad de surtidores.

En Europa existen 50 instalaciones de este tipo y se tiene gran experiencia con este combustible, sobre todo en Suecia, pero también en Suiza, Francia, Alemania, Austria, Italia e Islandia. Muy pocos vehículos usan biogás en el resto del mundo. En la siguiente tabla se muestran algunas referencias sobre plantas que generan biogás para su utilización como combustible de vehículos en Suecia.

Localización	Capacidad, Nm ³ /h	Uso del Biometano	En operación desde
Eskilstuna, Sweden*	330	Bio fuel	2003
Linköping, Sweden*	1.400 (2*700)	Bio fuel	2002
Västerås, Sweden*	550	Bio fuel	2004
Norrköping, Sweden*	400	Bio fuel	2006
Boden, Sweden*	200	Bio fuel	2007

Tabla 9. Algunas referencias de plantas que generan biogás para combustible de vehículos en Suecia

En Suiza y el Principado de Liechtenstein existen aproximadamente 9.000 vehículos de gas natural que se recargan en alrededor de 120 estaciones de llenado con una mezcla de 80:20 de gas/biogás.

En esta línea, la Unión Europea se ha fijado el objetivo de aumentar la cuota de biocarburantes y combustibles alternativos en el tráfico, incluido el gas natural, a 10 y 20% respectivamente, para el año 2020.

Para cumplir este objetivo, se ha establecido un proyecto europeo llamado GasHighWay. El proyecto tratará de aumentar el uso de combustibles ambientalmente sostenibles en el sector del transporte. También promoverá la producción y el uso de biogás (biometano) como combustible de vehículos, así

como la inyección del biogás tratado a la red de gas natural. El objetivo a largo plazo del proyecto es promover la creación de una red de estaciones de servicio para biogás y gas natural que vaya desde el extremo norte de Europa, Finlandia, hasta el sur de Italia.



Figura 30. Trazado de la red de estaciones de servicio del GasHighWay.

Para avanzar en este campo, a falta de unos estándares europeos, en los Estados miembros más avanzados existen unos valores de referencia de calidad para inyección en red o para uso vehicular.

Valoración

Ventajas:

- Es inagotable y, como su origen es orgánico, no altera significativamente la cantidad neta de gases emitidos (como el dióxido de carbono), por lo que es totalmente sostenible desde el punto de vista ambiental.
- Los vehículos son más silenciosos y utilizan menos combustible que aquellos impulsados por combustibles fósiles como gasolina y diesel.
- El coste del combustible es menor que el petróleo y es independiente de tensiones y crisis.

El biometano se postula como una de las fuentes de energía renovables con mejores perspectivas de desarrollo en el centro y norte de Europa hasta el horizonte 2020.

4.7. Combustible para pilas de combustible

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos, es decir, producen electricidad a partir de una reacción química. A diferencia de las baterías convencionales, una pila de combustible no se acaba y no necesita ser recargada, ya que su funcionamiento es continuo mientras el combustible y el oxidante le sean suministrados.

Las primeras utilizaciones del biogás en pilas de combustible se remontan a comienzos de los años 90 en pilas de combustible de ácido fosfórico, cuando este tipo de sistemas ya había alcanzado un considerable grado de madurez operativa y fiabilidad. Se empezó a considerar como una prometedora alternativa con el uso del hidrógeno y otros hidrocarburos convencionales, como el metano. La sustitución del metano por biogás conlleva la utilización de un combustible más diluido (de menos poder calorífico), pero, en general, no conduce a cambios tecnológicos significativos.

Descripción técnica

A continuación se indican los procesos que se deben llevar a cabo para la producción de energía eléctrica a través del uso de biogás en pilas de combustible.



Figura 31. Esquema del proceso de pilas de combustible

El biogás obtenido en el vertedero sufre un tratamiento para obtener un gas rico en H₂, CO y CO₂, y libre de impurezas. Este gas se introduce en la pila de combustible para la generación de energía eléctrica mediante la reacción química mostrada en la Figura 32.

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

La necesidad de utilizar metales nobles para la fabricación de los catalizadores en las pilas de combustible y la elevada sensibilidad de estos sistemas, que operan a temperaturas relativamente bajas, frente a la presencia de contaminantes, limita notablemente su compatibilidad con el empleo de biogás. Sin embargo, las elevadas temperaturas de operación de las pilas MCFC (pilas de carbonato fundido de alta temperatura) y SOFC (pilas de óxidos sólidos de alta temperatura), las convierten en las candidatas

idóneas a su utilización. Así, el CO del biogás, cuya presencia produce el envenenamiento de las pilas de baja temperatura, es un combustible adicional para las de alta temperatura.

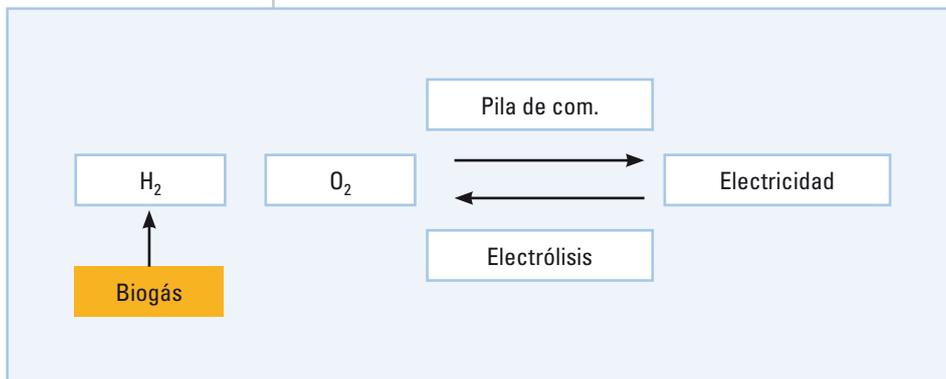


Figura 32. Reacción química de pilas de combustible



Foto 9: Pilas estacionarias MCFC.

Foto 10: Pilas estacionarias SOFC



En la Tabla 10 se muestra el grado de tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos:

Compuesto	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible	Combustible
CH ₄	Inerte	Veneno	Inerte	Combustible	Combustible
CO ₂	Diluyente	Veneno	Diluyente	Reactivo	Diluyente
CO	< 10 ppm	Veneno	< 1%	Combustible	Combustible
H ₂ S, COS	< 200 ppb	Veneno	Veneno < 50 ppm	Veneno 0.1-0.5 ppm H ₂ S	Veneno <1 ppm H ₂ S
NH ₃	Veneno	Combustible	Veneno	Combustible	Combustible
Halógenos	-	-	Veneno 4 ppm	Veneno <0.1-1.0 ppm	Veneno <1 ppm

Tabla 10. Tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos. * PEMFC: pilas de combustible de membrana polimérica. AFC: pilas de combustible alcalinas. PAFC: pilas de combustible de ácido fosfórico. Fuente: Ferreira, 2004⁹ y Trogisch, 2004¹⁰.

La sensibilidad de las pilas de combustible a determinado tipo de compuestos implica que, previamente a su uso, el biogás debe someterse a una primera y necesaria etapa de limpieza/acondicionamiento, seguida de otra etapa de reformado que lo convierte en un combustible rico en hidrógeno. A continuación se realiza una descripción de cada una de las etapas:

- **Limpieza/acondicionamiento del biogás:** esta etapa tiene por objeto la eliminación de sus impurezas, fundamentalmente H_2S . Los compuestos de azufre son potentes agentes de envenenamiento de los catalizadores de níquel empleados en el reformado del biogás. La práctica habitual es la utilización de distintos métodos fisicoquímicos de desulfuración como la adsorción, la absorción o la reacción con un óxido metálico con formación de sulfuro del metal. Entre estos es frecuente la reacción de la corriente de biogás con ZnO o Fe_2O_3 .

Adicionalmente se ajusta el contenido de humedad del biogás y se hace circular por un sistema de filtros con el fin de eliminar partículas sólidas que hayan podido quedar retenidas.

- **Reformado del biogás:** es un proceso fuertemente endotérmico mediante el cual el biogás libre de impurezas se convierte en un gas combustible rico en hidrógeno ($H_2 + CO + CO_2$). El método más utilizado es el reformado de vapor de agua, aunque existen algunos sistemas en los que se emplea el reformado seco, con CO_2 , aprovechando el contenido de este gas en el biogás. Otros métodos menos frecuentes son la oxidación parcial catalítica o el reformado autotérmico.

En función del tipo de pila utilizado, el proceso del reformado puede ser externo o interno. El externo tiene lugar en reactores diseñados para este propósito, mientras que el interno se produce en el ánodo de la propia pila de combustible (pila de alta temperatura).

Grado de implantación del sistema

En los últimos años se está realizando un intenso esfuerzo a nivel mundial para desarrollar esta tecnología. EE.UU., Japón y Europa son los lugares donde han surgido más iniciativas, sin embargo, todavía es necesario un considerable impulso para que estos sistemas logren una mayor penetración en el mercado y sean competitivos con las tecnologías convencionales en términos de costes y experiencia.

En Europa existen instalaciones de pilas de combustible que se alimentan de biogás de origen industrial (planta de Owschlag) o agrícola (planta de Nitra), así como el procedente de residuos sólidos urbanos eliminados en vertederos (planta de Pinto) y de aguas residuales (planta de Linz). En la Figura 33 se muestra la localización de estas plantas.



Figura 33. Ubicación de plantas que utilizan pilas de combustible

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

La planta ubicada en Pinto utiliza una pila de combustible de 300kW de tipo MCFC (carbonato fundido) que opera durante 2.000 horas y se alimenta del biogás procedente de los residuos urbanos eliminados en el vertedero de esa localidad.

Esta es una tecnología sobre la que se están realizando importantes inversiones económicas en investigación y desarrollo, por lo que se estima que las pilas de combustible serán una tecnología presente en un futuro no muy lejano.

En la actualidad, el sector de la automoción es el más prometedor para la utilización de pilas de combustible, aunque los elevados costes suponen una barrera considerable. Sin embargo, en los últimos años está suscitando sumo interés la combinación de sistemas híbridos de pilas de combustible y turbina de gas o vapor, puesto que consiguen aumentar significativamente la eficiencia energética global de los sistemas.

Valoración

Las pilas de combustible precisan de biogás con un grado de pureza medio-alto, en función del tipo de dispositivo de que se trate. Los aspectos innovadores que la pueden convertir en una tecnología competitiva para la generación de electricidad son los siguientes:

- Bajo impacto ambiental.
- Carácter modular.
- Flexibilidad de operación.
- Rendimiento elevado.
- Menor consumo.

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

No obstante, pese a las ventajas que ofrecen estos sistemas, su elevado coste y su grado de desarrollo hace que, por el momento, todavía no sean sistemas económicamente competitivos respecto a las turbinas de gas o a los motores de combustión interna para la generación de electricidad a partir de biogás.

4.8. Otros usos del biogás

A continuación se citan otros usos que se puede dar al biogás:

- **Invernaderos:** el biogás es utilizado como fuente de energía y calor. A su vez, el CO₂ puede ser utilizado para mejorar el crecimiento de las plantas.
- **Consumo en instalaciones cercanas:** El biogás es conducido hasta un usuario cercano para su uso en una caldera, horno o algún otro proceso industrial.
- **Transformación química del biogás:** aunque no es la tendencia general aprovechar el biogás en este tipo de transformaciones, se ha experimentado en la transformación del metano contenido en el biogás a metanol.

4.9. El vertedero como biorreactor

En el PNIR (Plan Nacional Integrado de Residuos) se incluye una Estrategia de Desvío de Residuos Biodegradables de Vertederos, en la cual se establecen objetivos para potenciar la recogida selectiva, incluida la de materia orgánica, con el fin de que no se elimine materia orgánica biodegradable en los vertederos.

Además, el PNIR fomenta la aplicación de sistemas de tratamiento que alejen del vertedero la materia orgánica biodegradable, especialmente los tratamientos mecánico-biológicos previos al vertido, que tienen por objetivo disminuir la capacidad de biodegradación de los residuos; incluso se considera importante incluir un índice de biodegradabilidad de los vertidos, para no contabilizar como residuos biodegradables aquellos que han sido tratados y su potencial de biodegradación es inapreciable.

Mediante tratamientos biológico-mecánicos de bioestabilización o biosecado, que aprovechan el calor desprendido en la fermentación aeróbica de la materia orgánica para estabilizar o secar el resto de los residuos, se puede llegar a conseguir un índice de biodegradabilidad muy bajo.

El material bioestabilizado depositado en el vertedero no genera biogás ni lixiviados y, en caso de que la lluvia genere lixiviados, estos tienen menor carga contaminante que los generados por vertederos convencionales.

Esta mejora en la biodegradabilidad no supone una solución completa, ya que en la masa de vertido sigue habiendo materiales de lenta biodegradación, tales como papeles, textiles, celulosa, etc. que continuarán generando biogás de forma más lenta pero más dilatada en el tiempo.

Para evitar este problema se ha investigado en convertir un vertedero relleno de materia bioestabilizada en un biorreactor, en donde se activa la materia orgánica de lenta degradación para que se genere biogás en un plazo corto, controlando la reacción mediante el ajuste de la humedad y temperatura.

En este tipo de instalaciones, la fracción degradable se podría conservar durante bastante tiempo en estado seco, pero si una vez clausurado y sellado, para llevarlo a condiciones anaeróbicas adecuadas, se le adiciona agua, se puede activar la producción de un biogás de elevada calidad, utilizable para la producción de energía eléctrica o bien para cualquier otra forma de aprovechamiento del mismo.

Cuando se utilizan los biorreactores activables, la producción de biogás sería la misma que en un vertedero convencional, pero sin la dispersión en la atmósfera, ya que cuando se activa y empieza a producir biogás ya está sellada la celda, es decir se podría recuperar 180 – 200 Nm³/Tn de residuo, pero en un tiempo mucho más breve, en 4 – 6 años, con picos de caudal de biogás hasta 4 veces superior (Figura 34).

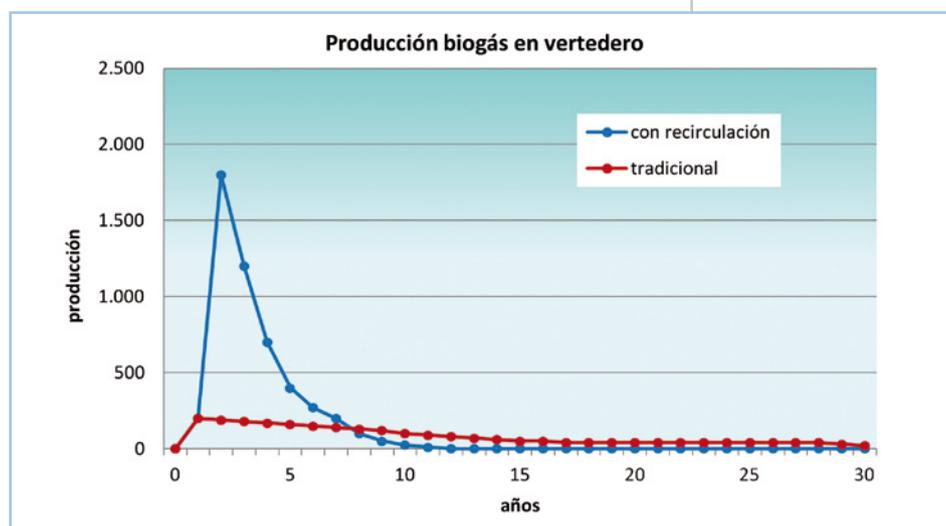


Figura 34. Producción de biogás en vertederos

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

El biorreactor activable tiene el formato de una celda de vertedero convencional, aunque de un tamaño generalmente menor, en el que se van colocando los tubos de recirculación de agua al mismo tiempo que los residuos, para poder activarlos cuando se haya sellado la celda. (Figura 35).



Figura 35. Esquema de un biorreactor activable.

Aunque no constituye una tecnología de aprovechamiento del biogás, sí se puede considerar como una alternativa real a los vertederos convencionales.

Las principales ventajas de este tipo de vertederos reactores son:

- Aceleran la estabilidad del residuo.
- Optimizan la generación de biogás.
- Atenúan la toxicidad de los lixiviados.
- Reducen la incidencia de los gases de efecto invernadero (GEI).
- Minimizan el volumen de los residuos.
- Incrementan la generación de energía de carácter renovable.
- Minimizan los costes de mantenimiento post-clausura.
- Incrementan la disponibilidad de superficies para otros usos.

Pero sobre todo, al agotar en tan corto periodo de tiempo (4 – 5 años) la posibilidad de generar más biogás, se eliminan también los riesgos del repunte de la generación de gases a los 70 – 90 años después de su clausura”.

4.10. Buenas Prácticas y Recomendaciones

En este apartado se indican algunos ejemplos de buenas prácticas llevados a cabo por diferentes municipios referentes a la eliminación de residuos en vertederos municipales y a la valorización energética del biogás realizada en los mismos. En base a estas buenas prácticas, se indicarán una serie de recomendaciones que podrán ser aplicadas por los municipios en sus instalaciones.

Nombre Vertedero	Bens
Ubicación	La Coruña
Población	221.988 Habitantes
Antigüedad	Información no disponible
Residuos depositados	1.300.000 m3
Tipo de valorización	Cogeneración
Generación de biogás	1.500 m3/h los primeros 5 años, lo tres últimos años la generación será de 400 m3/h
Descripción de la instalación	Motores: 4 Potencia instalada: 2.500 kW Producción de energía: 19,30 GWh/año

Nombre Vertedero	Centro Ambiental de Málaga "Los Ruices"
Ubicación	Málaga
Población	600.000 habitantes
Antigüedad	1994
Residuos depositados	91.900 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 2 Potencia instalada: 2 x 1.048 kW

Nombre Vertedero	La Val d'En Joan, Garraf
Ubicación	Barcelona
Población	4.992.193 habitantes
Antigüedad	1974
Residuos depositados	25.000.000 de toneladas
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	50.000.000 m3/año
Descripción de la instalación	Motores: 12 Potencia instalada: 12 x 1,05 MW Producción de energía: 100 GWh/año

Nombre Vertedero	Góngora
Ubicación	Pamplona
Población	349.227 habitantes
Antigüedad	1992
Residuos depositados	130.000 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica y producción de combustible para vehículos
Generación de biogás	10.267.050 m3 (2010)
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 725 kW Producción de energía: 4,7 GWh (2008)

Nombre Vertedero	La Galiana
Ubicación	Madrid
Población	2.903.903 habitantes (2000)
Antigüedad	1978
Residuos depositados	21.700.000 toneladas
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica y cogeneración
Generación de biogás	37.328.989 m3 (año 2009)
Descripción de la instalación	Motores: 9 (8 motores y 1 turbina) Potencia instalada: 18,9 MW Producción de energía: 66.480 MWh (2009)

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

Nombre Vertedero	Orís
Ubicación	Barcelona
Población	172.156 habitantes
Antigüedad	Información no disponible
Residuos depositados	50.000 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica y calor
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 2 microturbinas Potencia instalada: 2 x 30 kW

Nombre Vertedero	Artigas
Ubicación	Bilbao
Población	358.566 habitantes
Antigüedad	1976
Residuos depositados	119.000 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	5.000.000 m ³ al año
Descripción de la instalación	Potencia instalada: 1.410 kW Producción de energía: 136.808 MWh (1992-2010)

Nombre Vertedero	Meruelo
Ubicación	Cantabria
Población	500.000 habitantes
Antigüedad	1989
Residuos depositados	192.983 toneladas (2009)
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	8.228.977 m ³ (2009)
Descripción de la instalación	Motores: 6 Potencia instalada: 6 x 477 kW Producción de energía: 10,5 MWh/año

Nombre Vertedero	Gardelegui
Ubicación	Vitoria
Población	Información no disponible (63 municipios)
Antigüedad	1973
Residuos depositados	120.710 toneladas/año
Tipo de valorización	Cogeneración
Generación de biogás	500 m ³ /h
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 650 kW Producción de energía: 4.500 MWh

Nombre Vertedero	Vacarisses
Ubicación	Barcelona
Población	878.893 habitantes
Antigüedad	1980
Residuos depositados	550.000 toneladas/año
Tipo de valorización	Combustible para vehículos
Generación de biogás	500 m ³ /h
Descripción de la instalación	Potencia instalada: 5.712 kW

Nombre Vertedero	Calahorra
Ubicación	La Rioja
Población	Información no disponible
Antigüedad	Información no disponible
Residuos depositados	25.764 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 5,5 kW

Nombre Vertedero	San Marcos
Ubicación	San Sebastián
Población	306.000 habitantes
Antigüedad	Años 70
Residuos depositados	Información no disponible
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 3 Potencia instalada: 3 x 650 kW Producción de energía: 5.880 Mwh/año

Nombre Vertedero	Sasieta
Ubicación	Beasain
Población	186.000 habitantes
Antigüedad	1991
Residuos depositados	67.750 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 475 kW Producción de energía: 3.400 MWh/año

Nombre Vertedero	Valladolid
Ubicación	Valladolid
Población	315.522 habitantes
Antigüedad	1976
Residuos depositados	127.505 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 600 kW Producción de energía: 1.250 MWh/año

Nombre Vertedero	Llagostera
Ubicación	Gerona
Población	Información no disponible
Antigüedad	Información no disponible
Residuos depositados	112.480 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 190 kW

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

Nombre Vertedero	Areosa
Ubicación	Cerceda (La Coruña)
Población	2.200.000 habitantes
Antigüedad	1990
Residuos depositados	Información no disponible
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	1.000 m ³ /h
Descripción de la instalación	Motores: 3 Potencia instalada: 3 x 760 kWe Producción de energía: 15 GWh/año

Nombre Vertedero	Alcalá de Guadaira
Ubicación	Sevilla
Población	Información no disponible
Antigüedad	2000
Residuos depositados	407.106 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 3

Nombre Vertedero	Serin
Ubicación	Asturias
Población	Información no disponible
Antigüedad	1988
Residuos depositados	479.396 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 10 Potencia instalada: 6.800 kW Producción de energía: 42.500 MWh/año

Nombre Vertedero	Pedret y Marzá
Ubicación	Gerona
Población	Información no disponible
Antigüedad	Información no disponible
Residuos depositados	95.091 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 626 kW

Nombre Vertedero	Garrat
Ubicación	Begues y Gavá
Población	Información no disponible
Antigüedad	2001
Residuos depositados	660.084 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 445 kW Producción de energía: 1.251 MWh/año

Nombre Vertedero	Juan Grande
Ubicación	Gran Canaria
Población	Información no disponible
Antigüedad	Información no disponible
Residuos depositados	261.974 toneladas/año
Tipo de valorización	Generación de energía eléctrica
Generación de biogás	Información no disponible
Descripción de la instalación	Motores: 1 Potencia instalada: 944 kW Producción de energía: 2.000 kWh/año

A continuación se indican una serie de pautas y recomendaciones básicas para mejorar la gestión de los vertederos:

1. Realizar caracterizaciones de los residuos depositados en vertederos para conocer su composición. Una vez conocidos los tipos de residuos depositados, llevar a cabo campañas de concienciación y educación en la gestión de los residuos municipales entre la población, para conseguir que se deposite en el vertedero la menor cantidad de residuos que puedan ser reutilizables, reciclables o valorizables.
2. Una vez conocida la composición y la cantidad de residuos depositados en el vertedero, realizar un estudio teórico de la generación y composición de biogás en el vertedero. Este estudio permite realizar una estimación sobre la cantidad de biogás generado en el vertedero y su posible aprovechamiento. Se recomienda hacer mediciones *in situ* de la composición (impurezas presentes, porcentaje de metano, etc.) y del caudal de biogás generado, siempre que sea posible.
3. Realizar una valoración de los posibles sistemas de aprovechamiento de biogás para elegir la opción que más se adecue a las características del vertedero. Si la opción elegida es la generación de energía eléctrica, es necesario conocer la distancia a la infraestructura eléctrica más cercana (punto de enganche), ya que si ésta es muy elevada puede comprometer la viabilidad del proyecto. A continuación se indican como ejemplo las distancias existentes en algunos vertederos en los que se genera energía eléctrica.

VERTEDERO	Distancia a infraestructura eléctrica
BILBAO	500 m
ALICANTE	6 Km
VALLADOLID	25 Km
PAMPLONA	8 Km
MURCIA	5 Km y 15 Km (2 infraestructuras próximas)

4. Realizar el sellado del vertedero por fases para evitar las emisiones de metano a la atmósfera, captando así todo el biogás generado. Si se realiza la desgasificación del vertedero cuando ya se ha clausurado, se habrá perdido gran cantidad de biogás que se podría haber utilizado para obtener energía.
5. Al realizar la valorización energética de biogás, en ocasiones es necesario quemar en antorcha el excedente generado. Se recomienda utilizar ese biogás para otros fines, como combustible para las flotas de autobuses urbanos y camiones de recogida de residuos urbanos.
6. Se recomienda transformar los vertederos en un espacio de ocio, una vez realizado el sellado de mismo, mediante la instalación de una cobertura vegetal y la creación de diferentes espacios que incluyan zonas verdes y de ocio, etc.

4.11. Resumen de las respuestas de las encuestas y análisis de la información recopilada

El objetivo de este epígrafe es evaluar el estado actual de los vertederos españoles en cuanto a sus características principales, forma de gestión, cantidad de residuos depositados, posibilidad de valorización energética del biogás generado, etc.

Para ello se han realizado una serie de encuestas que se han enviado a la mayoría de los municipios de la Red Española de Ciudades por el Clima, con el fin de obtener información sobre la realidad de los vertederos españoles, y con ello, poder identificar medidas para mejorar la gestión de los vertederos e incrementar el aprovechamiento del biogás generado.

Estas encuestas han sido elaboradas en función del número de habitantes que existe en cada municipio, y de si se realiza o no aprovechamiento del biogás en el vertedero en el que eliminan sus residuos. Teniendo en cuenta esta clasificación de municipios, se han elaborado tres modelos de encuestas, que son las siguientes:

- Encuesta para municipios de más de 50.000 habitantes.
- Encuesta para municipios de menos de 50.000 habitantes.
- Encuesta para vertederos que realizan un aprovechamiento energético del biogás. A través del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) se ha obtenido un listado de vertederos españoles que captan biogás.

En estas encuestas se ha incluido una serie de preguntas con el objetivo de obtener la mayor información posible sobre el estado actual de los vertederos españoles.

Para dar mayor facilidad a los municipios a la hora de cumplimentar las encuestas, el cuestionario se ha dividido en 4 partes claramente diferenciadas.

- La parte A consta de cuestiones relativas a datos generales del municipio, tales como su población, nombre del municipio, Comunidad Autónoma y Provincia, y del vertedero o vertederos de los que dispone el municipio. En este caso, es imprescindible conocer la situación geográfica del vertedero para conocer la cantidad de biogás que se puede generar en cada vertedero. Además, también se han solicitado datos de contacto, por si fuera necesario contactar con el municipio para obtener más información. Esta parte es común a todos los tipos de encuestas.
- En la parte B se incluyeron las cuestiones relativas al sistema de recogida y tratamiento de residuos implantado en el municipio. En ella se solicita información sobre diversas cuestiones, incluyendo si se realiza recogida selectiva o no, la cantidad anual de residuos urbanos que se destina a vertedero y la composición de los residuos depositados en vertedero. Esta parte es común a todos los tipos de encuestas.

Este epígrafe, se subdivide a su vez en dos partes:

- ▶ Parte B. En esta parte se solicitan datos sobre los vertederos actualmente en uso que dispone cada municipio. Se pretende conocer el número de vertederos que existen en el municipio, su clase, si cumplen los requisitos que exige el Real Decreto 1481/2001, el año de inicio de explotación, la superficie y volumen, la técnica utilizada para disponer los vertidos, si existen elementos de seguridad, si se ha estimado, medido o si se aprovecha el biogás generado, si existe algún plan de explotación o buenas prácticas para reducir las fugas incontroladas de biogás, así como las medidas de reducción de metano aplicadas. En caso de que realicen aprovechamiento de biogás, se precisa que indiquen qué tipo de energía han obtenido y si disponen de infraestructuras eléctricas próximas.

- ▶ Parte B1. En esta parte se solicitan datos sobre los vertederos fuera de uso que existen en el municipio. Se precisa que indiquen el año de explotación y de clausura, si está sellado, en qué fechas se realizó el sellado y si se hizo desgasificación, entre otras cuestiones.

Una vez concluidos estos apartados de la encuesta, que suponen la parte más importante de la misma en cuanto a poder obtener conclusiones sobre la situación actual de los vertederos españoles, se incluyen dos inventarios sobre la cantidad y naturaleza de los residuos depositados en los vertederos. Respecto a estos dos inventarios, se ha sido consciente de que, en general, sólo los municipios grandes podrían disponer de estos datos.

- En la parte C se incluye un inventario histórico sobre los residuos depositados en vertedero. Se solicita que rellenen un inventario por cada vertedero que exista en su municipio. Esta parte únicamente se ha solicitado a los municipios con más de 50.000 habitantes y a los vertederos que se tiene constancia que realizan aprovechamiento energético de biogás, ya que se considera que, en general, los municipios pequeños y medianos no disponen de estos datos.
- Por último, en la parte D, se expone un inventario histórico sobre la composición de los residuos depositados en el vertedero y los parámetros utilizados para el modelo de estimación de emisiones de CH₄. Al igual que en la parte C, se propone que los municipios rellenen un inventario por cada vertedero. Esta parte del cuestionario únicamente se ha solicitado a los municipios con más de 50.000 habitantes y a los vertederos que se tiene constancia que realizan aprovechamiento energético del biogás.

A continuación se muestra el listado de municipios de la Red Española de Ciudades por el Clima a los que se ha enviado la encuesta. Como se puede observar, no se ha remitido la encuesta a los municipios con población inferior a 20.000 habitantes, ya que estos municipios no gestionan sus propios vertederos o, si lo hacen, éstos no reciben una cantidad de residuos suficiente para que el aprovechamiento del biogás de vertedero sea técnica y económicamente viable.

- Municipios entre 20.000 y 50.000 habitantes (80 municipios en total)

Municipio	Provincia	Habitantes
Ayuntamiento de Algete	Madrid	20.204
Ayuntamiento de Ayamonte	Huelva	20.334
Ayuntamiento de Riba-roja de Túria	Valencia	20.468
Ayuntamiento de Guía de Isora	Santa Cruz de Tenerife	20.536
Ayuntamiento de San Juan de Aznalfarache	Sevilla	20.779
Ayuntamiento de Maracena	Granada	20.815
Ayuntamiento de Conil de la Frontera	Cádiz	20.984
Ayuntamiento de L' Alfàs del Pi	Alicante	21.011
Ayuntamiento de Cabra	Córdoba	21.352
Ayuntamiento de Armilla	Granada	21.380
Ayuntamiento de Loja	Granada	21.574
Ayuntamiento de Torreldones	Madrid	21.781
Ayuntamiento de Almonte	Huelva	21.782
Ayuntamiento de Nerja	Málaga	21.811
Ayuntamiento de Sant Antoni de Portmany	Eivissa	21.852
Ayuntamiento de Coín	Málaga	21.866



4.
Descripción de
los modelos de
reducción de
emisiones de GEI
en vertederos
españoles más
implantados.
Buenas prácticas

Municipio	Provincia	Habitantes
Ayuntamiento de Calatayud	Zaragoza	21.933
Ayuntamiento de Sant Joan d'Alacant	Alicante	21.939
Ayuntamiento de Los Barrios	Cádiz	22.311
Ayuntamiento de Alboraya	Valencia	22.405
Cabildo Insular de la Gomera	La Gomera	22.769
Ayuntamiento de Alcalá La Real	Jaén	22.783
Ayuntamiento de Vícar	Almería	22.853
Ayuntamiento de Priego de Córdoba	Córdoba	23.513
Ayuntamiento de Paiporta	Valencia	23.519
Ayuntamiento de Tacoronte	Santa Cruz de Tenerife	23.562
Ayuntamiento de Montilla	Córdoba	23.840
Ayuntamiento de Icod de Los Vinos	Santa Cruz de Tenerife	24.024
Ayuntamiento de Candelaria	Santa Cruz de Tenerife	24.319
Ayuntamiento de Gáldar	Las Palmas	24.405
Ayuntamiento de Jumilla	Murcia	25.685
Ayuntamiento de Lepe	Huelva	25.886
Ayuntamiento de Marín	Pontevedra	25.969
Ayuntamiento de Camas	Sevilla	26.015
Ayuntamiento de Pineda de Mar	Barcelona	26.203
Ayuntamiento de Villaviciosa de Odón	Madrid	26.475
Ayuntamiento de Villarrobledo	Albacete	26.642
Ayuntamiento de Novelda	Alicante	27.135
Ayuntamiento de Algemesí	Valencia	28.308
Ayuntamiento de Morón de la Frontera	Sevilla	28.455
Ayuntamiento de Rota	Cádiz	28.516
Ayuntamiento de La Villa de Agüimes	Las Palmas	28.924
Ayuntamiento de Maó	Menorca	29.125
Ayuntamiento de Ciutadella de Menorca	Menorca	29.160
Ayuntamiento de Totana	Murcia	29.211
Ayuntamiento de Xàtiva	Valencia	29.386
Ayuntamiento de Puente Genil	Córdoba	30.033
Ayuntamiento de Xirivella	Valencia	30.691
Ayuntamiento de San Andrés del Rabanedo	León	30.906
Ayuntamiento de Valdepeñas	Ciudad Real	31.147
Ayuntamiento de Castro-Urdiales	Cantabria	31.670
Ayuntamiento de Santa Pola	Alicante	31.760
Ayuntamiento de Galapagar	Madrid	31.820

Municipio	Provincia	Habitantes
Ayuntamiento de La Vall D'Uixó	Castellón	32.924
Ayuntamiento de Aranda de Duero	Burgos	32.928
Ayuntamiento de Marratxí	Illes Balears	33.348
Ayuntamiento de Montcada i Reixac	Barcelona	33.453
Ayuntamiento de Sant Adrià de Besós	Barcelona	33.761
Ayuntamiento de Petrer	Alicante	34.523
Ayuntamiento de Yecla	Murcia	35.025
Ayuntamiento de Alhaurin de la Torre	Málaga	35.114
Ayuntamiento de Cieza	Murcia	35.200
Ayuntamiento de Villena	Alicante	35.222
Ayuntamiento de Puerto del Rosario	Las Palmas	35.667
Ayuntamiento de La Rinconada	Sevilla	35.928
Ayuntamiento de Los Realejos	Santa Cruz de Tenerife	37.559
Ayuntamiento de Tomelloso	Ciudad Real	38.095
Ayuntamiento de Vilafranca del Penedès	Barcelona	38.425
Ayuntamiento de Miranda de Ebro	Burgos	39.264
Ayuntamiento de Soria	Soria	39.528
Ayuntamiento de Vic	Barcelona	39.844
Ayuntamiento de Écija	Sevilla	40.400
Ayuntamiento de San Fernando de Henares	Madrid	40.981
Ayuntamiento de Alcantarilla	Murcia	41.084
Ayuntamiento de Plasencia	Cáceres	41.148
Ayuntamiento de Pinto	Madrid	43.501
Ayuntamiento de Dénia	Alicante	44.464
Ayuntamiento de Antequera	Malaga	45.168
Ayuntamiento de Langreo	Asturias	45.565
Ayuntamiento de Eivissa	Eivissa	48.684

Respecto a los municipios grandes, se ha elegido una horquilla entre 50.000 y 500.000 habitantes, dejando fuera de la encuesta a los 6 municipios (Barcelona, Madrid, Málaga, Sevilla, Valencia y Zaragoza) con una población superior a esta última cifra, ya que sus datos no resultan representativos para la muestra.

- Municipios entre 50.000 y 500.000 habitantes: (96 municipios en total).

Ayuntamiento	Provincia	Habitantes
Ayuntamiento de Utrera	Sevilla	50.665
Ayuntamiento de Vila-Real	Castellón	51.205
Ayuntamiento de Calvià	Mallorca	51.774

Tabla 11. Listado de municipios con menos de 50.000 habitantes.



4.
Descripción de
los modelos de
reducción de
emisiones de GEI
en vertederos
españoles más
implantados.
Buenas prácticas

Ayuntamiento	Provincia	Habitantes
Ayuntamiento de Puertollano	Ciudad Real	51.842
Ayuntamiento de Huesca	Huesca	52.059
Ayuntamiento de Sant Vicent del Raspeig	Alicante	53.126
Ayuntamiento de Aranjuez	Madrid	54.055
Ayuntamiento de Collado Villalba	Madrid	55.027
Ayuntamiento de Elda	Alicante	55.168
Ayuntamiento de Cuenca	Cuenca	55.866
Ayuntamiento de Segovia	Segovia	56.660
Ayuntamiento de Benalmádena	Málaga	58.854
Ayuntamiento de Arrecife	Las Palmas	59.127
Ayuntamiento de Motril	Granada	60.279
Ayuntamiento de Granollers	Barcelona	60.658
Ayuntamiento de El Prat de Llobregat	Barcelona	63.418
Ayuntamiento de Viladecans	Barcelona	63.489
Ayuntamiento de Paterna	Valencia	64.023
Ayuntamiento de Molina de Segura	Murcia	64.065
Ayuntamiento de La Línea de la Concepción	Cádiz	64.595
Ayuntamiento de Vilanova i la Geltrú	Barcelona	65.890
Ayuntamiento de Sagunto	Valencia	66.070
Ayuntamiento de Majadahonda	Madrid	68.110
Ayuntamiento de Rivas Vaciamadrid	Madrid	68.405
Ayuntamiento de Ponferrada	León	68.736
Ayuntamiento de Alcalá de Guadaíra	Sevilla	70.155
Ayuntamiento de Mijas	Málaga	73.787
Ayuntamiento de Vélez-Málaga	Málaga	74.190
Ayuntamiento de San Sebastián de Los Reyes	Madrid	75.912
Ayuntamiento de Manresa	Barcelona	76.558
Ayuntamiento de Chiclana de la Frontera	Cádiz	77.293
Ayuntamiento de Torrent	Valencia	78.543
Ciudad Autónoma de Ceuta	Ceuta	78.674
Ayuntamiento de Gandía	Valencia	80.020
Ayuntamiento de Toledo	Toledo	82.291
Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón	Madrid	82.428
Ayuntamiento de Sant Boi de Llobregat	Barcelona	82.428
Ayuntamiento de Palencia	Palencia	82.651
Ayuntamiento de Roquetas de Mar	Almería	82.665
Ayuntamiento de Guadalajara	Guadalajara	83.039

Ayuntamiento	Provincia	Habitantes
Ayuntamiento de Las Rozas de Madrid	Madrid	86.340
Ayuntamiento de El Puerto de Santa María	Cádiz	87.696
Ayuntamiento de Coslada	Madrid	90.280
Ayuntamiento de Lorca	Murcia	91.906
Consell Insular de Menorca	Menorca	92.434
Ayuntamiento de Santiago de Compostela	A Coruña	95.092
Ayuntamiento de Girona	Girona	96.188
Ayuntamiento de Lugo	Lugo	96.678
Ayuntamiento de Torrevieja	Alicante	101.792
Mancomunidad de Municipios Sostenibles de Cantabria	Cantabria	105.505
Ayuntamiento de Reus	Tarragona	107.118
Ayuntamiento de Ourense	Ourense	107.742
Ayuntamiento de Parla	Madrid	115.611
Ayuntamiento de Algeciras	Cádiz	116.209
Ayuntamiento de Jaén	Jaén	116.557
Ayuntamiento de Santa Coloma de Gramenet	Barcelona	119.717
Ayuntamiento de Mataró	Barcelona	121.722
Ayuntamiento de Dos Hermanas	Sevilla	122.943
Ayuntamiento de Cádiz	Cádiz	126.766
Consell Insular d'Eivissa	Eivissa	129.562
Ayuntamiento de León	León	134.305
Ayuntamiento de Marbella	Málaga	134.623
Ayuntamiento de Tarragona	Tarragona	140.323
Ayuntamiento de San Cristóbal de la Laguna	Santa Cruz de Tenerife	150.661
Ayuntamiento de Logroño	La Rioja	152.107
Ayuntamiento de Getafe	Madrid	167.164
Ayuntamiento de Alcorcón	Madrid	167.967
Ayuntamiento de Albacete	Albacete	169.716
Ayuntamiento de Burgos	Burgos	178.966
Ayuntamiento de Castellón de la Plana	Castellón	180.005
Ayuntamiento de Santander	Cantabria	182.700
Ayuntamiento de Donostia-San Sebastián	Guipúzcoa	185.357
Ayuntamiento de Leganés	Madrid	186.066
Ayuntamiento de Almería	Almería	188.810
Ayuntamiento de Fuenlabrada	Madrid	197.836
Ayuntamiento de Pamplona	Navarra	198.491
Ayuntamiento de Alcalá de Henares	Madrid	204.574



4.
Descripción de
los modelos de
reducción de
emisiones de GEI
en vertederos
españoles más
implantados.
Buenas prácticas

Ayuntamiento	Provincia	Habitantes
Ayuntamiento de Sabadell	Barcelona	206.493
Ayuntamiento de Jerez de la Frontera	Cádiz	207.532
Ayuntamiento de Badalona	Barcelona	219.547
Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife	Santa Cruz de Tenerife	222.417
Ayuntamiento de Oviedo	Asturias	224.005
Ayuntamiento de Elche	Alicante	230.112
Ayuntamiento de Granada	Granada	234.325
Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz	Álava	235.661
Ayuntamiento de A Coruña	A Coruña	246.056
Ayuntamiento de L'Hospitalet de Llobregat	Barcelona	257.038
Ayuntamiento de Gijón	Asturias	277.554
Ayuntamiento de Vigo	Pontevedra	297.332
Ayuntamiento de Valladolid	Valladolid	317.864
Ayuntamiento de Córdoba	Córdoba	328.428
Ayuntamiento de Alicante	Alicante	334.757
Diputación Provincial de Ourense	Ourense	335.642
Ayuntamiento de Las Palmas de Gran Canaria	Las Palmas	381.847
Ayuntamiento de Palma de Mallorca	Mallorca	401.270
Ayuntamiento de Murcia	Murcia	436.870

Tabla 12. Listado de municipios con mas de 50.000 habitantes.

- Listado de vertederos que captan biogás: El Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino facilitó una lista inicial con 68 vertederos que captan biogás. Sin embargo, en muchos casos no se disponía de los datos de contacto. Realizando un seguimiento telefónico de dicho listado se consiguieron los datos de contacto de 22 vertederos, a los que se les envió la encuesta (ver Tabla 13).

Nombre Vertedero	Provincia	Término Municipal	Titular
Ages 1	Albacete	Albacete	Consortio Provincial de Medioambiente de Albacete
Ages 3	Ciudad Real	Alcázar de San Juan	Mancomunidad de Servicios Consermancha
Ages 7-8	Toledo	Toledo	Consortio de Servicios Públicos Medioambientales de La Provincia de Toledo
Alcalá de Guadaira	Sevilla	Alcalá de Guadaira	Abonos Orgánicos de Sevilla, S.A.
Alcala de Henares	Madrid	Alcala de Henares	Mancomunidad del Este
Alicante	Alicante	Alicante	Ingeniería Urbana, S.A. (Inusa)
Arico	Santa Cruz de Tenerife	Arico	Cabildo Insular de Tenerife
Bellver de Cerdanya	Lleida	Bellver de Cerdanya	Consell Comarca de La Cerdanya
Cenicero de Valdemingómez	Madrid	Madrid	Urbaser, S.A.

Nombre Vertedero	Provincia	Término Municipal	Titular
Cespa	Murcia	Murcia	Ayuntamiento de Murcia
Cogersa-Ru	Asturias	Corvera	Cogersa
Colmenar Viejo	Madrid	Colmenar Viejo	Comunidad de Madrid
Comarca de Pamplona	Navarra	Valle de Aranguren	Mancomunidad de La Comarca de Pamplona
Garraf	Barcelona	Gavà	Entitat Metropolitana de Serveis Hidràulics i Tractament de Residus
Juan Grande	Las Palmas	San Bartolomé de Tirajana	Excmo.Cabildo Insular de Gran Canaria
Llagostera	Girona	Llagostera	Consorci Per A La Gestio del Complex de Tractam. Residus de Solius Paratge de Solius Santa Cristina D'aro
Los Ruices	Málaga	Málaga	Ayto. Malaga
Najera	La Rioja	Najera	Vertidos Rioja, S.L.
Nueva Rendija	Madrid	San Fernando de Henares y Mejorada del Campo	Comunidad de Madrid
Pedret I Marzà	Girona	Pedret I Marzà	Consell Comarcal de L'alt Empordà
Pinto	Madrid	Pinto	Comunidad de Madrid
Proambiente	Murcia	Abanilla	Proambiente, S.L.
Sogaza Rsu	A Coruña	Cerceda	Sociedade Galega do Medioambiente, S.A. (Sogama)
Vacarisses	Barcelona	Vacarisses	Tractament Tecnic D'escombraries, S.A. (Tratesa)
Valladolid	Valladolid	Valladolid	Ayuntamiento De Valladolid
Zonzamas-Lanzarote	Las Palmas	Tegui	Excmo.Cabildo Insular De Lanzarote
Artigas	Vizcaya	Bilbao	Ayuntamiento de Bilbao
Gardelegui	Álava	Álabavitoria	Ayuntamiento de Vitoria
Meruelo	Cantabria	Meruelo	Medio Ambiente, Agua, Residuos y Energía (Mare)
Sasieta	Guipuzcoa	Beasain	Mancomunidad Sasieta
Logroño	La Rioja	Logroño	
San Marcos (Guipúzcoa)	Guipúzcoa		

Tabla 13. Listado de vertederos que captan biogás.
Fuente: MARM.

Una vez elaboradas las encuestas y obtenido el listado definitivo de municipios y entidades de gestión, se procedió a enviar las encuestas a un total de 198 municipios y vertederos.

Avanzando ligeramente los resultados obtenidos, cabe resaltar que la mayoría de los municipios han tenido dificultades para responder a la encuesta. Es por ello que las conclusiones que se pueden obtener de este análisis no son representativas y no pueden ser utilizadas para mostrar la realidad sobre la situación actual de los vertederos españoles. Sin embargo, sí pueden ser utilizadas a modo de ejemplo. Es decir, los resultados de las encuestas pueden servir como ejemplo para otros municipios que quieran implantar un sistema de aprovechamiento de biogás.

A continuación se recoge de forma detallada el seguimiento que se realizó de las encuestas durante el transcurso del proyecto.

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

- Primero se realizó un envío de la encuesta en formato Word y PDF mediante correo electrónico a todos los municipios de la Red de más de 20.000 y menos de 500.000 habitantes. También se puso a su disposición una plataforma informática en la que podían rellenar la encuesta *online*, de manera sencilla y rápida. En este primer contacto se optó por tener en cuenta todas las encuestas recibidas, aunque llegaran fuera del plazo inicialmente marcado.

Muchos de los municipios contestaron al correo electrónico, pero no a la encuesta, indicando que la gestión del vertedero de su municipio correspondía a otras entidades (mancomunidades, consorcios, comarcas, Diputaciones, Comunidades Autónomas, empresas privadas, etc.). En algunos casos, indicaban los datos de contacto de dichas entidades.

Teniendo en cuenta el resultado de este primer envío, se volvió a enviar un segundo correo electrónico a todos los municipios seleccionados, indicando que se había detectado que había muchos municipios de la Red que no gestionaban ningún vertedero. En ese caso, se les solicitó que lo comunicaran, y que si era posible, facilitaran los datos de contacto y la entidad que gestionaba el vertedero donde se eliminan los residuos del municipio, con el fin de poder contactar con ellos.

El resultado de este primer contacto se presenta en el siguiente gráfico. Un 7% de los municipios contestaron a la encuesta (en algunos casos, la encuesta está completamente rellena, pero en otros sólo parcialmente). Otro 28% contestó al correo electrónico que se les envió, pero no enviaron la encuesta completada, incluyendo algunos que indicaron los datos de contacto de la entidad que gestiona los residuos de su municipio.

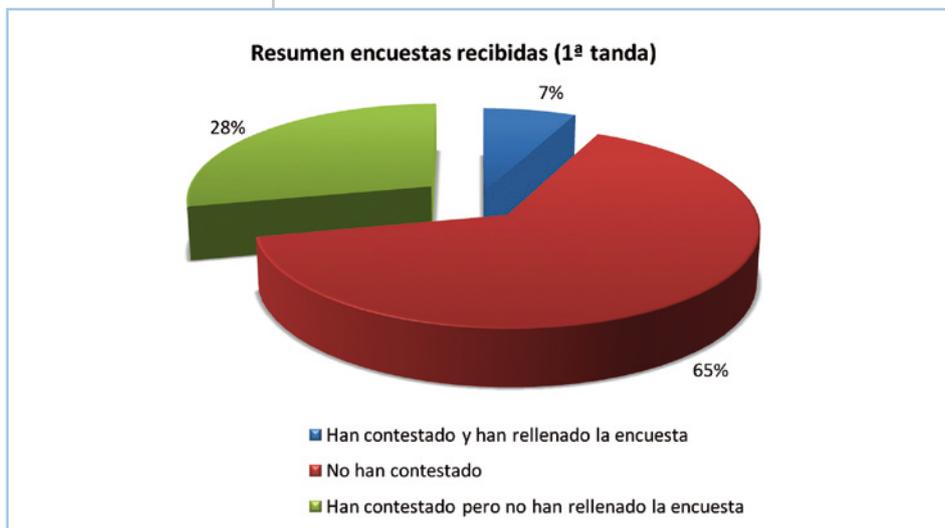
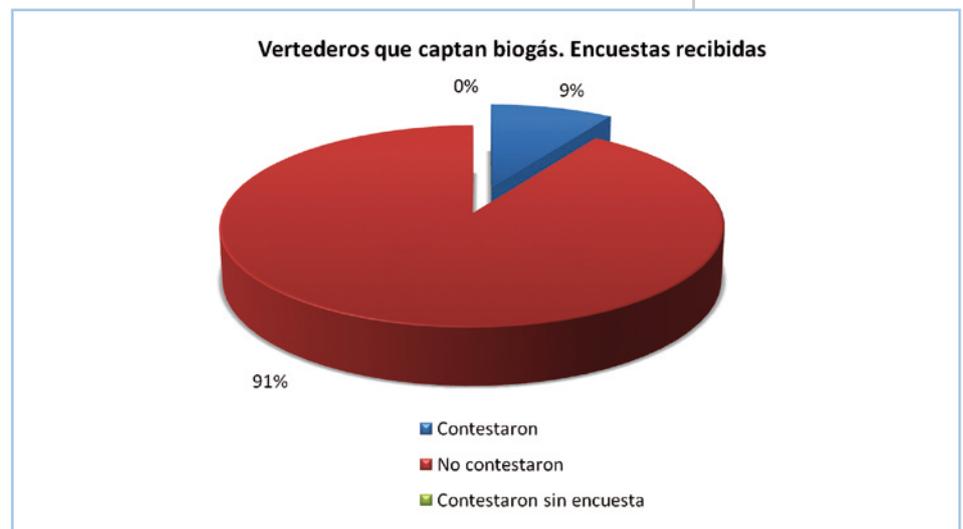


Figura 36. Resumen encuestas recibidas (1ª tanda)

- Por otro lado, se envió un correo electrónico con una encuesta más detallada a los 22 vertederos que captan biogás de los que se disponían datos de contacto gracias al listado que facilitó el MARM. En este correo se les explicó el objetivo y las fases del proyecto, y que para la correcta elaboración del mismo se requería la recopilación de datos reales sobre las instalaciones de captación y aprovechamiento de biogás en los vertederos españoles. También se les informó de que el MARM había indicado que su vertedero disponía de dicha instalación.

De los 22 vertederos a los que se les envió el correo electrónico, únicamente 2 de ellos contestaron a la encuesta, lo que supone un 9% del total. El 91% restante no contestaron al correo electrónico, y por lo tanto, no han cumplimentado la encuesta.

Figura 37. Resumen encuestas recibidas (Vertederos que captan biogás)



- A la vista de las escasas respuestas recibidas, se realizó un seguimiento telefónico a las empresas o entidades que gestionan los vertederos de los municipios, partiendo de los datos que los propios municipios habían facilitado. En este seguimiento telefónico se recopiló información de contacto de cada una de estas empresas, explicándoles el motivo de la llamada y los objetivos del proyecto, y que en pocos días recibirían una encuesta. Con los datos de contacto recopilados, se procedió nuevamente a enviar las encuestas. Se envió la encuesta a 7 entidades que gestionan vertederos de municipios grandes, a 10 que gestionan vertederos de municipios medianos, y de nuevo a los vertederos que captan biogás y que no habían contestado en el primer envío.

De este segundo envío de encuestas, únicamente han contestado 2 municipios grandes, lo que supone un 5% del total. Otro 5% del total (otros 2 municipios), han contestado al correo electrónico, pero no han rellenado la encuesta. Por último, un 90% de los encuestados no han rellenado la encuesta, ni han contestado al correo electrónico.

Figura 38. Resumen encuestas recibidas (2ª tanda)



- Finalmente, y con el objetivo de incrementar el número de respuestas recibidas, se procedió a realizar un último envío de la encuesta a todos los municipios de la Red entre 20.000 y 500.000 habitantes que no habían contestado anteriormente. En esta última tanda ningún municipio

contestó a la encuesta, por lo que se consideró que esta vía de obtención de información ya no era útil y se procedió a cerrar la etapa de recopilación de información.

Como se ha comentado anteriormente, el reducido grado de respuesta a las encuestas implica que la muestra no es representativa. Por lo tanto, el análisis que se realiza a continuación proporciona información útil sobre la gestión de algunos vertederos, pero en ningún caso puede considerarse como un reflejo adecuado de la situación actual del conjunto de los vertederos españoles.

En todo caso, y como se ha comentado anteriormente, cada vertedero hay que analizarlo de forma independiente, debido a que existen multitud de factores que influyen sobre la generación, la captación y el aprovechamiento del biogás, y aunque se aplique la misma técnica de diseño y captación de biogás en dos vertederos similares, los resultados pueden ser muy diferentes. Por ello, se considera que lo mejor es estudiar las condiciones y la situación de cada vertedero por separado cuando se quiera realizar un aprovechamiento energético del biogás.

4.11.1 Análisis de las encuestas recibidas

En este epígrafe se realiza un análisis de las encuestas recibidas, agrupándolas por grupos, de la misma manera que se han agrupado los municipios para el envío de encuestas.

En primer lugar se realiza el análisis de las encuestas recibidas de los municipios grandes. En este análisis se comenta brevemente los resultados obtenidos y se muestra una tabla – resumen en la que se exponen las respuestas recibidas a las cuestiones más relevantes del cuestionario.

En segundo lugar, y de la misma manera, se realiza un análisis de las encuestas recibidas de los municipios medianos. Este análisis es más escueto, debido a que se dispone de menos datos. Igualmente se muestra, al final del apartado, una tabla – resumen con las respuestas recibidas.

Por último, se procede a analizar las encuestas recibidas de los municipios que realizan captación de biogás. En este apartado únicamente se muestra la tabla resumen, debido a que, como se ha descrito anteriormente, tan sólo 2 vertederos han completado la encuesta, por lo que no es posible obtener conclusiones relevantes.

Municipios grandes

En este grupo de municipios es donde más éxito de respuestas a las encuestas se ha obtenido, aunque no se puede considerar que la muestra sea representativa. Los principales datos obtenidos son los siguientes:

- La totalidad de los municipios realizan recogida selectiva de sus residuos. Únicamente uno de ellos no ha contestado a esta pregunta.
- Únicamente en 5 municipios (uno de ellos como experiencia piloto) se realiza recogida selectiva de la materia orgánica. 9 de ellos no la realizan y uno de ellos no ha contestado a esta pregunta. Por lo tanto, el 31,25% de los municipios realizan recogida selectiva de la materia orgánica.
- Un 81% de los municipios han aportado datos sobre la cantidad de residuos urbanos que se eliminan en vertedero. Según los datos recibidos, la cantidad media de residuos urbanos depositados en vertedero asciende a 113.570 toneladas/año, lo que equivale a 272 kilos por habitante al año, que suponen un 37,17% del total de los residuos generados.
- Respecto al número de vertederos, el 50% de los municipios dispone de 1 único vertedero. El 12,5% dispone de 2 vertederos y el 18,75% de los municipios disponen de 3 vertederos. El 18,75% de los municipios no contestó a esta pregunta (ver Figura 39).
- En cuanto a la tipología de los vertederos, todos los municipios de la muestra disponen de, al menos, un vertedero de residuos no peligrosos, mientras que sólo un municipio dispone

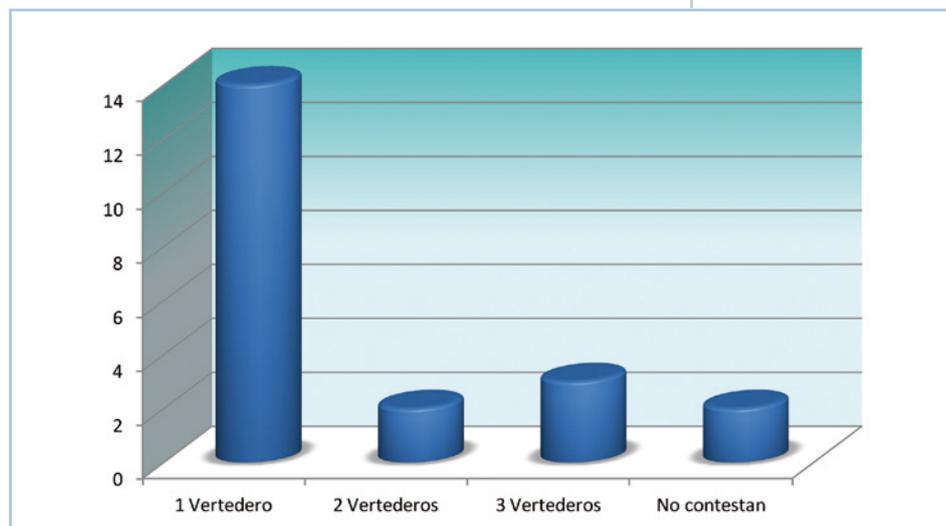


Figura 39. Número de vertederos.

de un vertedero de residuos peligrosos. Dos de ellos indican, además, que disponen de un vertedero de residuos inertes.

- Respecto a la aplicación del artículo 13 del Real Decreto 1481/2001, relativo al control de gases del vertedero, 10 municipios indican que sí lo aplican, uno de ellos no lo aplica y 5 municipios no contestan. En cuanto al artículo 14 referente al plan de clausura y mantenimiento post-clausura, 6 municipios indican que sí lo aplican, mientras que 2 de ellos afirman que no lo aplican y los 8 municipios restantes no contestan.
- En cuanto al sistema de gestión, 4 municipios indican que están gestionados por contrata y otros 5 de ellos por concesión, mientras que un único vertedero está gestionado por medios propios. Otro municipio contesta que esta gestionado por otros medios, pero no indica cuál de ellos. Cuatro municipios no contestan a esta pregunta.
- Los datos relativos a la superficie, volumen, capacidad disponible y años que se puede seguir explotando el vertedero aparecen reflejados en la tabla – resumen que aparece al final de este apartado.
- En la Figura 40 aparece reflejado la forma de disponer los residuos en el vertedero. Los municipios utilizan mayoritariamente la técnica de las celdas, seguido del relleno por áreas, mientras que la técnica de las trincheras es la menos utilizada.

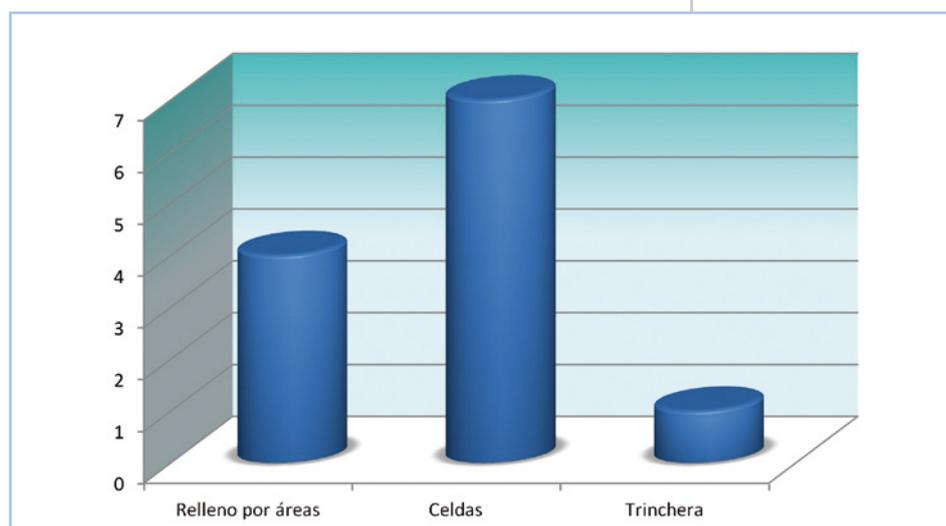


Figura 40. Forma de disponer los residuos

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

- El 35,3% de los municipios realizan estimaciones de la cantidad de biogás generado en el vertedero, mientras que el 29,41% realiza mediciones. El otro 35,3% de los municipios encuestados no han respondido a esta pregunta.
- El principal aprovechamiento del biogás que se realiza en los vertederos es la obtención de energía eléctrica (7 de los municipios), mientras que el aprovechamiento de energía térmica únicamente lo realiza un municipio. Sin embargo, hay un elevado porcentaje de municipios que no han contestado a esta pregunta (ver Figura 41). La cantidad de biogás generado en los vertederos, aparece igualmente en la tabla resumen que se muestra al final.

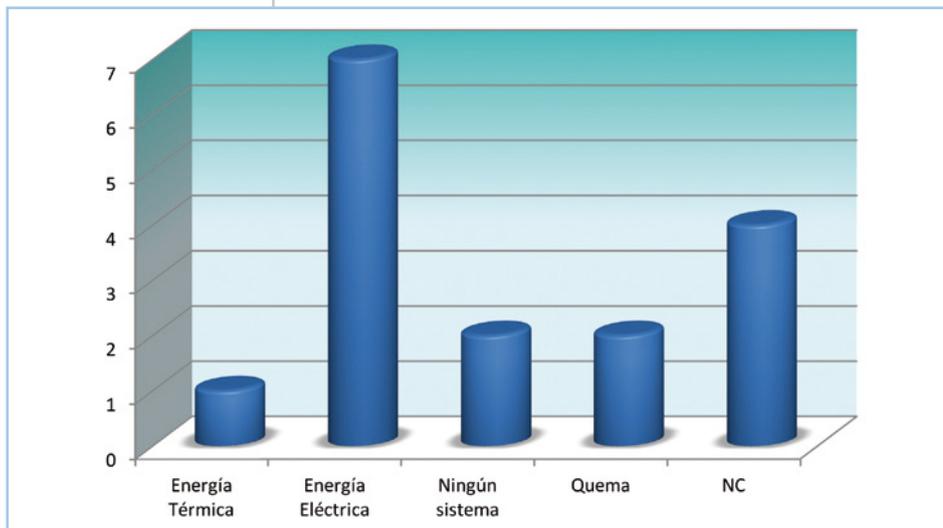


Figura 41. Aprovechamiento energético de biogás en vertederos

- Respecto a la aplicación de un plan de explotación o buenas prácticas de explotación para reducir las fugas incontroladas de biogás, la mayoría de los municipios que han respondido realizan la cubrición de las celdas o desgasificación de las celdas.
- La mayoría de los municipios (68,75%) no han respondido a la pregunta de si disponen de información sobre el potencial de reducción de emisiones de biogás en el vertedero y el coste de las medidas necesarias para ello. Las respuestas recibidas han sido las siguientes:
 1. El Ayuntamiento de Lorca indica que tiene un plan de generación de energía eléctrica ya aprobado, que tendrá un coste de 1.765.056 Euros.
 2. En el vertedero de Asturias indican que existe el potencial para instalar una planta de biometanización de la fracción orgánica de 60.000 toneladas, con un coste de 19 millones de euros.
 3. Por su parte, en Valladolid indican que existe una planta de tratamiento de residuos biodegradables, que tiene un coste de 841.417 euros.
- Respecto a las técnicas de reducción de metano, únicamente se dispone de información de 4 municipios:
 1. Uno de ellos indica que reduce las emisiones de metano realizando cubriciones de las celdas.
 2. Otro municipio indica que realiza quema controlada y generación de energía eléctrica.
 3. El tercero indica que recuperan la parte orgánica y que realizan cubrición.

4. El último indica que la materia orgánica la preparan en plantas de compostaje para reducir al máximo las emisiones de metano en vertedero.

- La cantidad de energía eléctrica generada en los casos en los que se realiza este tipo de aprovechamiento energético del biogás aparece reflejado en la tabla resumen. 7 municipios indican que disponen de infraestructuras eléctricas próximas, dos de ellos indican que no tienen y 7 de ellos no contestan.
- Existen otras aplicaciones del biogás producido en los vertederos: dos municipios de los encuestados afirman que se utiliza como combustible para flota de vehículos, de autobuses y de camiones de recogida de RSU.

A continuación se expone la tabla resumen que se ha elaborado con las encuestas recibidas.

MUNICIPIOS GRANDES					
Municipio	Provincia	PARTE B DEL CUESTIONARIO			
		Recogida selectiva	Recogida selectiva de materia orgánica (M.O.)	% M.O.	Cantidad de residuos eliminados en vertedero
San Sebastián de los Reyes	Madrid	Si	No	-	RSU: 29,729 Tn/año Envases: 1,700 Tn/año
Chiclana de la Frontera	Cádiz	Si	No	-	-
Lorca	Murcia	Si	No	41,15	70.078 Tn/año
Torreveja	Alicante	Si	Si	-	56.000 Tn/año
Alcorcón	Madrid	Si	No	-	-
Burgos	Burgos	Si	Si	-	54.750 Tn/año
Castellón	Castellón	Si	No	6,93	34.150 Tn/año
Pamplona	Navarra	Si	No	59	130.000 Tn/año
Vitoria - Gasteiz	Alava	Si	Si (experiencia piloto)	66,64	89.734 Tn/año
Datos proporcionados por COGERSA, entidad que gestiona los residuos de toda la CCAA	Asturias	-	-	38,11	-
Valladolid	Valladolid	Si	Si	-	233.677 Tn/año
Alicante	Alicante	Si	No	8	150.000 Tn/año
Murcia	Murcia	Si	No	11,2	382.520 Tn/año
Los Barrios (Campo Gibraltar)	Cádiz	Si	No	-	151.677 Tn/año
Menorca	Illes Balears	Si	No	78,58	44.546 Tn/año
Barcelona	Barcelona	Si	Si	30,8	429.318 Tn/año



4.
Descripción de
los modelos de
reducción de
emisiones de GEI
en vertederos
españoles más
implantados.
Buenas prácticas

MUNICIPIOS GRANDES						
Municipio	Provincia	PARTE B1 DEL CUESTIONARIO (1)				
		Nº de vertederos (tipo)	Aplica RD 1481/2001 gases	Aplica RD 1481/2001 clausura y postclausura	Sistema de Gestión	Año comienzo de explotación
San Sebastián de los Reyes	Madrid	-	-	-	-	-
Chiclana de la Frontera	Cádiz	-	-	-	-	-
Lorca	Murcia	1 (Residuos no peligrosos)	Si	Si	Otros	1999
Torreveija	Alicante	1	-	-	-	-
Alcorcón	Madrid	2 (Residuos no peligrosos e inertes)	-	-	-	-
Burgos	Burgos	1 (Residuos no peligrosos)	Si	-	Concesión	2002
Castellón	Castellón	1 (Residuos no peligrosos)	No	No	Contrata	1999
Pamplona	Navarra	1 (Residuos no peligrosos)	Si	Si	Medios propios	1992
Vitoria - Gasteiz	Álava	1 (Residuos no peligrosos)	Si	Si	Contrata	1972
-	Asturias	3 (Residuos inertes, residuos no peligrosos y residuos peligrosos)	Si	Si	Consortio	1986 1993 2003
Valladolid	Valladolid	1 (Residuos no peligrosos)	Si	-	Contrata	1976
Alicante	Alicante	3 (1 de residuos inertes y 2 de residuos no peligrosos)	Si	Si	Concesión	2005 2006 1983
Murcia	Murcia	2 (Residuos inertes y residuos no peligrosos)	Si	Si	Concesión y contrata	1994 1998
Los Barrios (Campo Gibraltar)	Cádiz	1 (Residuos no peligrosos)	Si	-	Concesión	2003
Menorca	Illes Balears	1 (Residuos no peligrosos)	Si	No	Concesión	1996
Barcelona	Barcelona	3 (Residuos no peligrosos)	-	-	-	-

MUNICIPIOS GRANDES								
PARTE B1 DEL CUESTIONARIO (1)								
Superficie vertedero (m ²)	Volumen vaso de vertido (m ³)	Capacidad disponible (m ³)	Años que se puede seguir explotando	Técnica disposición vertidos	Estimación o medición del biogás generado	Recogida tratamiento biogás	Cantidad biogás generado (último dato anual disponible, en m ³ /año)	
-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	
111.858	1.204.146	428.482	3,5	Celdas	Estimación	Ningún sistema	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	
159.000	942.856	657.143	-	Relleno por áreas	Estimación	Chimeneas	1.102.412	
70.655	1.460.000	129.316	-	Relleno por áreas	Estimación	Ningún sistema	-	
445.000	4.500.000	3.500.000	15-20	Celdas	Estimación y medición	Energía térmica	10.267.050	
520.000	-	-	-	Celdas	Medición	Energía eléctrica	-	
450.000 75.000 90.000	-	-	Hasta 2015, 2020 y 2032	-	Medición (en el de residuos no peligrosos)	Energía eléctrica	49.512.195	
395.000	2.345.240	-	6,00	Relleno por áreas	Estimación	Energía eléctrica	5.792.203	
216.018 18.756 175.000	3.010.848 62.145 1.935.000	RNP: 611.358 RI: 1.925.017 RNP: 0	RNP: 3,5 RI: 96 RNP: 0	1 por trinchera o zanja y 2 por celdas	Medición	Energía eléctrica (en los dos de RNP)	RNP: 7.592.520 RI: 0 RNP: 843.613	
347.300 107.600	5.448.167 1.378.000	3.364.699 y 144.156	2017 y 2019	Celdas	-	Energía eléctrica	11.256.000	
75.172	791.872	-	1,84	Celdas	-	Ningún sistema	-	
57.740	898.925	11.169	-	Relleno por áreas	Estimación	Canalización por chimeneas	-	
-	-	-	-	-	Medición	Energía eléctrica	56.999.746	



4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

MUNICIPIOS GRANDES			
Municipio	Provincia	PARTE B1 DEL CUESTIONARIO (2)	
		Buenas prácticas para reducir las fugas incontroladas de biogás	Potencial de reducción de emisiones
San Sebastián de los Reyes	Madrid	-	-
Chiclana de la Frontera	Cádiz	-	-
Lorca	Murcia	Cubrición de residuos, mediciones mensuales del CH ₄ y SH ₂ .	Generación energía eléctrica
Torreveja	Alicante	-	-
Alcorcón	Madrid	-	-
Burgos	Burgos	Cubrición diaria	-
Castellón	Castellón	-	-
Pamplona	Navarra	Extracción de biogás por celdas	-
Vitoria - Gasteiz	Álava	-	-
-	Asturias	Sistema de extracción de biogás	Planta biometanización
Valladolid	Valladolid	Cubrición de residuos	Planta de tratamiento de residuos
Alicante	Alicante	Sellado de celdas, pozos de extracción	No
Murcia	Murcia	Cubrición diaria, desgasificación, mediciones	-
Los Barrios (Campo Gibraltar)	Cádiz	Cubrición diaria, chimeneas	-
Menorca	Illes Balears	-	-
Barcelona	Barcelona	-	Reducción de emisiones de CO ₂

MUNICIPIOS GRANDES					
PARTE B1 DEL CUESTIONARIO (2)					
	Coste de las medidas (€)	Técnicas reducción del metano	Energía anual generada	Infraestructuras eléctricas próximas	Otra valorización biogás
	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-
	1.765.056	Celda sellada	-	200 m	Valorización de purines
	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-
	-	-	-	No	-
	-	-	-	1 Km.	-
	-	Quema controlada. Generación de energía eléctrica	46.314.158 Kw/h	8 Km.	Flota de autobuses urbanos. Camiones de recogida de RSU
	-	-	-	-	-
	19.000.000	-	-	No	No
	841.417	-	2.169.862 Kw.	25 Km.	No
	-	-	11.495,209 MWh	6 Km.	No
	-	-	16.425.681 Kw/h	5 Km.	Flota de vehículos
	-	Recuperación de la parte orgánica, cubrición	-	-	-
	-	Planta de compostaje	-	3 Km.	-
	1 millón de euros	-	-	Si	Posibilidad de combustible para autobuses

Tabla 14. Tabla – resumen encuestas municipios grandes

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

Municipios medianos

En este caso se ha obtenido un menor éxito de respuestas que en los municipios grandes. Únicamente han enviado la encuesta 5 municipios, y en la mayoría de los casos no está completa, por lo que las estadísticas que se van a mostrar a continuación no pueden ser tomadas como una media general de los municipios españoles, ya que no constituye una muestra representativa.

- En primer lugar, cabe mencionar que ninguno de los 5 municipios analizados dispone de recogida selectiva de la materia orgánica. La cantidad de residuos depositados en vertedero se muestra en la tabla resumen al final de este epígrafe.
- En cuanto al número de vertederos del que disponen los municipios, el Ayuntamiento de Galapagar indica que dispone de 3 vertederos, uno de residuos no peligrosos, otro de residuos peligrosos y otro de inertes. En el caso del Ayuntamiento de Soria, disponen de dos vertederos, uno de residuos no peligrosos y otro de residuos peligrosos. El Ayuntamiento de San Ildefonso, dispone únicamente de un vertedero. Por su parte, el Ayuntamiento de Pajares de Adaja indica que dispone de un vertedero, pero no especifica su tipología.
- En cuanto a la aplicación de los artículos 13 y 14 del Real Decreto 1481/2001, los municipios de San Ildefonso, Soria y Pajares de Adaja, indican que sí lo cumplen. Los demás municipios no contestan a esta pregunta.

Respecto a las demás cuestiones planteadas en la encuesta, únicamente el Ayuntamiento de Soria ha contestado, y el de Pajares de Adaja en algunos casos:

- La gestión del vertedero se realiza mediante concesión en Soria y a través de contrata en Pajares de Adaja.

MUNICIPIOS MEDIANOS							
PARTE B1 CUESTIONARIO							
Municipio	Provincia	Nº de vertederos (tipo)	Aplica RD 1481/2001 gases	Aplica RD 1481/2001 clausura y postclausura	Sistema de gestión	Año de comienzo de la explotación	Volumen actual del vaso de vertido (m³)
Galapagar	Madrid	3 (Inertes, RNP, RP)	-	-	-	-	-
Real Sitio de San Ildefonso	Segovia	1	Si	Si	-	-	-
Soria	Soria	2 (Residuos inertes y residuos no peligrosos)	Si	Si	Concesión	1996	56.740
Alhaurín de la Torre	Andalucía	-	-	-	-	-	-
Pajares de Adaja	Avila	1	Si	Si	Contrata	2004	-

- El vertedero de Soria se empezó a explotar en el año 1996 y su capacidad se agotará este año. Sin embargo, se está realizando una ampliación de celdas que ampliará su capacidad por otros 10 años más. Los vertidos se disponen en celdas. Realizan estimación del biogás generado y lo queman en antorcha. No disponen de infraestructuras eléctricas próximas y no realizan otra valorización energética del biogás.
- El vertedero de Pajares de Adaja se empezó a explotar en el año 2004. No disponen de infraestructuras eléctricas próximas.

A continuación se muestra la tabla resumen de las respuestas de estos municipios. Se han eliminado las columnas en las que ningún municipio ha contestado.

MUNICIPIOS MEDIANOS				
PARTE B CUESTIONARIO				
Municipio	Provincia	Recogida selectiva de materia orgánica (M.O.)	Cantidad de residuos depositados en vertedero	Composición M.O. (%)
Galapagar	Madrid	No	15.000 Tn/año	80
Real Sitio de San Ildefonso	Segovia	No	2,631 Tn/año	-
Soria	Soria	No	7.400 Tn/año	8
Alhaurín de la Torre	Andalucía	No	26.399,2 Tn/año	-
Pajares de Adaja	Avila	No	13,0305 Tn/año	50

MUNICIPIOS MEDIANOS						
PARTE B1 CUESTIONARIO						
Capacidad disponible (m ²)	Años explotación	Técnica disposición vertidos	Estimación medición del biogás generado	Recogida y tratamiento del biogás	Infraestructuras eléctricas próximas	Otra valorización biogás
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
19.000	10 años (ampliación)	Celdas	Estimación	Quemado en antorcha	No	No
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	No	-

Tabla 15. resumen encuestas Municipios medianos

4. Descripción de los modelos de reducción de emisiones de GEI en vertederos españoles más implantados. Buenas prácticas

Vertederos que captan biogás

En cuanto a los vertederos que captan biogás, únicamente han contestado dos de ellos, localizados Bilbao y en la Comarca de la Garrotxa (Cataluña).

El vertedero de Bilbao realiza aprovechamiento energético del biogás mediante generación de energía eléctrica. El de La Garrotxa no realiza ningún tipo de aprovechamiento energético del biogás, pero si procede a la quema del gas generado.

A continuación se muestra la tabla resumen de estos dos vertederos:

VERTEDEROS QUE CAPTAN BIOGÁS		
Municipio	Comarca de La Garrotxa	Bilbao
Provincia	Cataluña	Bilbao
Recogida selectiva de materia orgánica	No	No
Cantidad de residuos depositados en vertedero	28.000 Tn/año	119.000 Tn/año
Clase de vertedero	Residuos no peligrosos	Residuos no peligrosos
Aplica RD 1481/2001 gases	Si	Si
Aplica RD 1481/2001 clausura y postclausura	-	Si
Sistema de gestión	Concesión	Contrata
Año comienzo explotación	1.988	1.976
Superficie vertedero (m²)	43.500	266.000
Volumen actual vaso de vertido (m³)	773.687	2.700.000
Capacidad disponible (m³)	165.274	2.273.000
Años de explotación	4	Hasta 2022
Técnica de disposición de los vertidos	Celdas	Relleno por áreas
Recogida/tratamiento del biogás	Quema	Energía eléctrica
Cantidad biogás generado (último dato anual disponible, en m³/año)	674.070	5.228.997
Buenas prácticas para reducir las fugas incontroladas de biogás	Está en estudio la canalización y tratamiento del biogás en fase de explotación	Cubrición diaria, presellado. Medición de oxígeno. Purgados automáticos
Razones para la elección del sistema de aprovechamiento de biogás actual	-	Alternativa más viable técnica y económicamente
Coste aproximado	-	961.619 euros
Energía anual generada	-	136,808 MW/h
Infraestructuras eléctricas próximas	-	500 m

Tabla 16. Tabla – resumen encuestas Vertederos que captan biogás

4.12. Identificación de los principales problemas y obstáculos para el aprovechamiento energético del biogás

Los vertederos son uno de los métodos más económicos para eliminar residuos de distintas características, pero generan importantes inconvenientes e impactos ambientales. Por ello, resulta necesario mejorar su gestión, lo que incluye convertirlos en una importante fuente de energía.

Sin embargo, en la actualidad existen una serie de barreras que es necesario superar para aumentar el aprovechamiento energético del biogás generado en los vertederos españoles. A continuación se resumen los principales obstáculos:

1. Como ya se ha comentado anteriormente, el elevado contenido en metano del biogás generado en los vertederos los convierte en una atractiva fuente de energía. Sin embargo, en la actualidad, su aprovechamiento sólo es técnica y económicamente viable a partir de potencias superiores a 400 kWe, lo que constituye el principal obstáculo que se encuentran los municipios españoles a la hora de implantar un sistema de valorización energética en sus vertederos: es necesario disponer de caudales elevados de biogás, con alta concentración en metano, para que sea aprovechable. Por este motivo, los pequeños vertederos quedan descartados para la valorización energética, siendo legalmente obligatorio que, al menos, procedan a quemar el biogás en antorcha.
2. Por otro lado, el coste de implantación de los equipos de aprovechamiento energético de biogás es muy elevado, lo que también constituye uno de los principales problemas a los que se enfrentan los municipios españoles. Muchos municipios son pequeños y disponen de pocos recursos económicos, por lo que no se pueden permitir implantar estos sistemas de forma aislada, siendo necesario que cuenten con el apoyo de entidades Supramunicipales (Diputaciones, CCAA, etc.).
3. Además, muchos vertederos actualmente activos comenzaron siendo ilegales, de forma que inicialmente no cumplían casi ninguno de los requisitos que actualmente exige la normativa sobre vertederos. En gran parte de estos vertederos, se desconoce el tipo de residuos que hay depositados en ellos, por lo que no se pueden realizar estimaciones sobre la cantidad de biogás que producen, dificultando el proceso de toma de decisiones sobre el mejor método de aprovechamiento de esta fuente de energía.
4. También es necesario tener en cuenta que los vertederos tienen un periodo en el que alcanzan su punto máximo de generación de biogás. En muchos casos, los vertederos actualmente activos han traspasado este periodo, por lo que tampoco es viable instaurar un sistema de valorización energética del biogás en ellos.
5. Por otro lado, en muchos casos los residuos eliminados en vertedero se encuentran contaminados por otros residuos para los que ya existen canales de recogida selectiva (envases, vidrio, papel y cartón, etc.), lo que reduce la generación de biogás al disminuir la proporción de materia orgánica presente en dichos residuos.
6. Por último, es necesario hacer una importante labor de información y asesoramiento a los municipios sobre qué técnica de valorización energética es más viable para su vertedero. Obviamente, esto debe realizarse caso por caso, ya que, como se ha comentado anteriormente, la valorización energética del biogás depende de las características de cada vertedero, su ubicación geográfica y muchos otros factores.

5. Análisis DAFO.

Mejores alternativas de aprovechamiento del biogás



5.
Análisis DAFO.
Mejores alternativas
de aprovechamiento
del biogás

A continuación se van a analizar los distintos sistemas de reducción de emisiones de GEI en vertederos mediante un análisis DAFO, en el que se van a evaluar las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades. Con este análisis será posible evaluar estos sistemas tanto a nivel de funcionamiento interno como frente a condicionantes externos.

La situación interna se compone de dos factores controlables, fortalezas y debilidades, mientras que la situación externa se compone de dos factores no controlables, oportunidades y amenazas.

Análisis interno

Los elementos a analizar se corresponden con las fortalezas y debilidades del sistema analizado, es decir, por un lado, todos los aspectos positivos y elementos diferenciadores que le hacen ser atractivo para su implantación como sistema de reducción de GEI en vertederos, y por otro, los elementos negativos o barreras que le hace ser de difícil aplicación o aceptación o no ser competitivo desde el punto de vista económico y/o ambiental.

Análisis externo

Mediante el análisis externo se pondrán de manifiesto las oportunidades y amenazas que existen para cada sistema de reducción de emisiones de GEI en vertederos analizado. Por oportunidades se entienden todos los elementos positivos que se generan en el entorno y que pueden ser aprovechados. Por su parte, las amenazas son barreras o impedimentos que afectan de forma negativa a la implantación del sistema en cuestión, por lo que, en caso necesario, puede ser preciso diseñar una estrategia para minimizar o eliminar estas amenazas o sortear las barreras que impidan la implantación de esta alternativa.

En la Figura 42 se refleja gráficamente la filosofía de esta técnica de trabajo.



Figura42. Esquema del proceso DAFO

Una vez identificadas las oportunidades, amenazas, fortalezas y debilidades, se realizará un análisis conjunto que pondrá de manifiesto:

- Potencialidades: como combinación de fortalezas y oportunidades, señalarán las líneas de acción prioritarias que se pueden desarrollar para mejorar el sistema.
- Limitaciones: como combinación de debilidades y amenazas, deberán estudiarse y evitarse o minimizarse mediante actuaciones adecuadas.
- Riesgos: como combinación de fortalezas y amenazas.
- Desafíos: como combinación de debilidades y oportunidades.

Como resultado del análisis DAFO, se expondrán las conclusiones obtenidas del análisis de diferentes sistemas de reducción de emisiones de GEI en vertederos y sus posibilidades de implantación en los municipios españoles.

Los sistemas actuales de gestión de biogás que se analizan son los siguientes:

- Ningún sistema de recogida de biogás.
- Recogida y combustión (quemado en antorcha).
- Recogida y generación de energía térmica.
- Recogida y generación de energía eléctrica.
- Recogida y cogeneración (energía térmica y energía eléctrica).
- Recogida e integración en la red de gas natural.
- Recogida y utilización como combustible de vehículos.
- Recogida y utilización como combustible para pilas de combustible.

5.
Análisis DAFO.
Mejores alternativas
de aprovechamiento
del biogás

5.1. Resultados del análisis DAFO

A continuación se muestra una tabla resumen para cada sistema de reducción de emisiones de GEI en vertederos que incluye su descripción y sus características más relevantes, así como el correspondiente análisis DAFO.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	SIN RECOGIDA DE BIOGÁS
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Sin aprovechamiento de un recurso energético	Emisión de GEI a la atmósfera
Mayores impactos ambientales	Alto riesgo de incendio y explosión
Malos olores	Incumplimiento de la legislación en materia de control de gases en vertederos
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Sin coste económico al no requerir instalación	
CONCLUSIONES	
Referentes a los siguientes aspectos: Potencialidades: sin coste económico al no requerir una infraestructura de aprovechamiento. Limitaciones: inutilización de una fuente de energía. Riesgos: emisión de gases de efecto invernadero, riesgos ambientales e incumplimiento de la legislación. Desafíos: conseguir reducir las emisiones de GEI en el vertedero sin necesidad de una instalación.	

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	CAPTACIÓN DE BIOGÁS Y COMBUSTIÓN
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Sin aprovechamiento de un recurso energético	Costes por el mantenimiento de la instalación sin obtención de beneficios económicos
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Reducción de las emisiones de GEI, riesgos ambientales y malos olores	Reducción adicional de la emisión de gases de efecto invernadero
Bajo coste de instalación	Aprovechamiento del calor generado en la antorcha
Apropiado para vertederos pequeños con poca generación de biogás	
CONCLUSIONES	
Referentes a los siguientes aspectos: Potencialidades: posibilidad de aprovechamiento energético de la llama, contribuyendo a la reducción de las emisiones de GEI. Limitaciones: rendimiento económico negativo del vertedero por la inutilización del recurso y por el coste del sistema de degasificación y la antorcha. Riesgos: posible necesidad de financiación externa permanente del vertedero al no existir beneficios económicos. Desafíos: desarrollo de un proceso mediante el que se aproveche el calor generado en la antorcha.	

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	CAPTACIÓN DE BIOGÁS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Elevado coste económico de los equipos	Baja rentabilidad económica de la instalación
Menos eficiente que otros sistemas de aprovechamiento	
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Fuente de energía renovable	Suministro de energía a otras instalaciones industriales o zonas residenciales cercanas
Procesos de purificación de biogás poco exigentes (en general)	
Reducción de las emisiones de GEI, riesgos ambientales y malos olores	
Utilización del recurso en la propia planta para otros procesos o para calefacción y agua caliente sanitaria	
CONCLUSIONES	
<p>Referentes a los siguientes aspectos:</p> <p>Potencialidades: fuente de energía renovable apta para el autoabastecimiento de la propia planta o para industrias cercanas.</p> <p>Limitaciones: pérdida energética con la distancia y posible necesidad de financiación externa (al menos parcialmente).</p> <p>Riesgos: baja rentabilidad económica de la planta.</p> <p>Desafíos: conseguir el abastecimiento energético de la planta de tratamiento y de industrias y poblaciones cercanas.</p>	

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	CAPTACIÓN DE BIOGÁS Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Necesidad de un mínimo de caudal de biogás con una determinada composición	Ausencia de regulación a largo plazo de las tarifas aplicadas a las energías renovables
Limitado rendimiento de los equipos	Posible necesidad de financiación externa
Coste elevado de los equipos y de su mantenimiento	
Necesidad de conexión a la red eléctrica próxima al punto de generación	
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Fuente de energía renovable	Mejorar la viabilidad del proyecto por la venta de la electricidad
Reducción de las emisiones de GEI, riesgos ambientales y malos olores	
CONCLUSIONES	
<p>Referentes a los siguientes aspectos:</p> <p>Potencialidades: viabilidad económica del proyecto debida a la posibilidad de venta de la electricidad generada.</p> <p>Limitaciones: necesidad de una composición determinada de biogás para la utilización de equipos, que a su vez, poseen un coste elevado en comparación con el rendimiento ofrecido.</p> <p>Riesgos: cambios de la tarifa eléctrica en el futuro.</p> <p>Desafíos: mejorar los equipos para utilizarlos con una composición de biogás menos exigente.</p>	

5.
Análisis DAFO.
Mejores alternativas
de aprovechamiento
del biogás

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	CAPTACIÓN DE BIOGÁS Y COGENERACIÓN
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Sólo adecuado para vertederos con elevados caudales de biogás y alta concentración de metano	Ausencia de regulación a largo plazo de las tarifas aplicadas a las energías renovables
Se precisa una purificación exhaustiva del biogás	Necesidad de conexión a la red eléctrica próxima al punto de generación
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Fuente de energía renovable	Mejorar la viabilidad del proyecto por la venta de la electricidad
Implantación sencilla del sistema de aprovechamiento y posibilidad de utilizar gran variedad de equipos	Capacidad de suministro de energía térmica para otros procesos desarrollados en la propia planta o en industrias o zonas residenciales cercanas
Mayor eficiencia energética global que otros sistemas	
Reducción de las emisiones de GEI, riesgos ambientales y malos olores	
CONCLUSIONES	
<p>Referentes a los siguientes aspectos: Potencialidades: mayor versatilidad del sistema debido a la gran variedad de equipos utilizados, que se ajustan a las diferentes características del biogás producido y a la eficiencia de los mismos. Limitaciones: necesidad de un caudal mínimo de biogás con una cierta composición elevada en metano. Riesgos: cambios de la tarifa eléctrica en el futuro. Desafíos: búsqueda de alternativas tecnológicas que hagan viable este sistema de aprovechamiento en todos los vertederos.</p>	

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	CAPTACIÓN DE BIOGÁS E INTEGRACIÓN EN LA RED DE GAS NATURAL
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Necesidad de una elevada depuración y compresión del biogás hasta la presión de la red de distribución	Ausencia de estándares de regulación para la inyección en red
Costes de inversión y explotación muy elevados	
Alto coste de depuración del biogás	
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Comportamiento similar al gas natural y las instalaciones de gas natural son válidas para biogás	Demanda de gas en constante aumento
Fuente de gas inagotable	Independencia frente a los combustibles fósiles
Reducción de las emisiones de GEI, riesgos ambientales y malos olores	
CONCLUSIONES	
<p>Referentes a los siguientes aspectos: Potencialidades: posibilidad de lograr cierta independencia de los combustibles fósiles debido a que el biogás se puede utilizar para los mismos usos que el gas natural. Limitaciones: necesidad de biogás con unas características determinadas, sin estándares en España. Riesgos: altos costes de purificación del biogás que pueden no hacer rentable la sustitución del gas natural. Desafíos: conseguir la sustitución total del gas natural en ciertas aplicaciones, como en calefacción, a un coste viable.</p>	

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	CAPTACIÓN DE BIOGÁS Y UTILIZACIÓN COMO COMBUSTIBLE DE VEHÍCULOS
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Necesidad de purificar el biogás para hacerlo apto como combustible	Escasa divulgación de su potencial y uso
Autonomía del vehículo más baja debida al menor poder calorífico del biogás	Inexistencia de una red de estaciones de servicio apropiada
Alto coste de depuración del biogás	
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Reducción del uso de combustibles fósiles	Precio del combustible más barato, debido a que no está sujeto a variaciones
Recurso inagotable y reducción de emisiones de GEI	Amplia gama comercial de vehículos
Posibilidad de uso en todo tipo de motores	
Motores más silenciosos y con menor consumo	
CONCLUSIONES	
<p>Referentes a los siguientes aspectos: Potencialidades: posibilidad de disponer de un combustible barato y sin fluctuaciones en el precio. Limitaciones: diversos aspectos técnicos (purificación del biogás, necesidad de estaciones de servicio específicas, etc.) limitan su expansión. Riesgos: elevada inversión en la adaptación del biogás sin obtener grandes beneficios en su aplicación. Desafíos: necesidad de concienciar a la industria del automóvil para que promocioe el uso de este combustible.</p>	

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DEL SISTEMA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI EN VERTEDEROS	
SISTEMA	CAPTACIÓN DE BIOGÁS Y UTILIZACIÓN COMO COMBUSTIBLE PARA PILAS DE COMBUSTIBLE
ANÁLISIS DAFO	
DEBILIDADES	AMENAZAS
Necesidad de biogás con un elevado grado de pureza	No son sistemas económicamente competitivos
Gran tamaño de las pilas de combustible	
Tecnología poco desarrollada a nivel comercial	
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Rendimiento elevado y poco consumo	Reducción del uso de pilas convencionales
Las pilas no se agotan y no necesitan ser recargadas	Posibilidad de utilización en gran variedad de aplicaciones
Bajo impacto ambiental y sin generación de residuos peligrosos	
Aptas para producción de energía eléctrica y cogeneración	
CONCLUSIONES	
<p>Referentes a los siguientes aspectos: Potencialidades: fuente inagotable y de bajo impacto ambiental, con gran diversidad de usos. Limitaciones: su elevado coste y su grado de desarrollo hace que en la actualidad no sean sistemas económicamente competitivos. Riesgos: no desarrollar la tecnología debido a la existencia de otros sistemas, que son más viables económicamente produciendo energía eléctrica y cogeneración. Desafíos: promover el desarrollo de esta tecnología y conseguir sistemas de mayor eficiencia y rentabilidad.</p>	

5.
Análisis DAFO.
Mejores alternativas
de aprovechamiento
del biogás

Teniendo en cuenta lo indicado en la Directiva 1999/31/CE y en el Anexo I del Real Decreto 1481/2001, en relación con el control de gases, donde se establece que *“En todos los vertederos que reciban residuos biodegradables se recogerán los gases de vertedero, se tratarán y se aprovecharán. Si el gas recogido no puede aprovecharse para producir energía, se deberá quemar.”*, se puede concluir que el único sistema que no se ajusta a esta normativa es el que no dispone de un sistema de recogida de gases.

A continuación se muestra una tabla–resumen con las principales características de cada uno de los sistemas descritos.

SISTEMAS	CONDICIONES NECESARIAS DEL BIOGÁS	VALORIZACIÓN DEL RECURSO
SIN RECOGIDA DE BIOGÁS	Sin condiciones	Sin valorización
COMBUSTIÓN	Sin condiciones	Sin valorización, se quema el biogás en una antorcha
GENERACIÓN ENERGÍA TÉRMICA	Apto para volúmenes bajos de biogás. Es necesaria la eliminación del agua y la reducción del H ₂ S por debajo de 1.000 ppm	Generación de calor para aprovechamiento en la propia planta o en industrias/poblaciones cercanas
GENERACIÓN ENERGÍA ELÉCTRICA	Es necesario purificar el biogás, separando los condensados y eliminando el H ₂ S, siloxanos y otras impurezas. Para la utilización de motores, el biogás debe poseer un mínimo en CH ₄ del 40%. Por el contrario, si se utilizan microturbinas, el porcentaje es del 35% de CH ₄	Generación de energía eléctrica para inyección en red eléctrica
COGENERACIÓN	El biogás debe tener un contenido mínimo en CH ₄ del 40% y se recomienda un caudal mínimo de 300 Nm ³ /h. También se deben eliminar las impurezas presentes en el gas	Generación de energía eléctrica y energía térmica
INTEGRACIÓN EN RED DE GAS NATURAL	El biogás debe desulfurarse y purificarse y alcanzar un porcentaje en CH ₄ del 97%	Inyección del biogás a la red de gas natural. Se utiliza en las mismas aplicaciones que el gas natural
COMBUSTIBLE PARA VEHÍCULOS	Es necesaria la eliminación de los compuestos diferentes al metano. Se debe conseguir un mínimo de CH ₄ del 96%	Utilización del biogás en motores de vehículos
PILAS DE COMBUSTIBLE	Necesidad de tratamiento del biogás para obtener un gas rico en H ₂ , CO ₂ e impurezas	Generación de energía eléctrica y cogeneración

	EFICIENCIA	COSTE INSTALACIÓN	VIABILIDAD / RENTABILIDAD DEL PROYECTO
	Ineficiente	Sin coste	No es viable, ya que no cumple la legislación en materia de control de gases de vertedero
	Proceso ineficiente, no se realiza el aprovechamiento energético del biogás	El coste de los equipos de combustión es inferior al de los otros sistemas de aprovechamiento	Proyecto no rentable, aunque se realiza una inversión en la instalación, no se obtienen beneficios debido a la inutilización del recurso
	Proceso menos eficiente que otros sistemas de aprovechamiento	El coste de la instalación no es elevado en comparación con otros sistemas	Baja rentabilidad económica de la planta
	Rendimiento energético de los motores: 33 - 37%. Rendimiento energético de las microturbinas: máximo 35%.	Coste elevado de los equipos y de su mantenimiento	Proyecto rentable debido a la venta de la energía eléctrica. Se recomienda una financiación externa debido al elevado coste de los equipos
	Mayor eficiencia energética global del proceso frente a los sistemas que únicamente generan electricidad	Coste muy elevado de los equipos en comparación con los demás sistemas de aprovechamiento	Mayor rentabilidad del sistema debido a la gran variedad de equipos y a la eficiencia de los mismos. Se generan recursos económicos por la venta de energía que ayudan a sufragar los importantes costes de la instalación. Aún así, existe la posibilidad de necesitar financiación externa
	Proyecto eficiente debido a la ausencia de equipos de transformación. Simplemente se purifica y comprime el gas para inyectarlo a la red	Alto coste del sistema de depuración del biogás	Económicamente no es rentable, debido al alto coste del sistema de depuración. Sin embargo, se adquiere cierta independencia energética.
	Proyecto eficiente debido a la ausencia de equipos de transformación.	Alto coste del sistema de depuración del biogás	Económicamente no es rentable, por el alto coste de depuración del gas. Si el sector del automóvil promoviera y financiara el uso de este combustible, la rentabilidad aumentaría.
	Elevada eficiencia energética.	Alto coste de la implantación de los equipos	Su elevado coste y su grado de desarrollo hacen que, por el momento, todavía no sean sistemas económicamente competitivos respecto a las turbinas de gas o a los motores de combustión interna para la generación de electricidad.

5. Análisis DAFO. Mejores alternativas de aprovechamiento del biogás

Conclusión

En base al análisis DAFO realizado para cada uno de los sistemas, y con las conclusiones mostradas en la tabla-resumen, se consideran más óptimos los siguientes sistemas de aprovechamiento del biogás:

- Generación de energía eléctrica.
- Cogeneración. Generación de energía eléctrica y energía térmica.
- Integración en la red de gas natural.
- Pilas de combustible.

5.2. Valoración de alternativas planteadas.

En este apartado se desarrollan con más detalle las alternativas más óptimas de valorización energética del biogás.

5.2.1. Generación de energía eléctrica

5.2.1.1. Aspectos técnicos

Como se ha indicado en apartados anteriores, el proceso al que debe someterse el biogás para producir energía eléctrica es el siguiente:



Figura 43. Esquema del proceso de generación de energía eléctrica

El biogás debe someterse a procesos de depuración para poder introducirlo en motores o microturbinas y generar electricidad. Los sistemas de depuración utilizados van a depender de las características del biogás exigidas por los fabricantes de los equipos. Dependiendo de la elección de un equipo u otro, el biogás necesitará ser sometido a diferentes tratamientos.

A continuación se realiza una descripción de las diferentes etapas del proceso general al que debe someterse el biogás para producir energía eléctrica.

Separación de condensados

El biogás producido se enfría durante su transporte hasta la planta de generación por lo que se debe eliminar el agua condensante contenida en el flujo de gas. Para ello, se utiliza un colector de condensados de gas. Una vez eliminado este agua, se realiza la depuración del biogás.

Depuración de biogás

La viabilidad de una instalación de valorización energética de biogás puede verse comprometida a causa de la presencia en el flujo de gas de determinados elementos como el ácido sulfhídrico y los

siloxanos, los cuales ocasionan graves daños a los equipos de aprovechamiento, aumentando los costes de mantenimiento y disminuyendo la eficiencia del sistema hasta el punto de poder hacer inviable la operación.

Existen diversas tecnologías de depuración de biogás, siendo el carbón activo la más utilizada por su sencillez y eficiencia, a pesar de su elevado coste. En los últimos años, los métodos de depuración biológica han conseguido importantes avances y actualmente llegan a alcanzar rendimientos similares a los de los métodos físico-químicos. Así, la utilización de filtros biológicos para la limpieza del biogás permite reducir este coste de operación, ya sea por sustitución integral del filtro de carbón activo o bien como pretratamiento a dicho filtro, con el consiguiente aumento de los periodos de recambio del carbón activo.

Debido a esta problemática, surge en 2005 el proyecto MICROPHILOX, financiado por el programa LIFE de la Unión Europea, el cual aporta importantes innovaciones tecnológicas como son el uso de microturbinas para la valorización energética de biogás, un novedoso sistema de depuración biológica y el desarrollo de un sistema de análisis de siloxanos de probada repetibilidad. En la siguiente figura se muestra un esquema de este proceso.

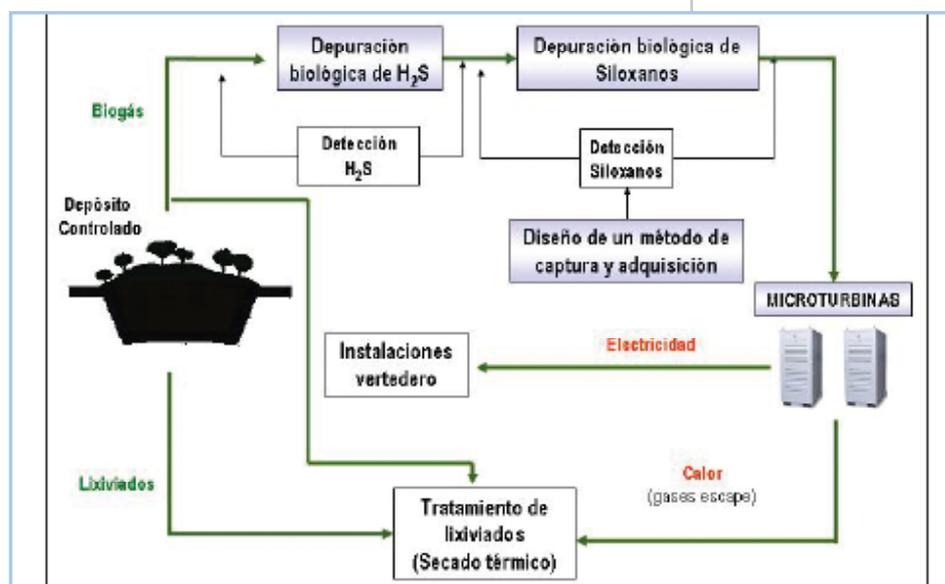


Figura44. Esquema del proceso MICROPHILOX

En el marco del proyecto MICROPHILOX se ha diseñado y fabricado un prototipo de depuración biológica de biogás (BBCS en sus siglas en inglés) para la eliminación del ácido sulfhídrico y los siloxanos, y para el cual se han establecido los siguientes objetivos de eficiencia:

- Concentración de H₂S a la salida del sistema < 10 ppmv.
- Reducción del 50% de los siloxanos, independientemente de la concentración inicial en el biogás.

El sistema diseñado consiste en dos biofiltros percoladores conectados en serie. En la primera columna se produce la desulfuración, mientras que en la segunda se lleva a cabo la eliminación de los siloxanos del biogás. Las bacterias encargadas de la degradación de los contaminantes son alimentadas con oxígeno y con una solución acuosa de NPK que aporta los nutrientes necesarios para su reacción metabólica. En el caso del biofiltro de H₂S, el oxígeno es aportado a la solución de nutriente a través de una columna de burbujeo, siendo ésta la principal novedad tecnológica del sistema. Para las bacterias del filtro de siloxanos, el oxígeno es directamente inyectado en la corriente de gas. El pH de trabajo se fija entre 6 y 7, y es regulado mediante la adición de una disolución de NaOH almacenada en un depósito anexo.

Todo el sistema ha sido diseñado para funcionar de manera autónoma gracias a la conexión de los equipos a un PLC (controlador lógico programable) y al *software* de control desarrollado que permite la operación remota del sistema.

Captación y análisis de siloxanos en biogás

La presencia en el biogás de cantidades traza de siloxanos supone un serio problema para su aprovechamiento energético, ya que la combustión de estas sustancias produce un residuo con unas características físicas y químicas similares a las del vidrio, ocasionando daños severos en los equipos. Por este motivo, los fabricantes especifican los valores máximos de siloxanos que admiten en el gas, razón por la cual es importante conocer su cantidad exacta.

Para ello, se ha desarrollado una metodología de captura y análisis de siloxanos contenidos en el biogás, la cual ha permitido solventar los actuales problemas causados por la variabilidad de los resultados analíticos detectada al aplicar diferentes sistemas de análisis.

Se han estudiado diferentes métodos de toma de muestras de biogás o de captura de siloxanos: en bolsas Tedlar, en disolventes líquidos (hexano y acetona) o en adsorbentes sólidos tipo carbón activado, grafito, polímeros de di-vinil-benceno-estireno y de tenax. Los resultados obtenidos permiten concluir que la utilización de adsorbentes sólidos es el método más efectivo, a la vez que también el más sencillo. En este método se retienen los siloxanos usando tubos de carbón activado. Una vez retenidos los siloxanos, se realiza una desorción con hexano y se analiza el extracto mediante técnicas cromatográficas.

Equipos - Microturbinas

En el proyecto MICROPHILOX se aportan otras innovaciones, como el uso de microturbinas. Las microturbinas se plantean como una atractiva alternativa tecnológica a los motores de cogeneración, los cuales son válidos para caudales elevados de biogás y alta concentración de metano, lo que excluye a pequeños vertederos y aquéllos que se encuentran en su fase inicial o final de explotación. Las microturbinas son una buena alternativa gracias a dos de sus principales características:

- Se trata de elementos modulares con capacidades unitarias entre 30 y 200 kW que pueden agruparse en serie y, por lo tanto, son aptas para cualquier tipo de instalación.
- Permiten el funcionamiento con gases de bajo poder calorífico, lo que en el caso del biogás se traduce en un contenido en metano mínimo de un 30-35%, inferior al 40% requerido por un motor de cogeneración.
- Se trata de elementos compactos y con pocas partes móviles, por lo que presentan menor coste de mantenimiento.
- Presentan menores emisiones atmosféricas y sonoras en relación con los motores térmicos.

En el año 2005, momento en que se plantea el proyecto MICROPHILOX, sólo existían en España experiencias de funcionamiento de microturbinas con gas natural. Dadas las ventajas que presentaban estos equipos, se decidió probar esta tecnología con biogás de vertedero, instalando en 2006 en el depósito controlado de Orís, propiedad del Consell Comarcal d'Osona, la primera microturbina funcionando con biogás de España.

Equipos – Motores de combustión interna

Los motores empleados para generar electricidad son de ciclo Otto y están especialmente diseñados para biogás (por su bajo poder calorífico). Los gases son emitidos a unos 400° C a través de la chimenea. Es posible recuperar calor de ellos para calefacción u otros usos. Los motores requieren de un sistema de refrigeración que puede ser por aire o mediante torres húmedas.

La combustión del biogás se realiza en los motores de gas. Los motores hacen girar un alternador síncrono que genera energía eléctrica con un rendimiento global de un 35% aproximadamente. El 65% de energía restante es emitida a la atmósfera a través de los gases de escape, que pueden tener una temperatura superior a 400° C, y del sistema de refrigeración de los motores. Si se aprovecha el calor residual de los motores (en calentamiento de invernaderos u otras aplicaciones) se puede alcanzar un rendimiento global superior al 90%.

5.2.1.2. Aspectos económicos

El estudio de viabilidad económica de un proyecto de desgasificación de un vertedero con generación de energía eléctrica debe hacerse caso a caso, sin que sea posible indicar un orden de magnitud aproximado. El gran número de variables que intervienen en el diseño del modelo económico no permite generalizar, por las siguientes razones:

- Numerosos vertederos controlados se han construido sobre vertederos incontrolados en los que no se conoce la tipología ni la cantidad de residuos depositados.
- Cuando no se plantea desgasificar un vertedero desde el principio, se actúa sobre vertederos con varios años de existencia, en donde ya se ha generado una cantidad importante de biogás que no ha sido aprovechado y que se ha emitido a la atmósfera.
- El presupuesto para las estructuras de desgasificación es muy variable en función de la tipología de residuos depositados, la profundidad y extensión del vertedero, el volumen de biogás que se prevé generar, la climatología y otras variables.
- La potencia eléctrica, tensión y distancia al punto de enganche con la red eléctrica son también variables que influyen en la economía del proyecto.
- Es preciso disponer de una cantidad y calidad del biogás mínima para que sea factible instalar, por lo menos, un motor pequeño o una microturbina de generación de energía eléctrica.

Dentro de la imposibilidad de ofrecer un orden de magnitud para el cálculo económico de proyectos, se ofrecen algunas cifras del coste aproximado de los elementos principales que pueden servir de orientación para la estimación del montante del proyecto:

- El precio de una microturbina de 30 kW es de unos 93.500 €, en los que se incluye la unidad de tratamiento de biogás de 42 m³/h, el transporte y la puesta en marcha.
- Los precios de los motores oscilan entre los 100.000 €, para un motor de 143 kW eléctricos con un consumo de gas de unos 419 kW, y los 350.000 €, para un motor de 1.204 kW eléctricos con un consumo de gas de 2.922 kW. Estos precios incluyen el grupo motor alternador, los cuadros y accesorios.

No se encuentran incluidos dentro de estos costes la obra civil, el montaje, las tuberías de captación de biogás y las estaciones de regulación, entre otros componentes del sistema de desgasificación del vertedero. El precio varía en función de la tipología del vertedero. Los precios de algunos de estos componentes son los siguientes:

- Tubería perforada de PEAD, D160, para captación de biogás en pozos. Coste aproximado 18 €/ml.
- Campana de captación, en PEAD, de 200 mm de diámetro y 2,5 m de longitud. Dotada de tapa practicable con tornillos, salida lateral con brida DN80. Coste aproximado 450 €/ud.
- Estación de regulación y medida de tipo manual, formada por colector en PEAD con 7 entradas y 1 salida. Coste aproximado 3.750 €/ud.

5.2.1.3. Aspectos ambientales

Toda captación de biogás realizada en un vertedero reduce las emisiones de GEI, independientemente de la tecnología utilizada, aunque ésta determina el grado de reducción de emisiones.

Existe una metodología, elaborada por la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC en sus siglas en inglés) para mecanismos de desarrollo limpio ACM0001 (Versión 11), que permite calcular el potencial unitario de reducción de GEI en vertederos que realizan captación de biogás.

5.
Análisis DAFO.
Mejores alternativas
de aprovechamiento
del biogás

En este método se distinguen dos escenarios: el escenario base en el que se libera el CH₄ a la atmósfera y el escenario con proyecto en el que el biogás es capturado y quemado, utilizado para producir energía (eléctrica o térmica) o introducido en la red de gas natural.

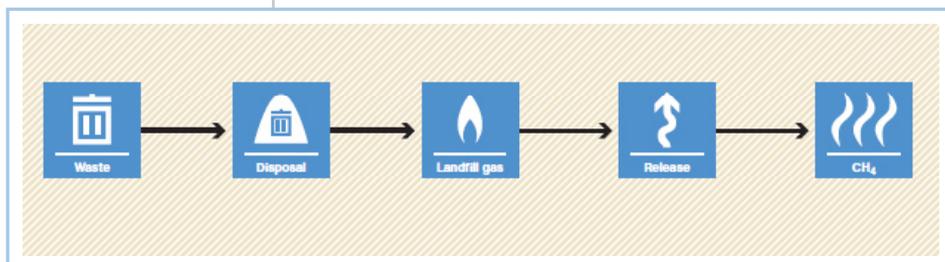


Figura45. Escenario base

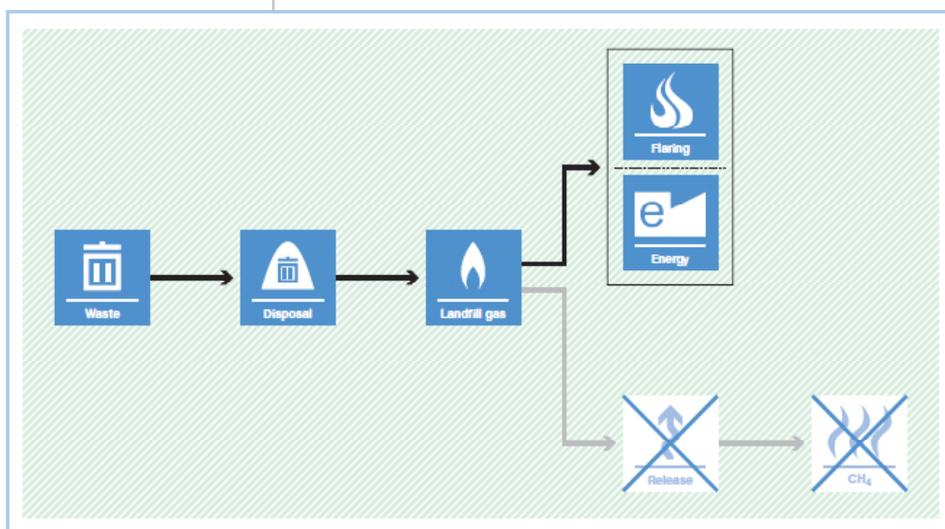


Figura46. Escenario del proyecto

Esta metodología dispone de una herramienta para determinar las emisiones de metano asociadas a la eliminación de los residuos en vertederos. En ella se calculan las emisiones liberadas a la atmósfera en toneladas equivalentes de CO₂ en ausencia de un proyecto de captación de biogás (escenario base).

La fórmula para calcular las emisiones de metano evitadas es la siguiente:

$$BE_{CH_4,SWDS,y} = \varphi \cdot (1-f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1-OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} \cdot DOC_j \cdot e^{-k_j(y-x)} \cdot (1-e^{-k_j})$$

Para realizar el cálculo de las emisiones se deben conocer los siguientes parámetros:

- Φ : Factor de corrección del modelo para explicar las incertidumbres (0,9).
- f: Fracción de metano capturado en el vertedero y quemado o utilizado.
- GWP_{CH_4} : Potencial global de calentamiento del metano.
- OX: Factor de oxidación del metano.
- F: Fracción de metano en el gas.
- DOC_f : Fracción de carbono orgánico degradable que se descompone.
- MCF: Factor de corrección del metano.

- $W_{j,x}$: Cantidad de residuo orgánico del tipo j que se elimina en el vertedero en el año x .
- DOC_j : Fracción de carbono orgánico degradable presente en cada tipo de residuo.
- k_j : Tasa de decaimiento para cada tipo de residuo j .
- j : Categorías de los tipos de residuos.
- x : Primer año en el que se depositan los residuos en el vertedero ($x=1$).
- y : Año para el cual se calculan las emisiones de metano.

Existen unos valores de referencia para algunos parámetros como OX , F , DOC_f , etc. que se pueden obtener de los datos indicados en el "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories" (capítulo 3).

Teniendo en cuenta esta metodología, no se puede realizar una estimación general de las emisiones de GEI evitadas a la atmósfera en el caso de la generación de energía eléctrica, ya que es necesario conocer, además de los valores de referencia, datos específicos de producción y composición del biogás en el vertedero en cuestión.

Lo que sí se puede afirmar es que al generar energía eléctrica a partir de biogás, además de reducir las emisiones de GEI, se contribuye de manera importante a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles.

5.2.2. Cogeneración. Generación de energía eléctrica y energía térmica

5.2.2.1. Aspectos técnicos

El aprovechamiento energético de biogás que se realiza a través de motores de cogeneración (que producen calor y electricidad) sólo es técnica y económicamente viable a partir de generaciones superiores a 600 kWe, por lo que sólo se aplica en explotaciones en las que se generan caudales de biogás elevados con alta concentración de metano, quedando excluidos los pequeños vertederos y aquéllos que se encuentran en su fase inicial o final de explotación. Sin embargo, la cogeneración posee una mayor eficiencia energética global del proceso con respecto a los sistemas que únicamente generan electricidad.

Para aplicar este tipo de valorización es necesario realizar un análisis de composición del biogás. Estos análisis tienen por objetivo seleccionar correctamente el tipo de motor a utilizar y verificar el cumplimiento de las especificaciones del mismo. Además, deberán realizarse análisis del gas siempre que existan dudas sobre la aparición de componentes dañinos para el motor. Una vez determinada la composición y la presencia de elementos dañinos para los motores se elegirá el motor más adecuado y los sistemas de purificación de biogás necesarios.

Como se ha señalado anteriormente, el proceso al que se debe someter el biogás, para generar energía eléctrica y energía térmica, es el siguiente.

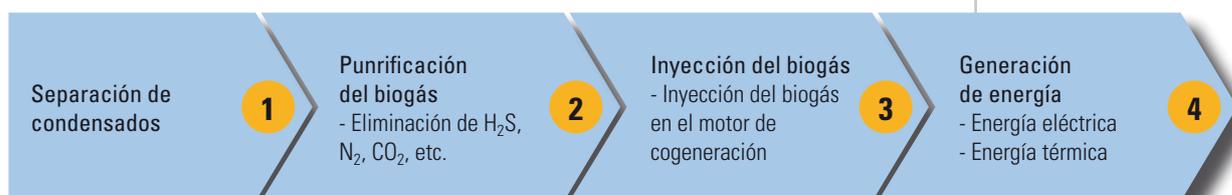


Figura 47. Esquema del proceso de cogeneración

A continuación se describe de manera más detallada el proceso de cogeneración y se indican diferentes métodos mediante los cuales se puede realizar la separación de condensados y la purificación del biogás. En función de la composición y características del biogás y de los motores seleccionados, se deberá elegir el método más óptimo.

Separación de condensados

Como ocurre en los sistemas de generación de energía eléctrica, se debe eliminar el agua condensante contenida en el flujo de gas. Para ello, existen diferentes métodos:

- Absorción en silica gel o Al_2O_3 : eliminación del agua cuando se requieren bajos puntos de rocío.
- Absorción en glicol o sales higroscópicas: las sales pueden ser recuperadas a elevadas temperaturas.
- Refrigeración: método utilizado comúnmente para condensar el agua. Para alcanzar elevados puntos de rocío, el gas puede ser comprimido antes del enfriamiento.

Purificación de biogás

Existen diferentes métodos para la eliminación de las impurezas presentes en el biogás. Se citan algunos de estos métodos en función del tipo de impureza.

1) Eliminación de H_2S . Existen diferentes métodos:

- Torres de desulfuración: reducen la cantidad de H_2S hasta concentraciones admisibles en los motores. La absorción del H_2S se efectúa mediante la recirculación de NaClO al 15% en medio alcalino (añadiendo NaOH): $4 \text{NaClO} + \text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons 4 \text{NaCl} + \text{H}_2\text{SO}_4$
- Estas torres o *scrubbers* se encuentran totalmente cerradas, de manera que no existen ni derrames ni escapes. La disolución es recirculada continuamente dentro la torre, controlándose únicamente el pH.
- Adsorción con carbón activo: el carbón activo actúa como catalizador para convertir el H_2S en azufre elemental. Es necesaria la impregnación con KI.
- Adición de sales férricas: es una operación sencilla, aunque el exceso de Fe^{+3} puede inhibir la formación de biogás. Es eficaz para la reducción de niveles muy elevados, hasta < 150 ppm.
- *Scrubber* (lavado) con soluciones alcalinas. Se absorbe el H_2S y se eliminan los problemas de formación de espumas y corrosión.
- *Scrubber* (lavado) con soluciones aminas. Este método tiene elevados costes de operación.

2) Eliminación de CO_2 . Se puede realizar siguiendo diferentes métodos:

- Separación criogénica: el CO_2 puede ser eliminado como líquido enfriando la mezcla del biogás a elevada presión.
- *Scrubber* (lavado) con agua: la solubilidad del CO_2 en agua depende de la temperatura y el pH.
- *Scrubber* (lavado) con disolventes orgánicos: se consiguen reducciones hasta niveles de 0,5 – 1%.
- Adsorción con carbón activo: se consigue una disminución del CO_2 a valores entre el 1 y el 3%.
- Separación por membranas.

3) Eliminación de siloxanos mediante los siguientes métodos:

- Adsorción con carbón activo: se procede a la eliminación de siloxanos con eficiencias del 95%.
- Adsorción con sílica gel: se realiza una depuración de siloxanos con eficiencias del 98%.
- Adsorción con grafito: método con elevada eficiencia en la depuración de determinados siloxanos. Elimina además otros componentes del biogás.

Inyección del biogás

La captación y calidad del biogás depende de distintos factores ajenos a la planta, como la climatología, la formación de bolsas en el vertedero etc. Con objeto de amortiguar las variaciones de producción y calidad del mismo se utilizan gasómetros cuya función principal es la homogeneización del biogás, necesaria para conseguir que presente unas condiciones uniformes antes de su paso por los motores. De esta manera, los motores se verán afectados en menor medida por las posibles fluctuaciones en el suministro.

La inyección del biogás se realiza mediante soplantes, que impulsan el biogás hasta los motores.

Generación de energía

La cogeneración se puede llevar a cabo con diferentes sistemas, como turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna alternativos, microturbinas, motores Stirling o ciclos Rankine. Según el grado de potencia, son más adecuadas unas tecnologías u otras.

5.2.2.2. Aspectos económicos

Ante la dificultad de ofrecer un orden de magnitud para el cálculo del coste económico de un proyecto concreto, debido a la gran variedad de factores que intervienen en el cálculo, se recogen en la siguiente tabla, a modo de ejemplo, los costes económicos, en términos de inversión y de operación y mantenimiento (O&M), de algunos de los sistemas de cogeneración indicados en el epígrafe anterior:

TECNOLOGÍA	Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA)	Microturbina	Turbina de Gas	Motores Stirling
Tamaño (MW)	0,03 - 6	0,0001 – 0,4	0,5 - 30	0,0250 – 0,055
Inversión (€/MW)	560.000 – 965.000	950.000 – 1.350.000	325.000 – 725.000	900.000 – 1.600.000
O&M (€/MWh)	6,2 - 16	6,4 - 12	3,2 - 8	4 – 6,4

Además, en el cálculo del importe del proyecto, se deberán tener en cuenta los sistemas de purificación del biogás.

5.2.2.3. Aspectos ambientales

Como en el caso de la generación de energía eléctrica, el cálculo del potencial unitario de reducción de GEI se realizaría adoptando la metodología ya descrita. No se puede realizar una estimación de las emisiones de GEI evitadas a la atmósfera, ya que es necesario conocer, además de los valores de referencia, datos específicos de producción y composición del biogás en el vertedero a analizar.

Tabla 17. Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás (IDAE)

5. Análisis DAFO. Mejores alternativas de aprovechamiento del biogás

En todo caso, se puede afirmar que la aplicación de esta tecnología logra una importante reducción de las emisiones de GEI a la atmósfera, además de contribuir a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles.

5.2.3. Integración en la red de gas natural

5.2.3.1. Aspectos técnicos

El proceso de integración del biogás en la red de gas natural requiere únicamente de un exhaustivo sistema de purificación de biogás. Como se ha indicado en apartados anteriores, el biogás necesita tener un porcentaje mínimo de metano de un 97%. El proceso al que se somete el biogás es el siguiente:

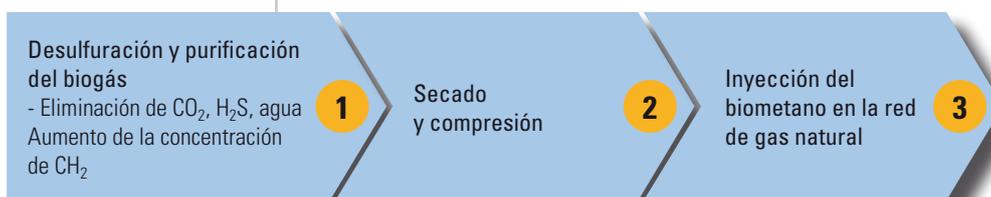


Figura 48. Esquema del proceso de inyección en gasoducto

En primer lugar se realiza la desulfuración con el fin de reducir la presencia de H₂S en el biogás, componente altamente corrosivo que deteriora las tuberías, almacenamientos, etc. Existen varios métodos de desulfuración, siendo los más extendidos el lavado en torres (agua y disoluciones alcalinas) y la adición de cloruro férrico en el digestor, si bien existen otros métodos como adsorción por carbón activo, membranas o incluso procesos biológicos.

Existen varios procesos para la purificación del biogás y la separación de CO₂ con el fin de lograr un incremento del contenido en metano. En función de los condicionantes técnicos y económicos se utiliza un proceso u otro, pero siempre hay que adaptarlos a la composición concreta del biogás, es decir, a las condiciones locales. Entre estos procesos se encuentran:

- **PSA (Pressure Swing Adsorption):** este proceso se basa en el diferente comportamiento del CO₂, CH₄ y el agua frente a los adsorbentes. Se aplican principalmente efectos cinéticos y estéricos, pero también efectos de equilibrio para separar los gases, principalmente CO₂. Como adsorbentes se usan carbones activos, tamices moleculares (zeolitas) y tamices moleculares específicos para hidrocarburos.
- **Lavado con agua a presión (DWW en sus siglas en inglés):** se basa en las diferentes solubilidades del CH₄ y del CO₂. Los compuestos polares, como el CO₂ y H₂S, y los compuestos como el amoníaco se disuelven mejor que los compuestos no polares e hidrófobos como son los hidrocarburos (CH₄).
- **Proceso con Selexol:** similar al proceso DWW. Se basa en las diferentes solubilidades del CH₄ y el CO₂. Se realiza mediante un paso de adsorción y uno de regeneración. El selexol presenta una solubilidad más alta para el CO₂ que la que tiene el agua. Este proceso se emplea fundamentalmente en Suiza para la eliminación del CO₂ del biogás.
- **Proceso de separación por membranas:** se puede realizar en seco o húmedo. En el proceso seco, se hace pasar el biogás a través de una membrana selectiva para el CO₂ para la cual se aplica una presión determinada. En el proceso húmedo, el CO₂ se separa por su diferente solubilidad y velocidad de difusión a través de una membrana y se absorbe en soluciones de amina, para el CO₂, o en una lejía de sosa, para el H₂S.
- **Proceso de temperatura baja:** los procesos criogénicos permiten la separación del CO₂ en forma de líquido. No obstante, hay que tener en cuenta el elevado coste de estos procesos.

En la Tabla 18 se presenta una tabla resumen con los diferentes sistemas de purificación/enriquecimiento de biogás:

Procesos	Ventajas	Desventajas	Notas
PSA	Contenido bajo de H ₂ S y H ₂ O en el biogás purificado Bajas necesidades de agua Proceso experimentado	Condiciones de trabajo extremas para las válvulas Pérdidas de metano	Probado en la práctica Exige previamente desulfuración y secado
DWW	No se precisan productos químicos Proceso experimentado Adecuado para plantas depuradoras	Consumo alto de agua Pérdidas de metano Es posible que ocurran obstrucciones/atascos en los materiales de relleno	Probado en la práctica Muchas veces exige adicionalmente una desulfuración y secado
Proceso de Selexol	Se puede combinar la extracción de H ₂ S Si el biogás está seco y sin azufre es energéticamente más barato que DWW	Poco experimentado Precisa calor Precisa productos químicos Pérdidas de metano	Para grandes volúmenes de corrientes de gas Disolvente caro La desulfuración y secado no son imprescindibles pero si recomendables
Proceso de separación de membranas	Montaje muy fácil Alta fiabilidad	Cortos tiempos de vida (aprox. 3 años) Pérdidas de metano Alta consumo de electricidad Poco experimentado	Pocas plantas en marcha El proceso húmedo tiene costos operacionales más bajos que el seco Espesor de membranas: 0,2-10 µm
Proceso de temperatura baja	Alta pureza de CH ₄ > 98% CO ₂ de alta pureza	Altos costes energéticos La composición del gas crudo no debe oscilar < 10 Vol.-% La planta de separación es sensible en cuanto a las impurezas del gas	Sólo a escala piloto Necesaria desulfuración y secado previos Posible utilización/ aprovechamiento del CO ₂

Tras la desulfuración y purificación, el biogás debe ser comprimido y secado hasta la presión necesaria de distribución de la red, lo que implica unos costes de inversión y explotación elevados.

La inyección de biogás en la red de gas natural se puede realizar de dos modos diferentes:

- Se ajusta el poder calorífico del biogás al del gas natural de la red. De este modo el biogás se puede inyectar en la red sin ningún tipo de limitaciones. A este biogás se le llama biogás de intercambio.
- La adición del biogás a la red se realiza en pequeños porcentajes con el fin de que la mezcla no supere los límites establecidos para el poder calorífico del gas natural. A este biogás se le denomina biogás de mezcla o adicional.

Biogás como gas de intercambio

El biogás de intercambio puede diferir del gas natural del suministrador habitual en lo referente a su composición y a su comportamiento en el proceso de combustión. Se hace necesario el ajuste del poder calorífico del biogás al de la red en la cual se va a inyectar, de forma que éste no debería variar más de un 2%.

Tabla 18. Ventajas y desventajas de los sistemas de enriquecimiento de biogás

La inyección de este tipo de biogás no es problemática, pero se requiere adaptar la presión adecuada a la red y se hace preciso medir la cantidad de gas inyectado.

Biogás como gas adicional

Difiere en la composición y poder calorífico del gas natural de la red. Es posible inyectar estos gases restringidamente, entre un 5% y un 25%, para incrementar la cantidad de gas disponible en la red o aprovechar el biogás localmente generado. El requerimiento principal para el uso de este tipo de gas es la igualdad del comportamiento en el proceso de combustión de la mezcla de gas y del gas natural de la red.

5.2.3.2. Aspectos económicos

Ya se ha mencionado que el análisis económico de una solución tecnológica debe hacerse caso a caso. Sin embargo, para que pueda servir de referencia, el coste estimado de depuración del biogás de biometanización a las condiciones del gas natural, concentrado a un 98% de metano y comprimido a 72 bares de presión, es de 2.756.881€ para unos 4.000 Nm³/h de caudal.

5.2.3.3. Aspectos ambientales

Como en el caso anterior, la inyección de biogás en la red de gas natural reduce las emisiones de GEI y permite adquirir cierta independencia de los combustibles fósiles al tener un comportamiento similar al gas natural. El cálculo del potencial unitario de reducción de GEI se realizaría adoptando la metodología descrita en el apartado anterior.

5.2.4. Pilas de Combustible

5.2.4.1. Aspectos técnicos

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos capaces de convertir directamente la energía de la reacción química producida entre un combustible y un oxidante en energía eléctrica (corriente continua), liberando agua y calor. Los aspectos innovadores que las convierten en una tecnología competitiva para la generación de electricidad, son los siguientes:

- **Bajo impacto ambiental:** la emisión de gases contaminantes como CO, CO₂ y NO_x se ve significativamente reducida respecto a otros sistemas, debido a la ausencia de combustión. Tampoco se producen emisiones de SO_x, ya que el sistema exige la depuración previa del combustible para evitar la contaminación de los elementos constituyentes y aumentar la durabilidad.
- **Carácter modular:** las pilas de combustible están disponibles en módulos independientes (monoceldas) que se pueden apilar generando montones de diferentes tamaños y, por lo tanto, de diferentes potencias, en función de las necesidades requeridas en cada caso. Esto permite una producción automatizada, lo que da lugar a una construcción más sencilla, rápida y de menor coste.
- **Flexibilidad de operación:** Esta flexibilidad presenta un carácter dual, en cuanto al rango de aplicación y combustible utilizado. El carácter modular de las pilas de combustible y su posible operación con combustibles distintos al hidrógeno permite obtener una gran variedad de potencias para usos tanto estacionarios (hospitales, plantas industriales, viviendas, etc.), como móviles (sistemas de transporte) y portátiles (teléfonos móviles, ordenadores, pequeños electrodomésticos, etc.).
- **Rendimiento elevado:** las pilas de combustible no están sujetas al ciclo de Carnot, por lo que son más eficientes que cualquier sistema convencional de generación de energía. Sus rendimientos eléctricos son próximos al 50%, pero si se tiene en cuenta la energía térmica que generan (cogeneración), el rendimiento total puede ascender hasta un 80% aproximadamente.

A estos atributos hay que añadir el que se trata de elementos silenciosos, sin partes móviles, con una rápida respuesta a las variaciones de carga y de fácil mantenimiento.

Las pilas de combustible están constituidas básicamente por dos electrodos porosos, ánodo y cátodo, separados por un electrolito denso. El tipo de electrolito utilizado determina la temperatura de operación y, por lo tanto, el rango de aplicación del dispositivo. Atendiendo al tipo de electrolito, las pilas de combustible se pueden clasificar en: pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC), pilas de combustible alcalinas (AFC), pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC), pilas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC) y pilas de combustible de óxido sólido (SOFC). En la Tabla 19 se resumen las principales características de estos sistemas.

Tipo de pila de combustible	Electrolito	Conductor iónico	Temperatura de operación	Combustible	Rendimiento	Rango de potencia	Aplicaciones
PEMFC	Polímero sólido (Nafion®)	H ⁺	60-80 °C	H ₂ puro (tolera CO ₂ , 10 ppm CO)	35-45%	5-250 kW	-Transparente -Portátil -Estacionaria de baja potencia
DMFC	Polímero sólido	H ⁺	60-120 °C	Metanol	30-40%	5 kW	Portátil
AFC	KOH	OH ⁻	50-100 °C	H ₂ puro	40-60%	5-150 kW	Espacio
PAFC	Ácido fosfórico	H ⁺	200-220 °C	H ₂ puro (tolera CO ₂ , 1% CO)	40-45%	50-11 MW	Estacionaria de media potencia
MCFC	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃	CO ₃ ²⁻	600-700 °C	H ₂ , CO, CH ₄ , otros HCs (consume CO ₂ en cátodo)	45-60%	100 kW-2 MW	Estacionaria de alta potencia
SOFC	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃ (YSZ)	O ²⁻	800-1000 °C	H ₂ , CO, CH ₄ , otros HCs (tolera CO ₂)	50-65%	100-250 kW	-Estacionaria de media potencia -Transporte (APU)

Tabla 19. Características de los distintos tipos de pilas de combustible

También es necesario señalar que las pilas de combustible son elementos eficientes en instalaciones de generación distribuida y combinada de calor y electricidad (cogeneración). El sistema completo de generación de energía a partir de la pila de combustible está constituido por un procesador de combustible, la pila de combustible (unidad de potencia) y un inversor/acondicionador de potencia, tal y como se muestra en la Figura 49.

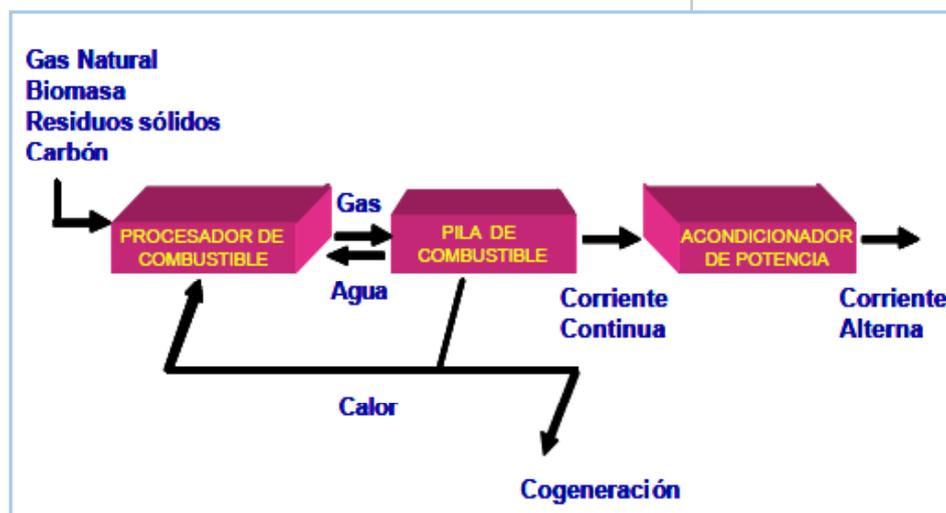


Figura 49. Esquema del sistema de generación de energía basado en pilas de combustible

5. Análisis DAFO. Mejores alternativas de aprovechamiento del biogás

Para producir electricidad mediante la pila de combustible, el biogás debe someterse a un proceso de acondicionamiento como se muestra en la Figura 50:



Figura 50. Esquema del proceso de pilas de combustible

Dependiendo del tipo de pila de combustible a utilizar, se lleva a cabo un tratamiento u otro. Los diferentes tipos de tratamiento a los que debe someterse el biogás se resumen en la Figura 51.

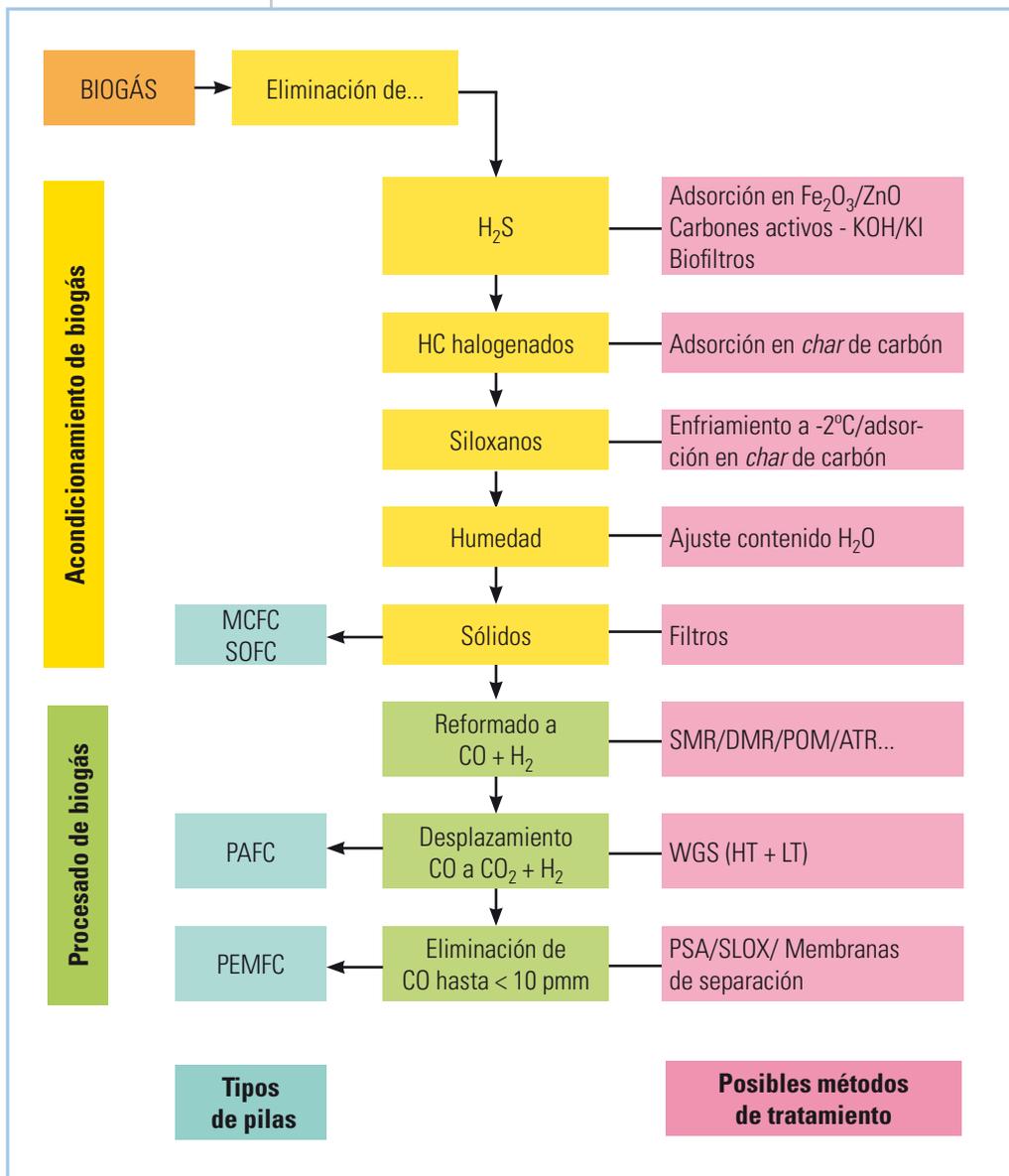


Figura 51. Etapas de tratamiento del biogás para su utilización en pilas de combustible

La mayoría de las actividades de I+D en el campo de la utilización de pilas de combustible se desarrollan mediante proyectos en los que colaboran distintas empresa/centros de investigación financiados, al menos en parte, por distintos programas de ámbito nacional (Plan Nacional de I+D en España, NEDO en Japón, US DoD –Department of Defense- Programas en EE.UU., etc.)

En la siguiente tabla se muestran los proyectos españoles del Plan Nacional de I+D. En este ámbito, también cabe destacar el programa de investigación multidisciplinar ENERCAM-CM: Programa de Aprovechamiento y Optimización de los Recursos Energéticos Regionales de la Comunidad de Madrid a través de la Validación de Pilas de combustible PEMFC y SOFC, financiados por la Comunidad de Madrid (IV PRYCT).

Grupo o Empresas Coordinadoras	Proyecto	Año
Asoc. de investigación de las industrias cárnicas del Principado de Asturias	Investigación y desarrollo de un sistema de valorización energética del biogás generado en una planta de metanización de residuos, mediante cogeneración con pila de combustible de óxidos sólidos. Fase I	PROFIT 2004
	Investigación y desarrollo de un sistema de valorización energética del biogás generado en una planta de metanización de residuos, mediante cogeneración con pila de combustible de óxidos sólidos. Fase II	PROFIT 2005
EMUASA	Descontaminación y revalorización del biogás generado en instalaciones depuradoras de aguas residuales	PROFIT 2004
NAVANTIA, S.A.	PREPIGÁS: Producción de energía con pila de combustible alimentada con biogás procedente de la gestión de residuos (MTU Hotmodule, MCFC)	PROFIT 2005

Tabla 20. Proyectos del Plan Nacional de I+D

Con una eficacia de conversión del 50 al 60%, se prevé que, en un futuro no muy lejano, las pilas de combustible ocuparán un lugar privilegiado entre las tecnologías de conversión de biogás en electricidad.

Así, los recientes descubrimientos biotecnológicos han aportado nuevas expectativas para la economía del hidrógeno. Estudios realizados sobre la digestión y fermentación bacteriológica de las materias orgánicas han demostrado que la producción de hidrógeno a partir de la biomasa (bioH₂) es económicamente viable.

5.2.4.2. Aspectos económicos

Las pilas de combustible constituyen una tecnología casi experimental y todavía no hay costes a nivel industrial que puedan reseñarse, por lo que cada proyecto debe valorarse de forma concreta.

5.2.4.3. Aspectos ambientales

El cálculo del potencial unitario de reducción de GEI se realizaría adoptando la metodología de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático para mecanismos de desarrollo limpio ACM0001 (Versión 11), descrita anteriormente. Debido a la inexistencia de datos sobre vertederos en los que se dispone de pilas de combustible, no se puede realizar en detalle el cálculo de las emisiones de CH₄ evitadas a la atmósfera.

En todo caso, con las pilas de combustible se produce electricidad a partir de biogás de vertedero con emisiones de óxido de nitrógeno y óxido de azufre muy reducidas, evitando también las emisiones de metano (ya que éste es consumido por la propia pila de combustible), contribuyendo así a la lucha contra el cambio climático. En general, es un proceso de bajo impacto ambiental en el que no se generan residuos peligrosos.

5.2.5. Conclusiones

De las alternativas planteadas anteriormente se pueden obtener las siguientes conclusiones en función de los aspectos técnicos, económicos y ambientales:

Generación de energía eléctrica: es la alternativa más asentada y exitosa. No es necesaria una elevada producción de biogás, ya que se dispone de una amplia gama de motores y turbinas, ni tampoco es imprescindible una elevada purificación del biogás, lo que permite reducir costes en los sistemas de purificación, al disminuir la exigencia de calidad. Uno de los inconvenientes de esta técnica es que ofrece rendimientos que no superan el 37% y su viabilidad depende en muchas ocasiones de la distancia existente al punto de enganche con la red de distribución eléctrica.

Cogeneración: permite la generación simultánea de energía eléctrica y energía térmica. Es la vía más eficaz de aprovechamiento de biogás, con una eficiencia energética superior a los sistemas que únicamente generan electricidad. La desventaja de este sistema radica en que no es técnica ni económicamente viable en ciertas instalaciones, debido a que requiere caudales de biogás por encima de los 300 Nm³/h con un contenido en CH₄ del 40% y una composición específica. Las impurezas presentes en el biogás afectan de manera directa a los motores de cogeneración.

Inyección a la red de gas natural: esta técnica requiere un exhaustivo sistema de purificación de biogás, con un porcentaje mínimo de un 97% en CH₄. A su vez, es necesaria una compresión y secado de biogás hasta alcanzar la presión de la red de distribución, lo que ocasiona un aumento considerable de los costes de inversión y explotación. No es el único problema existente, ya que además no se dispone de ninguna especificación en referencia a la calidad del biogás que puede ser inyectado en la red y se debe considerar la distancia existente hasta el gasoducto.

Pilas de combustible: se obtiene un elevado rendimiento eléctrico, aproximadamente un 50%, valor que puede ascender hasta un 80% si se tiene en cuenta la energía térmica generada. El hecho de que la técnica se encuentre en estado de desarrollo no permite que sea competitiva frente a las tecnologías convencionales en términos de costes y experiencia.

5.3. Análisis multicriterio. Jerarquización de alternativas.

A continuación se realiza un breve análisis de las alternativas planteadas en función de los aspectos descritos para cada una de ellas en el apartado anterior. Para ello, se utilizará una matriz multicriterio en la que se evaluarán los diferentes aspectos con una puntuación del 1 al 10. La alternativa más interesante será la que adquiera mayor valor global.

Alternativas	Factibilidad	Eficiencia	Economía	Ambiental	Total
Generación de energía eléctrica	10 (no es necesario una gran cantidad de biogás)	5 (máximo 37%)	7 (dependiendo de la distancia al punto de enganche)	8 (residuos del mantenimiento de equipos)	30
Cogeneración (generación de energía eléctrica y energía térmica)	7 (necesidad de gran cantidad de biogás con una composición determinada)	7 (mayor eficiencia que la generación de energía eléctrica)	6 (elevado coste de los equipos)	8 (residuos del mantenimiento de equipos)	28
Inyección a la red de gas natural	5 (todavía no está regulada)	10 (100% inyectado)	4 (dependiendo de la distancia al gasoducto)	10 (sin residuos)	29
Pilas de combustible	4 (técnica en desarrollo)	7 (50-60%)	2 (técnica en desarrollo)	10 (sin residuos)	23

Una vez aplicada la matriz, se ha obtenido que los valores más elevados corresponden a la generación de energía eléctrica. Se considera la opción más óptima debido a que no es necesaria una generación muy elevada de biogás ni una composición muy específica del mismo, además es aplicable a un amplio rango de vertederos en comparación con las otras alternativas. En todo caso, ésta es una comparación genérica y, como ya se ha indicado, debe realizarse el estudio de la alternativa más interesante para cada caso en particular.

Tabla 21. Análisis multicriterio de las alternativas planteadas

6. Viabilidad económica

de los proyectos de recuperación del biogás



Dentro del marco del presente estudio, la atención prioritaria se centra en proyectos realizables en municipios de tamaño intermedio, es decir, ni tan poblados que ya tengan resuelta la gestión del biogás de sus vertederos, ni tan pequeños que no sea económicamente viable el aprovechamiento del biogás.

El planteamiento de dichos proyectos requiere básicamente la realización, caso a caso, de un análisis pormenorizado de los factores que determinen su posible viabilidad, con el fin de determinar la configuración técnica del proyecto y la estructura financiera aplicable, teniendo en consideración diferentes soluciones. El análisis de la viabilidad económico-financiera se realiza con ayuda de modelos de cálculo que permitan validar la opción más adecuada.

6.1. Factores que influyen en la viabilidad

Como ya se ha indicado, la viabilidad económica depende de un gran número de factores que hay que analizar caso a caso. Los principales son:

- Edad, volumen y superficie de la masa de vertido.
- Tipología y composición de los residuos depositados (% materia biodegradable).
- Facilidad de extracción del biogás (por ejemplo si está encharcado por lixiviados, dureza de la masa de vertido, etc.).
- Distancia al punto de enganche (gasoducto o red eléctrica).
- Prima eléctrica o coste del gas natural.
- Tramitación de permisos de enganche a gasoducto, red eléctrica o punto de servicio de vehículos.
- Disponibilidad de flota de vehículos que puedan utilizar biogás.
- Posibles ayudas o subvenciones, financiación, etc.

6.2. Estudios de viabilidad

En este epígrafe se presentan tres ejemplos de vertederos de distinto tamaño con diferentes caudales de biogás. En ellos se describe el sistema de desgasificación y aprovechamiento energético del biogás y se detalla el coste aproximado de la inversión, ofreciendo así una idea del sistema más adecuado para cada volumen de generación de biogás.

Nota: En los costes indicados para cada uno de los vertederos no se incluye la obra civil, accesos, movimientos de tierra, etc.

- **Vertedero 1:** corresponde a un municipio pequeño en el que no se realiza aprovechamiento energético del biogás, limitándose a su quema en antorcha.

El vertedero tiene una extensión de 10,5 Ha y ha recibido residuos de una población de aproximadamente 90.000 habitantes. Se han depositado 570.464 toneladas de residuos municipales en el periodo comprendido entre 1985 y 2004. A partir de 2004, se han depositado escombros (641.776 toneladas) hasta 2010, año de clausura del vertedero. No se conoce con exactitud la composición de los residuos depositados, pero se dispone de datos de 1995 en los que la cantidad de materia orgánica era del 56,9%.

En base a estos datos se realizó una estimación del biogás generado en el vertedero, obteniendo para 2010, año de clausura, un caudal de biogás de 150 m³/h. Este caudal no es su-

ficiente para realizar el aprovechamiento energético del biogás, por lo que se optó por realizar la quema de biogás en antorcha.

El sistema de desgasificación consta de 27 pozos unidos mediante tuberías a las 4 estaciones de regulación y medida. Todas ellas confluyen en una estación de regulación y medida principal que se conecta con el equipo de aspiración-combustión de biogás. Este equipo consta de un sistema completo de aspiración e impulsión de biogás, y una antorcha.

El coste del sistema de desgasificación es de 197.273 € desglosado de la siguiente manera:

- Pozos de captación: 66.229 €.
 - Líneas entre los pozos y las estaciones de regulación y medida: 36.310 €.
 - Estaciones de regulación y medida: 21.034 €.
 - Líneas principales de biogás: 16.452 €.
 - Equipo compacto de extracción y combustión: 40.060 €.
 - Puesta en marcha y otros: 17.188 €.
- **Vertedero 2:** municipio pequeño-mediano. Se genera energía eléctrica mediante un motogenerador de 500 kWe.

El vertedero tiene una extensión de 11 Ha. en el que se han depositado aproximadamente 670.000 toneladas de residuos municipales, con un porcentaje en materia orgánica que oscila entre el 50% y el 60%. Dispone de dos vasos de vertido, uno de ellos ya clausurado, y el otro en el que se siguen depositando residuos, aunque se ha procedido al sellado de una parte del vaso.

Del estudio de generación de biogás se obtuvo que la producción máxima de biogás será de 275 m³/h, caudal suficiente para instalar un sistema de generación de energía eléctrica consistente en un motogenerador de 500 kWe.

El sistema de captación de biogás está formado por 23 pozos de desgasificación y 2 estaciones de regulación, una para cada vaso. Se ha instalado una estación manual con dos entradas que corresponden a cada una de las líneas provenientes de cada vaso.

Se ha instalado también un sistema de deshumidificación para controlar la humedad relativa del biogás, un filtro de carbón activo para controlar el nivel de siloxanos y un sistema de desulfuración para neutralizar el H₂S presente en el biogás. Estos sistemas aseguran que el biogás que se inyecta al motor posee unas condiciones óptimas.

El coste del sistema de desgasificación y aprovechamiento energético de biogás es de 436.000€, desglosado de la siguiente manera.

- Sistemas de captación: 62.000 €.
 - Equipo de generación: 329.000 €, compuesto por el motor y los sistemas de purificación de biogás.
 - Instalación y servicios auxiliares: 45.000 €.
- **Vertedero 3:** corresponde a uno de los mayores vertederos españoles, en el que se realiza cogeneración de calor y electricidad.

El vertedero, que posee una extensión de 670 Ha, ha estado en uso desde 1978 y se procedió a su sellado en 2003, periodo en el cual se depositaron más de 21 millones de toneladas de residuos municipales.

6. Viabilidad económica de los proyectos de recuperación del biogás

En el estudio de generación de biogás realizado se determinó que el caudal máximo correspondía a 2003, con una generación de biogás de 7.028 m³/h. La generación de biogás en el periodo entre 2002 y 2017 asciende a 57.271 m³/h. Con este elevado caudal de biogás se ha optado por implantar un sistema de cogeneración.

La planta aprovecha el biogás procedente del vertedero como combustible para la generación de energía eléctrica (dispone de una subestación eléctrica a 50 metros de distancia). El biogás es quemado en ocho motogeneradores, de 2,124 kWe, para producir electricidad, y como consecuencia se genera energía calorífica en forma de gases de escape. Esta energía calorífica se aprovecha para aumentar la potencia eléctrica generada en la planta mediante un turbogrupa a vapor, con turbina de 1,96 kWe.

Además de los motogeneradores y la turbina, el sistema de aprovechamiento energético cuenta con dos torres de desulfuración (que disminuyen la concentración de H₂S hasta concentraciones admisibles para el equipo), dos gasómetros para homogeneizar el biogás antes de su combustión, dos antorchas para quemar el excedente de biogás que no pueda ser consumido por los grupos generadores y dos unidades de tratamiento (secadores) que adecuan el biogás a condiciones de temperatura y humedad óptimas.

El sistema de desgasificación del vertedero consta de 280 pozos de desgasificación, un tendido de más de 37 Km. de tuberías y 10 estaciones de regulación y medida, con 14 entradas y un colector de salida. Estos colectores se unen en grupos de 5 en las centrales secundarias de extracción. El vertedero cuenta con dos subestaciones que confluyen en la central principal de extracción, donde se instalan las soplantes para aspirar el biogás y enviarlo a la planta de cogeneración.

El coste del sistema de desgasificación y aprovechamiento energético de biogás es aproximadamente de 11.882.488€. Este importe es orientativo, debido a que los costes del sistema y equipos se han actualizado a valores de 2010, pudiendo haber una ligera variación con los precios actuales. Los costes se dividen en:

- Pozos de captación: 612.300 €.
- Tuberías de biogás: 412.456 €.
- Estaciones de regulación y medida: 56.186 €.
- Equipo de cogeneración: 10.156.982 €, formado por los grupos motogeneradores y sistemas auxiliares, el sistema de recuperación de calor y los equipos eléctricos.
- Instalación y montaje del equipo de cogeneración: 472.684 €.
- Puesta en marcha: 66.500 €.
- Proyecto y varios: 105.380 €.

Como ya se ha mencionado, la atención prioritaria de este estudio se centra en proyectos referidos a municipios de **tamaño intermedio**, lo que excluiría los vertederos primero y tercero. Por consiguiente, el análisis se ha centrado dentro del rango intermedio, que incluye el ejemplo del segundo vertedero, añadiendo una segunda variante de un tamaño relativamente superior, de forma que se ha elaborado un modelo básico de estudio de viabilidad con dos escenarios:

- un primer escenario, aplicable a municipios del orden de 150.000-200.000 habitantes, con una planta dotada de un motogenerador de 500 kWe y una inversión total valorada en 715.000 Euros.
- una segunda variante de planta para municipios de 500.000-1.000.000 habitantes, con una potencia instalada de 2.100 kWe basada en tres motogeneradores y una inversión estimada en 2.500.000 Euros.

Para ambos escenarios, los datos mostrados en los modelos recogidos a continuación han sido tomados de casos reales representativos de instalaciones existentes.

6.2.1. Estructura del modelo y principales hipótesis de trabajo adoptadas

- Aunque la vida útil de las plantas puede considerarse de 25 años o más, el horizonte temporal del modelo se ha establecido en 11 años de operación de la instalación, tras la ejecución y puesta en marcha de la inversión, cubriendo de este modo el tramo más favorable de la curva de generación de biogás en el vertedero.
- En las tablas siguientes pueden examinarse los datos técnicos específicos asumidos para el cálculo del volumen de energía generada y de la energía vendida a la red.
- Se ha considerado que el precio de venta de energía a la red parte de un importe de 0,084551 EUR/kWh en el primer año de operación y experimenta un incremento anual del 1,5% a lo largo de los siguientes 10 años.
- Con respecto a los gastos de explotación, se ha asumido igualmente un incremento anual del 1,5%, excepto para la mano de obra, con un 3% de incremento.
- En correspondencia con la fase de mejores rendimientos, la amortización de las inversiones se realiza completamente en los primeros 10 años.
- La financiación del proyecto se ha supuesto que se realiza mediante una aportación de fondos propios (municipales) del 25% del importe de las inversiones, más la obtención de financiación ajena (entidades financieras) por el 75% restante en forma de préstamos al 6,50% de interés anual y 7 años de amortización, sin período de carencia.

[NOTA: en esta modelización se ha adoptado intencionalmente una hipótesis típica de estructura de financiación más onerosa que otras fórmulas que pudieran incluir subvenciones y/o fondos públicos a bajo coste —con muy escasas posibilidades de obtención— o mediante esquemas de colaboración público-privada o concesiones administrativas a largo plazo contra abono de un canon por la parte privada].

6.2.2. Resultados alcanzados en el modelo

El modelo ofrece unos resultados económico-financieros claramente positivos en los dos escenarios desarrollados:

- la obtención de beneficios netos, después de gastos financieros y de impuestos, de signo positivo desde el primer año de operación.
- una generación de *cash-flow* neto igualmente positiva desde el primer año.
- la recuperación financiera de la inversión alcanzada tras los primeros 5 años de operación de la planta gracias al *cash-flow* neto acumulado en dicho período.
- unas Tasas Internas de Retorno (TIR) muy elevadas —del 16% al 20%— en el horizonte de 11 años, que son la expresión de la clara rentabilidad de este tipo de proyectos, muy por encima de las tasas alcanzables por otras energías renovables como la eólica o la fotovoltaica.

6.2.3. Cuadros detallados de los dos escenarios del modelo

A continuación se muestran los cuadros de detalle del modelo económico-financiero:

6.
Viabilidad
económica
de los proyectos
de recuperación
del biogás

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA						
Municipio medio-pequeño: 150.000 - 200.000 habitantes						
Año		2011	2012	2013	2014	2015
nº de años		Año 0	1	2	3	4
INVERSIONES Totales	EUR	715.000	715.000	715.000	715.000	715.000
nº de motogeneradores		1				
Potencia instalada	kWe		500	500	500	500
Potencia generada	kWe		2.268	2.268	2.268	2.268
Carga media motor	%		80%	80%	80%	80%
Horas funcionamiento	h/año		7.074	7.074	7.074	7.074
Consumo biogás (50% CH ₄)	m ³ /año		77.420	77.420	77.420	77.420
Energía generada	kWh		4.278.355	4.278.355	4.278.355	4.278.355
Autoconsumo (7,5% durante 7.860 h/año)	kWh		356.530	356.530	356.530	356.530
Energía vendida a la red	kWh		3.921.826	3.921.826	3.921.826	3.921.826
Precio venta energía a la red	EUR/kWh		0,084551	0,085819	0,087107	0,088413
+ TOTAL INGRESOS DE EXPLOTACIÓN	EUR		331.594	336.568	341.617	346.741
<i>Costes mantenimiento motor</i>	EUR/h		3,80	3,86	3,91	3,97
Costes mantenimiento motor	EUR		80.644	81.853	83.081	84.327
Trabajos y Suministros de terceros	EUR		3.000	3.045	3.091	3.137
Electricidad-Teléfono y otros	EUR		2.500	2.538	2.576	2.614
Seguros	EUR		4.000	4.060	4.121	4.183
Mano de Obra	EUR		59.000	60.770	62.593	64.471
Costes financieros	EUR		34.856	29.877	24.897	19.918
Amortizaciones (10 años)	EUR		71.500	71.500	71.500	71.500
- TOTAL GASTOS DE EXPLOTACION	EUR		255.500	253.643	251.859	250.150
= RESULTADOS ANTES DE IMPUESTOS			76.094	82.926	89.758	96.591
Beneficios Extraordinarios	EUR					
Impuesto de Sociedades	EUR	30%	-22.828	-24.878	-26.927	-28.977
BENEFICIOS NETOS	EUR		53.266	58.048	62.831	67.614

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA							
Municipio medio-pequeño: 150.000 - 200.000 habitantes							
2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
5	6	7	8	9	10	11	
715.000	715.000	715.000	715.000	715.000	715.000	715.000	715.000
500	500	500	500	500	500	500	500
2.268	2.268	2.268	2.268	2.268	2.268	2.268	2.268
80%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	
7.074	7.074	7.074	7.074	7.074	7.074	7.074	7.074
77.420	77.420	72.581	67.743	62.904	58.065	53.226	
4.278.355	4.278.355	4.010.958	3.743.561	3.476.164	3.208.766	2.941.369	
356.530	356.530	334.247	311.963	289.680	267.397	245.114	
3.921.826	3.921.826	3.676.712	3.431.597	3.186.483	2.941.369	2.696.255	
0,089739	0,091085	0,092452	0,093838	0,095246	0,096675	0,098125	
351.942	357.221	339.918	322.016	303.500	284.356	264.570	
4,03	4,09	4,16	4,22	4,28	4,34	4,41	
85.592	86.876	88.179	89.502	90.844	92.207	93.590	
3.184	3.232	3.280	3.330	3.379	3.430	3.482	
2.653	2.693	2.734	2.775	2.816	2.858	2.901	
4.245	4.309	4.374	4.439	4.506	4.574	4.642	
66.405	68.397	70.449	72.563	74.739	76.982	79.291	
14.938	9.959	4.979	0	0	0	0	
71.500	71.500	71.500	71.500	71.500	71.500	71.500	0
248.519	246.966	245.495	244.108	247.786	251.551	183.906	
103.424	110.255	94.423	77.908	55.714	32.805	80.663	
-31.027	-33.076	-28.327	-23.372	-16.714	-9.842	-24.199	
72.396	77.178	66.096	54.536	39.000	22.964	56.464	

Cuadro 1.1: Análisis de rentabilidad económica

6.
Viabilidad
económica
de los proyectos
de recuperación
del biogás

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA						
Municipio medio-pequeño: 150.000 - 200.000 habitantes						
Año		2011	2012	2013	2014	2015
nº de años		Año 0	1	2	3	4
FINANCIACIÓN DEL PROYECTO						
+ Fondos propios	(25% s/ inversión)	178.750				
+ Préstamo(s) - saldo vivo fin de año	(75% s/ inversión)	536.250	459.643	383.036	306.429	229.821
Servicio de la deuda						
Devolución de préstamos	(en 7 años)		76.607	76.607	76.607	76.607
Intereses anuales	6,50%		34.856	29.877	24.897	19.918
Total Servicio de la Deuda			111.463	106.484	101.504	96.525
Ratio de Cobertura del Servicio Anual de la Deuda (RCSD)			1,63	1,69	1,75	1,82
CASH FLOW y RENTABILIDAD						
+ TOTAL INGRESOS DE EXPLOTACIÓN	EUR		331.594	336.568	341.617	346.741
Costo de la inversión	EUR	715.000				
- Costes mantenimiento motor	EUR		80.644	81.853	83.081	84.327
- Trabajos y Suministros de terceros	EUR		3.000	3.045	3.091	3.137
- Electricidad-Telefono y otros	EUR		2.500	2.538	2.576	2.614
- Seguros	EUR		4.000	4.060	4.121	4.183
- Mano de Obra	EUR		59.000	60.770	62.593	64.471
Gastos totales	EUR	715.000	149.144	152.266	155.461	158.732
Impuesto sobre beneficios	EUR		22.828	24.878	26.927	28.977
- PAGOS TOTALES	EUR	715.000	171.972	177.143	182.389	187.709
= CASH FLOW NETO (para cálculo de TIR)	EUR	-715.000	159.622	159.425	159.228	159.032
Gastos financieros anuales	EUR		34.856	29.877	24.897	19.918
CASH FLOW NETO desp. Gtos. Financieros	anual	-715.000	124.766	129.548	134.331	139.114
	acumulado	-715.000	-590.234	-460.686	-326.355	-187.242
TIR (Tasa Interna de Retorno)	16,86%					
VAN (Valor Actual Neto) - @ 8,5%	252.364					
RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (años)	5	>>>	1	2	3	4

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA						
Municipio medio-pequeño: 150.000 - 200.000 habitantes						
2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
5	6	7	8	9	10	11
153.214	76.607	0				
76.607	76.607	76.607				
14.938	9.959	4.979				
91.546	86.566	81.587	0	0	0	0
1,88	1,94	1,80				
351.942	357.221	339.918	322.016	303.500	284.356	264.570
85.592	86.876	88.179	89.502	90.844	92.207	93.590
3.184	3.232	3.280	3.330	3.379	3.430	3.482
2.653	2.693	2.734	2.775	2.816	2.858	2.901
4.245	4.309	4.374	4.439	4.506	4.574	4.642
66.405	68.397	70.449	72.563	74.739	76.982	79.291
162.080	165.507	169.016	172.608	176.286	180.051	183.906
31.027	33.076	28.327	23.372	16.714	9.842	24.199
193.107	198.584	197.343	195.980	193.000	189.892	208.105
158.835	158.637	142.575	126.036	110.500	94.464	56.464
14.938	9.959	4.979	0	0	0	0
143.896	148.678	137.596	126.036	110.500	94.464	56.464
-43.345	105.333	242.929	368.965	479.465	573.929	630.393
5						

Cuadro 1.2: Análisis de rentabilidad económica

6.
Viabilidad
económica
de los proyectos
de recuperación
del biogás

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA						
Municipio medio-grande: 500.000 - 1.000.000 habitantes						
Año		2011	2012	2013	2014	2015
nº de años		Año 0	1	2	3	4
INVERSIONES Totales	EUR	2.500.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000
nº de motogeneradores		3				
Potencia instalada	kWe		2.100	2.100	2.100	2.100
Potencia generada	kWe		2.268	2.268	2.268	2.268
Carga media motor	%		80%	80%	80%	80%
Horas funcionamiento	h/año		7.074	7.074	7.074	7.074
Consumo biogás (50% CH ₄)	m3/año		232.261	232.261	232.261	232.261
Energía generada	kWh		12.835.066	12.835.066	12.835.066	12.835.066
Autoconsumo (7,5% durante 7.860 h/año)	kWh		1.069.589	1.069.589	1.069.589	1.069.589
Energía vendida a la red	kWh		11.765.477	11.765.477	11.765.477	11.765.477
Precio venta energía a la red	EUR/kWh		0,084551	0,085819	0,087107	0,088413
+ TOTAL INGRESOS DE EXPLOTACIÓN	EUR		994.783	1.009.705	1.024.850	1.040.223
<i>Costes mantenimiento motor</i>	EUR/h		9,50	9,64	9,79	9,93
Costes mantenimiento motor	EUR		201.609	204.633	207.703	210.818
Trabajos y Suministros de terceros	EUR		6.000	6.090	6.181	6.274
Electricidad-Telefono y otros	EUR		5.000	5.075	5.151	5.228
Seguros	EUR		8.000	8.120	8.242	8.365
Mano de Obra	EUR		59.000	60.770	62.593	64.471
Costes financieros	EUR		121.875	104.464	87.054	69.643
Amortizaciones (10 años)	EUR		250.000	250.000	250.000	250.000
- TOTAL GASTOS DE EXPLOTACION	EUR		651.484	639.152	626.924	614.800
= RESULTADOS ANTES DE IMPUESTOS	EUR		343.299	370.552	397.927	425.423
Beneficios Extraordinarios	EUR					
Impuesto de Sociedades	EUR	30%	-102.990	-111.166	-119.378	-127.627
BENEFICIOS NETOS	EUR		240.309	259.387	278.549	297.796

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA							
Municipio medio-grande: 500.000 - 1.000.000 habitantes							
2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
5	6	7	8	9	10	11	
2.500.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000	2.500.000
2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100
2.268	2.268	2.268	2.268	2.268	2.268	2.268	2.268
80%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	
7.074	7.074	7.074	7.074	7.074	7.074	7.074	7.074
232.261	232.261	217.744	203.228	188.712	174.195	159.679	
12.835.066	12.835.066	12.032.874	11.230.682	10.428.491	9.626.299	8.824.108	
1.069.589	1.069.589	1.002.740	935.890	869.041	802.192	735.342	
11.765.477	11.765.477	11.030.135	10.294.792	9.559.450	8.824.108	8.088.765	
0,089739	0,091085	0,092452	0,093838	0,095246	0,096675	0,098125	
1.055.826	1.071.664	1.019.755	966.048	910.500	853.069	793.709	
10,08	10,23	10,39	10,54	10,70	10,86	11,03	
213.980	217.190	220.448	223.755	227.111	230.518	233.975	
6.368	6.464	6.561	6.659	6.759	6.860	6.963	
5.307	5.386	5.467	5.549	5.632	5.717	5.803	
8.491	8.618	8.748	8.879	9.012	9.147	9.284	
66.405	68.397	70.449	72.563	74.739	76.982	79.291	
52.232	34.821	17.411	0	0	0	0	
250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	250.000	0
602.784	590.877	579.083	567.404	573.254	579.224	335.317	
453.043	480.786	440.672	398.643	337.246	273.845	458.392	
-135.913	-144.236	-132.202	-119.593	-101.174	-82.153	-137.518	
317.130	336.551	308.470	279.050	236.072	191.691	320.875	

Cuadro 2.1: Análisis de rentabilidad económica

6.
Viabilidad
económica
de los proyectos
de recuperación
del biogás

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA						
Municipio medio-grande: 500.000 - 1.000.000 habitantes						
Año		2011	2012	2013	2014	2015
nº de años		Año 0	1	2	3	4
FINANCIACIÓN DEL PROYECTO						
+ Fondos propios	(25% s/ inversión)	625.000				
+ Préstamo(s) - saldo vivo fin de año	(75% s/ inversión)	1.875.000	1.607.143	1.339.286	1.071.429	803.571
Servicio de la deuda						
Devolución de préstamos	(en 7 años)		267.857	267.857	267.857	267.857
Intereses anuales	6,50%		121.875	104.464	87.054	69.643
Total Servicio de la Deuda			389.732	372.321	354.911	337.500
Ratio de Cobertura del Servicio Anual de la Deuda (RCSD)			1,83	1,90	1,97	2,05
CASH FLOW y RENTABILIDAD						
+ TOTAL INGRESOS DE EXPLOTACIÓN	EUR		994.783	1.009.705	1.024.850	1.040.223
Costo de la inversión	EUR	2.500.000				
- Costes mantenimiento motor	EUR		201.609	204.633	207.703	210.818
- Trabajos y Suministros de terceros	EUR		6.000	6.090	6.181	6.274
- Electricidad-Telefono y otros	EUR		5.000	5.075	5.151	5.228
- Seguros	EUR		8.000	8.120	8.242	8.365
- Mano de Obra	EUR		59.000	60.770	62.593	64.471
Gastos totales	EUR	2.500.000	279.609	284.688	289.870	295.157
Impuesto sobre beneficios	EUR		102.990	111.166	119.378	127.627
- PAGOS TOTALES	EUR	2.500.000	382.599	395.854	409.248	422.784
= CASH FLOW NETO (para cálculo de TIR)	EUR	-2.500.000	612.184	613.851	615.602	617.439
Gastos financieros anuales	EUR		121.875	104.464	87.054	69.643
CASH FLOW NETO desp. Gtos. Financieros	anual	-2.500.000	490.309	509.387	528.549	547.796
	acumulado	-2.500.000	-2.009.691	-1.500.304	-971.756	-423.960
TIR (Tasa Interna de Retorno)	20,47%					
VAN (Valor Actual Neto) - @ 8,5%	1.351.266					
RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (años)	5	>>>	1	2	3	4

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD ECONOMICA						
Municipio medio-grande: 500.000 - 1.000.000 habitantes						
2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
5	6	7	8	9	10	11
535.714	267.857	0				
267.857	267.857	267.857				
52.232	34.821	17.411				
320.089	302.679	285.268	0	0	0	0
2,12	2,19	2,08				
1.055.826	1.071.664	1.019.755	966.048	910.500	853.069	793.709
213.980	217.190	220.448	223.755	227.111	230.518	233.975
6.368	6.464	6.561	6.659	6.759	6.860	6.963
5.307	5.386	5.467	5.549	5.632	5.717	5.803
8.491	8.618	8.748	8.879	9.012	9.147	9.284
66.405	68.397	70.449	72.563	74.739	76.982	79.291
300.551	306.056	311.673	317.404	323.254	329.224	335.317
135.913	144.236	132.202	119.593	101.174	82.153	137.518
436.464	450.292	443.874	436.997	424.428	411.377	472.835
619.362	621.372	575.881	529.050	486.072	441.691	320.875
52.232	34.821	17.411	0	0	0	0
567.130	586.551	558.470	529.050	486.072	441.691	320.875
143.170	729.721	1.288.191	1.817.242	2.303.314	2.745.005	3.065.880
5						

Cuadro 2.2: Análisis de rentabilidad económica

6.3. Posibles vías de financiación

Un proyecto de biogás desarrollado sobre la base de una configuración técnica sólidamente concebida y del correspondiente estudio detallado de su viabilidad económico-financiera podrá acceder a diversas fuentes de financiación públicas y/o privadas, según se muestra a continuación.

6.3.1. Fondos públicos y/o préstamos bancarios para proyectos de biogás

Para proyectos rentables, elaborados por municipios solventes, la banca privada puede aportar su financiación mediante préstamos directos o también canalizando la financiación ICO.

Respecto a las posibilidades de financiación por parte del Estado español, se puede acudir, además de a determinados fondos gestionados por el IDAE (normalmente para actividades relacionadas con I+D), al Instituto de Crédito Oficial (ICO), que financia las inversiones o gastos incluidos en el capítulo 9 del balance de cuentas municipal y que normalmente se utilizan para proyectos incluidos en el capítulo 6 o para transferencia de fondos a empresas municipales auxiliares. El tamaño mínimo de un Ayuntamiento para que sea financiado directamente por el ICO es de 75.000 habitantes, con un volumen financiado típico para cada operación de unos 6 millones de euros.

Otra posibilidad es acudir a la Comunidad Autónoma correspondiente, pues el ICO también proporciona fondos a determinados organismos oficiales de ámbito autonómico para que los distribuyan en proyectos concretos. El detalle de las líneas de financiación ICO se puede consultar en Internet (<http://www.ico.es/web/contenidos/7085/index.html>).

6.3.2. Colaboración entre Gobiernos Locales y empresas del sector de gestión de residuos

Según se señala a continuación, las posibles colaboraciones entre Gobiernos Locales y empresas privadas pueden adoptar cualquier forma contemplada en la Ley 30/2007, de 30 de octubre, de Contratos del Sector Público, aunque la opción preferida por los Ayuntamientos grandes es la concesión administrativa a largo plazo, que incluye la amortización de las inversiones y los costes de operación mediante el abono de un canon.

Las principales posibilidades de colaboración entre los Gobiernos Locales y el sector privado son las siguientes:

- A través de una contratación pública, mediante la cual, al amparo de la Ley 30/2007, de 30 de octubre, de Contratos del Sector Público, se formaliza un contrato con una entidad privada para la construcción del sistema de captación y aprovechamiento de biogás y/o la explotación del vertedero para obtener, principalmente, biogás.
- Mediante una concesión administrativa para la explotación del vertedero, formalizándose a través de un contrato en el que la administración pública encomienda a una empresa la prestación del servicio a cambio de una remuneración, la cual se fija según los resultados financieros de la explotación del servicio. La concesión se podrá hacer para la construcción y/o explotación de las instalaciones de eliminación de residuos. La entidad local que adopte esta forma contractual debe dejar claro, ya sea en el contrato o a través de orden municipal, que no se cede la propiedad ni de las instalaciones ni del biogás que se extraiga del vertedero, ya que dicha propiedad es del Gobierno Local. En el caso de la concesión administrativa, cada Administración tiene su propia legislación, por lo que habrá que atenerse a cada norma concreta.
- Formalización de un convenio con una entidad sin ánimo de lucro y con una solvencia técnica específica en la explotación de vertederos para la extracción y aprovechamiento del biogás.

En tal caso, se estará a lo dispuesto en la Ley 38/2003, de 17 de noviembre, General de Subvenciones.

- Establecer una encomienda de gestión, al amparo de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, que en su artículo 15 establece lo siguiente:
 1. “La realización de actividades de carácter material, técnico o de servicios de la competencia de los órganos administrativos o de las Entidades de derecho público podrá ser encomendada a otros órganos o Entidades de la misma o de distinta Administración, por razones de eficacia o cuando no se posean los medios técnicos idóneos para su desempeño.
 2. La encomienda de gestión no supone cesión de titularidad de la competencia ni de los elementos sustantivos de su ejercicio, siendo responsabilidad del órgano o Entidad encomendante dictar cuantos actos o resoluciones de carácter jurídico den soporte o en los que se integre la concreta actividad material objeto de encomienda.
 3. La encomienda de gestión entre órganos administrativos o Entidades de derecho público pertenecientes a la misma Administración deberá formalizarse en los términos que establezca su normativa propia y, en su defecto, por acuerdo expreso de los órganos o Entidades intervinientes. En todo caso el instrumento de formación de la encomienda de gestión y su resolución deberá ser publicado, para su eficacia en el Diario oficial correspondiente. Cada Administración podrá regular los requisitos necesarios para la validez de tales acuerdos que incluirán, al menos, expresa mención de la actividad o actividades a las que afecten, el plazo de vigencia y la naturaleza y alcance de la gestión encomendada.
 4. Cuando la encomienda de gestión se realice entre órganos y Entidades de distintas Administraciones se formalizará mediante firma del correspondiente convenio entre ellas, salvo en el supuesto de la gestión ordinaria de los servicios de las Comunidades Autónomas por las Diputaciones Provinciales o en su caso Cabildos o Consejos insulares, que se regirá por la legislación de Régimen Local.
 5. El régimen jurídico de la encomienda de gestión que se regula en este artículo no será de aplicación cuando la realización de las actividades enumeradas en el apartado primero haya de recaer sobre personas físicas o jurídicas sujetas a derecho privado, ajustándose entonces, en lo que proceda, a la legislación correspondiente de contratos del Estado, sin que puedan encomendarse a personas o Entidades de esta naturaleza actividades que, según la legislación vigente, hayan de realizarse con sujeción al derecho administrativo”.

Dentro de estos modelos de colaboración hay que señalar un riesgo importante que no se termina de despejar: la estabilidad de la ‘prima’ por la generación de electricidad a partir de energías renovables. Por ello es necesario fijar de forma permanente las reglas del juego para los generadores de ‘energía verde’, pues en caso contrario resulta muy complicado planificar la rentabilidad de los proyectos de aprovechamiento de biogás de vertedero.

Como consecuencia de ello, las empresas concesionarias incluyen siempre unas cláusulas en sus contratos por las que el canon o tarifa que recibirán está ligado al balance económico de la gestión y/o a la amortización de la inversión. Dentro de este modelo, los ingresos debidos a la venta de energía eléctrica a la red suponen una partida muy importante, por lo que cualquier incertidumbre o variación a la baja de la ‘prima’ puede hacer que se desajuste el equilibrio económico-financiero del proyecto y que el Ayuntamiento promotor deba ampliar el canon abonado a la empresa concesionaria.

6.3.3. Financiación con fondos europeos

A continuación se describen el marco y los instrumentos de financiación con fondos europeos, si bien conviene señalar que las posibilidades de financiación de este tipo de proyectos con dichos fondos son muy escasas, pues en la actualidad la aplicación de estos fondos comunitarios está derivando mayoritariamente a los países del este de Europa, lo que ha producido una importante reducción de estos fondos para España.

En la Comunicación de la Comisión Europea COM (2010) 2020, "Europa 2020: Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador", de 3 de marzo de 2010, destaca la iniciativa *una Europa que utilice eficazmente los recursos*"

El objetivo de esta iniciativa es apoyar el paso a una economía que utilice eficazmente sus recursos y con pocas emisiones de carbono, desligando el crecimiento económico del uso de recursos y de energía, reduciendo las emisiones de CO₂, reforzando la competitividad y promoviendo una mayor seguridad energética.

Para alcanzar tal objetivo, la Comisión Europea moviliza los instrumentos financieros de la Unión Europea (por ejemplo, Fondos de Desarrollo Rural, Fondos Estructurales, Programa Marco de I+D, Redes transeuropeas, BEI, etc.) como parte de una estrategia de financiación coherente, que reúna fondos de la Unión Europea y fondos nacionales, públicos y privados.

Así se podrá obtener financiación a través de:

- Fondo Europeo de Desarrollo Regional: solicitándolo al organismo competente de cada Comunidad Autónomas, a través de las convocatorias que realiza el Ministerio de Política Territorial (http://www.mpt.es/areas/politica_local/coop_econom_local_estado_fondos_europeos/fondos_europeos) y mediante las iniciativas llevadas a cabo por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (<http://www.idae.es/index.php/mod.pags/mem.detalle/idpag.33/relcategoria.1024/relmenu.44>).
- Fondo de Cohesión: dirigiéndose directamente a la Dirección General de Fondos Comunitarios del Ministerio de Economía y Hacienda (<http://www.dgfc.sggp.meh.es>).
- Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural: contactando con el correspondiente Grupo de Acción Local o Grupo de Desarrollo Rural de la zona de influencia (<http://www.redr.es/es/portal.do>).

No obstante, sería necesario estudiar cada caso y, en función de sus peculiaridades, acudir a la forma de financiación más ventajosa y con mayores posibilidades.

El procedimiento para la solicitud de financiación suele estar constituido por las siguientes fases:

Fase I: Solicitud de ayuda:

- Presentación de solicitud.
- Estudio de la documentación.
- Consulta de la elegibilidad.
- Verificación de la documentación y fiscalización.
- Propuesta de la ayuda o denegación de la misma.
- Aprobación de la ayuda o denegación de ésta.

Fase II: Inversión:

- Firma de contrato, acuerdo de colaboración o documento similar.
- Seguimiento de la inversión.
- Justificación de la inversión.
- Verificación de la justificación
- Certificación.

Fase III: Pago de las ayudas:

- Pago de las ayudas.

Fase IV: Control:

- Informe sobre la marcha y resultados del proyecto.
- Informes de organismos intermedios.
- Seguimiento del proyecto.

La documentación que normalmente se requiere es la siguiente:

- Modelo de solicitud oficial (en caso de que la hubiere) firmado por el titular o persona delegada o con representación, según se trate de una persona física o jurídica.
- Acreditación del cumplimiento de las obligaciones fiscales y con la Seguridad Social y, en su caso, declaración/liquidación de impuestos y boletines de cotización, o su autorización para su obtención electrónica.
- Memoria descriptiva del proyecto.
- Estudio de viabilidad económico-financiera del proyecto.
- En caso de persona física: fotocopia del Documento Nacional de Identidad del solicitante.
- En caso de persona jurídica: Código de Identificación Fiscal, Documento Nacional de Identidad del representante y poder de representación (escrituras de la sociedad, acta de la junta directiva o acuerdo del pleno).
- Certificación de la solvencia económica emitida por la entidad bancaria de la cuenta del beneficiario en el que se abonarán las subvenciones.
- Proyecto visado o memoria valorada por el técnico competente, cuando así lo exija la legislación, en el caso de proyectos que impliquen la realización de obras de inversión, en el que se incluirán los planos de localización de la inversión, del estado actual y del proyecto.
- Facturas pro forma acorde con el proyecto presentado. Se deberá cumplir con la Ley 38/2003 General de Subvenciones y la Ley 30/2007 de Contratos del Sector Público.
- Escritura de propiedad, dominio, cesión o alquiler durante un período de tiempo que comprenda la realización del proyecto más un mínimo de 5 años de actividades desde el pago final de la inversión.
- En el caso de sociedades mercantiles, SAT y cooperativas, fotocopia de la escritura de constitución e impuesto de sociedades correspondiente al último ejercicio cerrado. En el caso de aso-

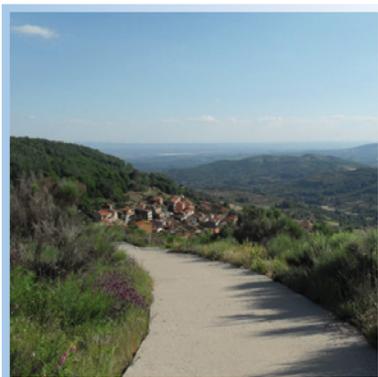
6. Viabilidad económica de los proyectos de recuperación del biogás

ciaciones sin ánimo de lucro y otras, fotocopia del acta fundacional, los estatutos y presupuesto anual que gestiona la entidad.

- Fotocopia justificativa de haber realizado la solicitud de permisos, inscripciones y registros y/o cualesquiera otros requisitos exigibles por la normativa de aplicación para el tipo de actividad de que se trate.
- Declaración jurada de ayudas concedidas y/o solicitadas a otros organismos o administraciones nacionales, regionales y locales para la misma iniciativa para la que se presenta la solicitud.
- Compromiso de respetar el destino de la inversión durante un período de 5 años desde el pago final, sin perjuicio de que una norma superior de cada Comunidad Autónoma determine un plazo de tiempo más amplio para algunas inversiones, en cuyo caso, el compromiso deberá ser por dicho plazo.
- Compromiso de poner a disposición de la administración regional, estatal, comunitaria u organismos de control establecidos la documentación necesaria para que éstos puedan recabar información precisa y verificar la inversión o gasto, hasta los 5 años siguientes al último pago de la ayuda.
- Compromiso de cumplir las obligaciones establecidas en materia de información y publicidad.
- Certificado de no inicio de la inversión.

Por último, no hay que olvidar que tanto el procedimiento descrito como la documentación relacionada son genéricos y, que, una vez analizada cada tipo de inversión y seleccionado el tipo de financiación a la cual se desea acudir, habría que proceder a la preparación y entrega de la documentación específica o que se requiera en cada caso.

7. Conclusiones



7. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden deducir del presente estudio son las siguientes:

- Según lo indicado en el Anexo I del RD 1481/2001, de 27 de diciembre, todos los vertederos que reciban residuos biodegradables tienen la obligación de recoger, tratar y aprovechar los gases de vertedero. Si el gas recogido no puede ser aprovechado para producir energía, se deberá quemar.
- Debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el cálculo de la producción de biogás, no se puede obtener un modelo tipo de vertedero asimilable a cada uno de los sistemas de aprovechamiento de biogás. Tampoco se pueden realizar estimaciones económicas para cada sistema de aprovechamiento de biogás.
- Se considera necesario conocer la composición de los residuos depositados en el vertedero, principalmente la cantidad de materia orgánica, para poder estimar la generación de biogás.
- Cada sistema de valorización energética de biogás se adecua a unas determinadas características de biogás. Por tanto, es necesario conocer el tipo y la producción de biogás en el vertedero para determinar cuál es el sistema más óptimo, aunque algunos de ellos, como la generación de energía eléctrica, presentan, en general, mayores ventajas técnicas, económicas y ambientales.
- El biogás debe ser depurado previamente en cualquiera de sus aplicaciones energéticas. Los requerimientos en cuanto a purificación son más exigentes cuando el biogás se utiliza como combustible de vehículos, se inyecta a al red de gas natural o se utiliza en pilas de combustible.
- Es necesario fomentar la investigación y desarrollo en determinados sistemas de valorización energética del biogás para conseguir que sean más eficientes y económicamente competitivos.
- En general, los sistemas de extracción y aprovechamiento de biogás resultan deficitarios si no se contabiliza el beneficio ambiental que aportan.
- Respecto a las encuestas realizadas, la mayoría de los municipios que han contestado no realizan aprovechamiento energético del biogás generado en sus vertederos, principalmente porque son pequeños y sus vertederos no generan una cantidad suficiente de gas metano como para realizar un aprovechamiento energético del mismo.
- Las posibilidades de financiación de este tipo de proyectos con fondos europeos son muy escasas, pues la aplicación de estos fondos comunitarios están derivando hacia a los países del este de Europa. Sin embargo, las Comunidades Autónomas pueden disponer de financiación ICO para estos proyectos.
- Las posibles colaboraciones entre unidades de gestión y empresas privadas pueden adoptar cualquier forma contemplada en la Ley 30/2007, de 30 de octubre, de Contratos del Sector Público, aunque la opción preferida por los ayuntamientos grandes es la concesión administrativa a largo plazo, que incluye la amortización de las inversiones y los costes de operación mediante el abono de un canon. Si se elige esta tecnología, hay que precisar bien la titularidad del biogás y cómo actuar en caso de variación de la prima eléctrica.

8. Bibliografía



8. Bibliografía

Ámbito	Título	Autor	Año
Global	Number and types of landfill gas plants worldwide	LFG Consulting (Willumsen)	2004
Europa	Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2009	Agencia Ambiental Europea (EEA)	2010
Europa	Waste management options and climate change	Comisión Europea	2001
Europa	EEA Briefing: Better management of municipal waste will reduce greenhouse gas emissions	Agencia Ambiental Europea (EEA)	2008
Europa	Diverting waste from landfill Effectiveness of waste-management policies in the European Union	Agencia Ambiental Europea (EEA)	2007
Europa	Tracking progress towards Kyoto and 2020 targets in Europe	Agencia Ambiental Europea (EEA)	2010
Europa	The European Pollutant Release and Transfer Register (web)	Agencia Ambiental Europea (EEA)	2010
Dinamarca	Omkostningseffektive tiltag i de ikke-kvotebelagte sektorer (Actuaciones coste-efectividad en sectores fuera del esquema de comercio de emisiones)	Miljøstyrelse (Agencia de Protección Ambiental)	2007
Dinamarca	Optimering af gasindvinding på deponeringsanlæg i Danmark (Optimización de la gestión de gas de vertedero en Dinamarca)	Miljøstyrelse (Agencia de Protección Ambiental)	2005
Dinamarca	Metoder til opgørelse af emissioner fra danske deponeringsanlæg til brug for PRTR-indrapportering (Metodología para la estimación de emisiones de los vertederos de Dinamarca para información para el PRTR)	Miljøstyrelse (Agencia de Protección Ambiental)	2010
Alemania	Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland (Contribución de los residuos al desarrollo sostenible en Alemania)	IFEU- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Instituto para la energía y la investigación ambiental de Heidelberg)	2005
Alemania	Deponienachsorge - Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge (Gestión de vertederos- opciones de operación, tiempo de vida, criterios para aceptación y monitorización)	Umweltbundesamt (Agencia de Protección Ambiental)	2006
Alemania	Umwelt- Abfallentsorgung (Medio Ambiente- Residuos)	Statistisches Bundesamt (Órgano estadístico nacional)	2008
Alemania	Klimazwei (web)	University of Hamburg	2010
Alemania	Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft (Potencial de protección del clima de los residuos)	IFEU- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (Instituto para la energía y la investigación ambiental de Heidelberg)	2010
Alemania	GVU Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz-Deponien (Reglas para la seguridad y la protección de la salud- vertederos)	Bundesverband der Unfallkassen (Federación de Seguros de Accidentes)	2001
Alemania	Evaluation of waste policies related to the Landfill Directive	European Topic Centre on Resource and Waste Management	2007
Reino Unido	Greenhouse Gas Inventories for England, Scotland, Wales and Northern Ireland: 1990 - 2008	Department for Energy and Climate Change, The Scottish Government, The Welsh Assembly Government and The Northern Ireland Department of Environment.	2009
Reino Unido	Guidance on the management of landfill gas	Environmental Agency (England)	2004
Reino Unido	Waste Strategy Annual Progress Report 2008/09	Department for Environment, Food and Rural Affairs	2009
Reino Unido	Energy Statistics 2009	Department of Climate and Energy	2009
Italia	Ideambiente	Agencia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici APAT	2007
Italia	LCA applicata a diversi sistemi di trattamento dei rifiuti	A. Corti, L. Lombardi Dipartimento di Energetica "Sergio Stecco" - Università degli Studi di Firenze	2006
Italia	Emissions control in sustainable landfilling	Raffaello Cosu°, Roberto Raga°, and Davide Rossetti°° °IMAGE - Department of Hydraulic, Maritime, Environmental and Geotechnical Engineering, University of Padua °° Spinoff s.r.l.	2007

9. Índice de figuras



9. Índice de figuras

Figura 1. Número de instalaciones de recuperación de biogás en distintas zonas del mundo. Fuente: Willumsen, 2004.	18
Figura 2. Número de vertederos con plantas de recuperación de biogás en Europa. Fuente: Willumsen, 2004.	18
Figura 3. Relación entre los residuos eliminados en vertedero y la emisión de metano en vertederos para la Europa de los 27. Fuente: EEA, 2009	20
Figura 4. Generación de biogás en la UE. Fuente: EurObserver.	21
Figura 5. Posibles corrientes de metano en un vertedero. Fuente: "Waste Management Options and Climate Change". Comisión Europea.	21
Figura 6. Evolución de las emisiones de GEI expresadas en CO ₂ equivalente (fuente Inventario de emisiones de GEI 2011 MARM)	22
Figura 7. Evolución de las emisiones de CO ₂ equivalente en el sector de los residuos. Inventario 2011.	24
Figura 8. Comparación Generación vs Captación. Periodo 1990 - 2009	24
Figura 9. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Alemania. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009- EEA	25
Figura 10. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEI por sectores en Alemania. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009- EEA	25
Figura 11. Situación de los vertederos en Alemania. Fuente: Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Comisión Europea, 2010.	25
Figura 12. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Dinamarca.	26
Figura 13. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEI por sectores en Dinamarca.	27
Figura 14. Situación de los vertederos en Dinamarca. Fuente: Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Comisión Europea, 2010.	28
Figura 15. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Italia. Fuente: Greenhouse gas emissions trenes and projections in Europe 2009-EEA.	29
Figura 16. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEI por sectores en Italia. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009-EEA.	29
Figura 17. Distribución de gases de efecto invernadero por sectores en Reino Unido. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009- EEA	31
Figura 18. Series temporales y tendencias a futuro de emisiones de GEIs por sectores. Fuente: Greenhouse gas emissions trends and projections in Europe 2009- EEA	31
Figura 19. Situación de los vertederos en Reino Unido. Fuente: Registro Europeo de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Comisión Europea, 2010.	32
Figura 20. Distribución de la producción de energías renovables en UK en 2009 por fuentes. Referencia: Digest of UK Statistics 2010.	33
Figura 21. Modelo de curva de generación de biogás en vertederos.	36
Figura 22. Diferentes tipos de aprovechamiento del biogás en función de su grado de depuración	43

Figura 23. Esquema del proceso de combustión del biogás	44
Figura 24. Número de vertederos por tratamiento del biogás en España (2006)	45
Figura 25. Esquema del proceso de generación de energía térmica	45
Figura 26. Esquema del proceso de generación de energía eléctrica	47
Figura 27. Esquema del proceso de cogeneración	51
Figura 28. Esquema del proceso de inyección en gasoducto	53
Figura 29. Esquema del proceso de utilización en vehículos	55
Figura 30. Trazado de la red de estaciones de servicio del GasHighWay.	56
Figura 31. Esquema del proceso de pilas de combustible	57
Figura 32. Reacción química de pilas de combustible	58
Figura 33. Ubicación de plantas que utilizan pilas de combustible	59
Figura 34. Producción de biogás en vertederos	61
Figura 35. Esquema de un biorreactor activable.	62
Figura 36. Resumen encuestas recibidas (1ª tanda)	76
Figura 37. Resumen encuestas recibidas (Vertederos que captan biogás)	77
Figura 38. Resumen encuestas recibidas (2ª tanda)	77
Figura 39. Número de vertederos.	79
Figura 40. Forma de disponer los residuos	79
Figura 41. Aprovechamiento energético de biogás en vertederos	80
Figura 42. Esquema del proceso DAFO	92
Figura 43. Esquema del proceso de generación de energía eléctrica	100
Figura 44. Esquema del proceso MICROPHILOX	101
Figura 45. Escenario base	104
Figura 46. Escenario de proyecto	104
Figura 47. Esquema del proceso de cogeneración	105
Figura 48. Esquema del proceso de inyección en gasoducto	108
Figura 49. Esquema del sistema de generación de energía basado en pilas de combustible	111
Figura 50. Esquema del proceso de pilas de combustible	112
Figura 51. Etapas de tratamiento del biogás para su utilización en pilas de combustible	112

10. Índice de tablas



10. Índice de tablas

Tabla 1.	Emisiones de metano en la categoría 6A. Fuente: EEA, 2009 (originalmente de IPCC)	19
Tabla 2.	Variación de las emisiones de CH ₄ y residuos biodegradables depositados en vertedero entre 1990 y 2007 en los 27 Estados miembros. Fuente: Agencia Ambiental Europea EEA, 2009.	20
Tabla 3.	Inventario de emisiones de GEI – Año 2011 (MARM)	23
Tabla 4.	Cambios en el destino de los residuos en Italia.	30
Tabla 5.	Emisiones históricas y estimaciones de emisión de CH ₄ en vertederos Italianos. Fuente: Italian report on demonstrable progress under article 3.2 of the Kyoto Protocol	30
Tabla 6.	Resumen de las principales fuentes de emisión en Inglaterra en 2008. Fuente: Greenhouse Gas Inventories for England, Scotland, Wales and Northern Ireland: 1990 – 2008 Report –AEA.	31
Tabla 7.	Sustancias contaminantes en el biogás y sus efectos	42
Tabla 8.	Nivel de tipo de tratamiento del biogás según su uso final	42
Tabla 9.	Algunas referencias de plantas que generan biogás para combustible de vehículos en Suecia	56
Tabla 10.	Tolerancia de los distintos tipos de pilas de combustible a diferentes compuestos. *	58
Tabla 11.	Listado de municipios con menos de 50.000 habitantes.	71
Tabla 12.	Listado de municipios con más de 50.000 habitantes.	74
Tabla 13.	Listado de vertederos que captan biogás. Fuente: MARM.	75
Tabla 14.	Tabla – resumen encuestas municipios grandes	85
Tabla 15.	Tabla – resumen encuestas Municipios medianos	87
Tabla 16.	Tabla – resumen encuestas Vertederos que captan biogás	88
Tabla 17.	Tecnologías utilizadas para la valorización del biogás (IDEA)	107
Tabla 18.	Ventajas y desventajas de los sistemas de enriquecimiento de biogás	109
Tabla 19.	Características de los distintos tipos de pilas de combustible	111
Tabla 20.	Proyectos del Plan Nacional de I+D	113
Tabla 21.	Análisis multicriterio de las alternativas planteadas	115

Red Española de Ciudades por el Clima
Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP)

Área de Acción Territorial y

Desarrollo Sostenible

Calle Nuncio, 8

Tel.: 91 364 37 00 – Fax: 91 365 54 82

red.clima@femp.es

www.femp.es

www.redciudadesclima.es

www.marm.es

