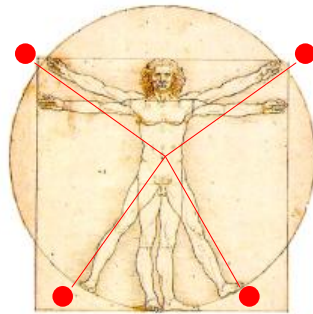


TECNOLOGÍ@ y *DESARROLLO*

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIII. AÑO 2015

SEPARATA



PRODUCCIÓN Y CAPTACIÓN DE BIOGÁS EN VERTEDERO PARA SU EMPLEO EN USOS NO CONVENCIONALES

**Juan José Graña Magariños, Cristina de la Macorra García, Pedro
Rincón Arévalo**



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Juan José Graña Magariños, Cristina de la Macorra García; Pedro Rincón Arévalo.
Abril, 2015.

<http://www.uax.es/publicacion/produccion-y-captacion-de-biogas-para-su-empleo-en-usos-no-convencionales.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

PRODUCCIÓN Y CAPTACIÓN DE BIOGÁS EN VERTEDERO PARA SU EMPLEO EN USOS NO CONVENCIONALES

Graña Magariños J.J (a); de la Macorra García, C. (b); Rincón Arévalo, P. (c)

- (a) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Licenciado en Ciencias Ambientales, Arquitecto Técnico Masters Oficiales en EERR, PRL y SSTPRL. Universidad Alfonso X “El Sabio”, Escuela Politécnica Superior Tlf: 686870321, e-Mail: juanosegm81@gmail.com
- (b) Dra. Europea en Ciencias Químicas. Area Industrial y Medio Ambiente. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X “El Sabio”.
- (c) Dr Ingeniero Industrial. Research and Development Manager. Tomsa Destil, S.L.

RESUMEN:

Este artículo resume de manera breve la tecnología de producción de biogás en vertederos de RSU. Para ello, se describen en primer lugar los factores de los que depende su producción. A continuación se plantea y explica de manera simplificada el modelo de producción propuesto. El software creado para tal fin recibe el nombre de GENBIVER (Generación de Biogás en Vertedero), y de él se explican las bases de cálculo adoptadas, sus distintas variables de entrada y se realizan dos modelizaciones a modo de ejemplo. La primera de ellas en un vertedero de gran tamaño y la segunda en uno de tamaño reducido. Finalmente se comprueba el grado de fiabilidad obtenida en las modelizaciones, comprobando los resultados obtenidos con los proporcionados por las compañías gestoras. Después, para el biogás producido se plantean y explican posibles usos no convencionales como son la inyección a redes de gas natural, su empleo como combustible para vehículos, y su uso en pilas de combustible, centrándome en las de Carbonatos Fundidos (MCFC) y las de Óxidos Sólidos (SOFC). Para finalizar se resume la situación del sector en España, instalaciones destacadas, destino final del biogás obtenido, etc.

PALABRAS CLAVE: biogás, vertedero, RSU, SOFC, MCFC, gas natural, pila de combustible.

ABSTRACT:

This article briefly summarizes the production biogas technology in MSW landfills. To do this, first the factors that influence its production are described. Below is stated and explained in a simplified manner the production model developed. The software created for this purpose is called GENBIVER (Landfill Biogas Generation). Their calculation bases adopted, their different input variables are explained. Besides the software developed is used in two different examples. The first one on a large landfill and the second one on a landfill of reduced size. Finally, the degree of reliability in the model obtained is checked. To do this, the results provided by the managing company are compared with the results of GENBIVER. After, this biogas produced is proposed for possible unconventional uses such as injection of natural gas grids, its use as a fuel for vehicles and its use in fuel cells, focusing on Molten Carbonate (MCFC) and Solid Oxide (SOFC). Finally, the situation of the sector in Spain, major plants, final destination of biogas obtained, etc. is summarized.

KEY-WORDS: biogas, landfill, MSW, SOFC, MCFC, natural gas, fuel cells.

SUMARIO: 1. Introducción 2. La producción de Biogás en Vertedero 3. Las Aplicaciones No Convencionales del Biogás 4. Situación actual y perspectivas futuras sobre el Sector del Biogás 5. Referencias

SUMMARY: 1. Introduction 2. The Biogas production in Landfill 3. Unconventional Biogas Applications 4. Current status and future perspectives about Biogas Sector 5. References

1. Introducción

En la sociedad actual, con unas demandas energéticas crecientes día a día, se hace necesario alcanzar una mayor sostenibilidad de los recursos existentes. Como consecuencia del desarrollo de las actividades cotidianas humanas se genera la denominada biomasa residual. Existen diferentes tipos de esta biomasa que son susceptibles de ser sometidas al proceso de digestión anaerobia, tal es el caso de los residuos ganaderos, los residuos agroindustriales que tengan un importante contenido de humedad, los lodos de EDAR y los RSU. El proceso de degradación anaerobia de este último tipo de biomasa se denomina “biometanización” y el biogás obtenido como consecuencia del mismo producido en un vertedero se denomina “gas de vertedero”.

El término biogás se refiere a una mezcla de gases que se producen durante el proceso de descomposición de la materia orgánica en la que intervienen una serie de microorganismos. El biogás está constituido fundamentalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), mezclado en menor proporción con otros gases. Su composición, de estos y otros gases, depende de la biomasa de partida a parte de otros factores. Este artículo se centra únicamente en el biogás producido en vertederos, es decir, producido a través de biodigestión natural y no el producido en digestores ubicados instalaciones industriales.

El “gas de vertedero” al estar formado principalmente por metano y dióxido de carbono es necesario tratarlo para reducir el impacto ambiental, de ahí que sea necesario su eliminación en antorcha, o bien realizar algún tipo de aprovechamiento energético para garantizar en todo momento la eliminación de dioxinas, ya que su emisión a la atmósfera ocasionaría graves problemas medioambientales.

En la siguiente tabla aparece su composición típica:

	CH_4	CO_2	H_2O	H_2	SH_2	NH_3	CO	N_2	O_2	Otros
(%)	45-60	40-60	Saturado	0-0,2	0-1	0,1-1	0-0,2	0-1	0-1	Trazas

Tabla 1.1.: Composición Química del “Gas de Vertedero”. Fuente: elaborada a partir de referencias [1].

El Poder Calorífico Inferior del “gas de vertedero” se sitúa en torno a 4200 Kcal/Nm^3 aproximadamente.

2. La producción de Biogás en Vertedero

Los vertederos son aquellos lugares en los que se produce el depósito y el almacenamiento de los residuos que carecen de valorización o porque no hay una instalación de selección de compuestos que minimice las cantidades enviadas a él.

En su interior se producen reacciones anaeróbicas, de tal manera que la fracción orgánica de dichos residuos se degrada (en mayor o menor medida, con mayor o menor rapidez) generando “gas de vertedero”, que debe ser recogido y almacenado para su posterior uso energético. En el caso que no se aproveche debe ser quemado en una antorcha, ya que es más recomendable la pérdida energética que puede ocasionar que su liberación. Esto se debe al tiempo de permanencia de la molécula de metano frente a la de dióxido de carbono en la atmósfera.

2.1. Factores que influyen en la generación de Biogás en Vertederos de RSU

Los principales factores que influyen en la generación de biogás en un vertedero son: la cantidad y composición de los RSU vertidos en la instalación, las variables ambientales de la instalación (fundamentalmente la temperatura media donde esta se ubica y el nivel medio de

precipitaciones), la tipología y características de la instalación, los tratamientos a los que se somete a los RSU en la instalación, los sistemas de captación empleados y otros factores.

2.1.1.- Cantidades de Residuos Vertidos y Tipología

Una de las variables más importantes en la formación de biogás es la cantidad de residuos vertidos en la instalación. Esto es debido a que el volumen de biogás producido depende directamente de la cantidad de materia orgánica presente en vertedero y cuanta más cantidad de residuos vertidos en vertedero mayor cantidad de materia orgánica. Debido a esto, para realizar una correcta modelización de una instalación resulta indispensable conocer las cantidades (en toneladas, por ejemplo) de los residuos vertidos en vertedero desde su apertura hasta su cierre y separados por tipologías.

En el modelo planteado en este artículo se han considerado cuatro tipologías de residuos: Urbanos Asimilables a Urbanos, Rechazo de Compostaje, Lodos de EDAR y Otros [No Inertes]. Todas estas categorías se cuantifican en toneladas. Dentro de los residuos Urbanos Asimilables a Urbanos es necesario conocer la composición media de los residuos para así poder separar la Fracción de Rápida Degradabilidad de la Fracción de Lenta Degradabilidad. Para ello, es necesario conocer el porcentaje de los diferentes constituyentes de los residuos, es decir, materia orgánica, papel y cartón, plástico, textil, metal, vidrio y otros.

Si no se conociesen las cantidades vertidas es necesario realizar una hipótesis de vertido. Para ello se analizará la demografía de la zona de la cual depende el vertedero, teniendo en cuenta la variación estacional de la población.

Para modelizar adecuadamente el comportamiento del vertedero como reactor anaeróbico es necesario realizar una simplificación en la tipología de los residuos. Así, toda materia orgánica se englobará en la Fracción de Rápida Degradabilidad o bien en la Fracción de Lenta Degradabilidad. A modo de ejemplo, los restos de comida, los residuos generados en las podas de jardines, los lodos de EDAR y en general todos aquellos residuos orgánicos con un alto contenido en humedad se englobarán en la Fracción de Rápida Degradabilidad. Por el contrario, aquellos residuos orgánicos con un contenido de humedad bajo se englobarán en la Fracción de Lenta Degradabilidad. En esta fracción tenemos por ejemplo los restos de papel, cartón, madera y aquellos otros residuos orgánicos con un contenido de humedad bajo. Los residuos englobados en esta categoría tienen un ritmo de producción de metano mucho más lento que los residuos de rápida degradabilidad.

Los restos no orgánicos, como pueden ser los residuos textiles, vidrios, plásticos, metales, etc. carecen de interés de cara a este estudio con lo que no serán tenidos en cuenta en el modelo de producción de biogás en vertedero de RSU planteado a continuación.

2.1.2.- Variables Ambientales: la Temperatura y Precipitación medias de la instalación

Las variables ambientales, fundamentalmente la temperatura media y el índice medio de precipitaciones de la zona donde se ubica el vertedero tienen también importancia capital en la producción de biogás en un vertedero.

Como se puede constatar en la numerosa bibliografía que hay sobre esta temática, el mayor contenido de humedad en los residuos afecta positivamente en la generación de biogás. Además, los vertederos ubicados en zonas húmedas producen un mayor volumen de biogás durante su periodo operativo que los ubicados en zonas secas. Pero hay que tener en cuenta que los vertederos ubicados en zonas húmedas dejan de producir biogás antes que los vertederos situados en zonas secas, donde la producción de biogás se sostiene más en el tiempo.

La cantidad de agua presente en los residuos depositados en vertedero es variable dependiendo fundamentalmente de la tipología de los residuos de que se trate, de la época del año en que se realice la recogida y del sistema de gestión empleado. Los RSU depositados en vertedero con un mayor contenido en humedad son los lodos de EDAR, los restos de comida y los restos de podas, por este orden. Según la bibliografía consultada, el contenido de agua presente en los residuos oscila entre un 25% y un 60% del peso del residuo ^[2]. Así pues un contenido de humedad situado en un 38% puede considerarse adecuado para el modelo.

La temperatura media de la zona donde se ubica el vertedero también es una variable importante en la generación de biogás. Su importancia radica en que esta tiene que estar dentro de los rangos aptos para las bacterias mesófilas y termófilas que actúan en el proceso. Hay que tener en cuenta que la temperatura de los residuos en el vertedero se debe encontrar entre los 10°C y los 60°C, por fuera de este rango las bacterias que influyen en el proceso de generación de metano en el vertedero se encuentran fuera de su óptimo y la producción de metano decae rápidamente. En concreto, para un adecuado desarrollo de las bacterias mesófilas la temperatura debe estar comprendida entre 20°C y 45°C, mientras que para las bacterias termófilas la temperatura debe estar comprendida entre 45°C y 75°C ^[3]. Las temperaturas habituales en el interior de un vertedero están comprendidas normalmente entre 20°C a 50°C ^[4, 5 y 6].

2.1.3.- Tipología y Características de la instalación

En cuanto a la generación de biogás, la relación entre la superficie ocupada por el vertedero y su volumen es una variable importante. Si esta relación es baja se favorece la generación de biogás debido a que se mejora el aislamiento térmico de los residuos del ambiente exterior, y además se facilitan las labores de captación del biogás. Existen relaciones bajas entre superficie y volumen en instalaciones que se construyen en valles o depresiones naturales del terreno.

En el caso opuesto se tienen aquellos vertederos donde la relación entre la superficie ocupada y su volumen es alta. En este caso, los residuos depositados en vertedero ya no están tan bien aislados del ambiente exterior estando estos más expuestos a las condiciones climáticas. La captación del biogás también se complica exigiendo un mayor coste para su sistema de extracción. Este caso se da en vertederos construidos en zonas llanas del terreno donde los residuos depositados se encuentran a cotas superiores a la cota del terreno natural.

Hay que tener en cuenta cuando se planifica un vertedero que las condiciones climáticas afectan hasta una profundidad de residuo que ronda los 10 metros, siendo esta zona afectada por la temperatura ambiente. Cuando esta es lo suficientemente baja puede hacer que la temperatura del residuo descienda por debajo del rango mesófilo ^[3].

Normalmente, en los vertederos de la primera tipología, los residuos depositados en los primeros 10 metros se encuentran en el rango mesófilo mientras que a partir de esa profundidad se encuentra en rango termófilo ^[7].

2.1.4.- Tratamientos de los RSU en la instalación

Dentro de esta categoría se incluyen aquellas técnicas que se aplican a los residuos en la instalación. En primer lugar, al llegar el residuo al vertedero lo primero que afecta a la producción de biogás es la disposición del RSU en el vertedero. Actualmente, dependiendo de la orografía de la instalación, en los vertederos controlados se pueden encontrar fundamentalmente tres técnicas de vertido: la trinchera, el relleno por área y el relleno por celda.

En la primera de ellas, los residuos se vierten en zanjas abiertas previamente y el material extraído se empleará como relleno. Esta técnica se suele emplear en vertederos asentados en

terrenos llanos. En el relleno por área, los RSU se disponen en capas sobre el terreno natural. Esta técnica se suele emplear en vertederos con relaciones bajas entre superficie y volumen, es decir, en instalaciones que se construyen en valles o depresiones naturales del terreno. Por último, el caso de relleno por celda es similar al anterior pero los RSU se encuentran delimitados lateralmente por diques de tierra. Esta técnica es válida para ambas tipologías de vertederos explicadas anteriormente.

La compactación de los residuos es otra variable que afecta a la producción de biogás en vertedero. A mayor compactación mayor producción de biogás. Esta relación se mantiene hasta que se llega a un valor de compactación en el que la reducción de humedad en el residuo que provoca esta causa una reducción en la producción de biogás. Los RSU tienen una densidad media sin compactar que ronda los 130-190 kg/m³. En la recogida, los camiones compactadores aumentan esta densidad hasta los 220-380 kg/m³ y en el vertedero, los residuos sin apenas compactación alcanzan densidades comprendidas entre los 320-460 kg/m³. Los valores adecuados de compactación en un vertedero deberían estar comprendidos entre los 320-650 kg/m³. Para ello es necesario emplear diferentes tipos de maquinaria de compactación que a través de su peso y de diferentes pasadas logran aumentar la densidad del residuo. Por último, para lograr una adecuada compactación es necesario además tener en cuenta que los residuos deben ser vertidos en capas de menos de 50 cm de grosor, garantizando de este modo que con repetidas pasadas de la maquinaria (entre 2 y 5) se alcancen los valores de densidad buscados.

La trituración de los residuos también es otra variable importante en la producción de biogás. Esta se consigue mediante el empleo de maquinaria equipada con cadenas o ruedas con elementos metálicos. Se recomienda que la maquinaria actúe en pendiente para facilitar el desgarrar y troceo de los residuos con los elementos metálicos de que dispone para tal fin. Una mayor trituración de los residuos aumenta la producción de biogás en vertedero debido a que se incrementa la superficie de los mismos a la actividad bacteriana ^[3 y 6].

2.1.5.- Otros factores que influyen en la producción de Biogás

Además de los factores comentados anteriormente, existen sustancias que favorecen la actividad metanogénica y otros elementos que dificultan dicha actividad. La actividad metanogénica de las bacterias que producen biogás en el vertedero exige de una serie de nutrientes. Alguno de los más importantes son el potasio, magnesio, calcio, azufre, hierro, nitrógeno, fósforo, etc. De todos estos nutrientes, el que tiene más peligro de escasear es el fósforo por lo que tendrá que ser estudiado para comprobar periódicamente que no existen zonas del vertedero en valores límite o inferiores.

Además de los nutrientes, existen otras sustancias que si se encuentran en el vertedero dificultan la actividad metanogénica de las bacterias. Estas sustancias se conocen con el nombre de inhibidores. Los más importantes son los metales pesados, sulfuros, algunas sales, etc. ^[3 y 6].

2.1.6.- Los Sistemas de Captación de Biogás

Los sistemas de captación de biogás son muy importantes en la producción de este gas debido a que hay que distinguir entre la cantidad de biogás generado real en la instalación y el caudal realmente recuperado por el sistema de extracción. Esta tasa de recuperación depende fundamentalmente de la eficiencia del sistema de extracción del biogás instalado en el vertedero y del nivel de impermeabilización que tiene el material de cobertura y de sellado de la instalación.

En cuanto a la cobertura hay que distinguir dos tipos: el recubrimiento diario y el sellado definitivo. Respecto al primero, su función principal es evitar el contacto de los residuos con

el aire, impedir el vuelo de los residuos y permitir el movimiento de los vehículos por su superficie. Además, reduce el riesgo de incendios y la entrada del agua de lluvia al cuerpo de vertido. Para la obtención de biogás es necesario el recubrimiento diario de los residuos y este deberá tener el grosor necesario para evitar que los residuos se vean influenciados por el ambiente exterior. También debe evitar la penetración del aire hacia el interior de la masa de residuos permitiendo así que estos estén en condiciones anaerobias.

La cobertura definitiva tiene gran importancia en la producción de biogás en el vertedero debido a que esta tiene que garantizar un adecuado nivel de impermeabilización tanto para evitar que el biogás pueda escapar al exterior como para evitar el acceso del agua hacia el interior del vertedero.

Por otra parte, el objetivo del sistema de gestión y manipulación de biogás es la captación del mismo generado en el interior de la masa de residuos, su acondicionamiento y su conducción hasta el punto final de uso o de tratamiento. Para ello, este sistema debe garantizar la no entrada de aire por las sondas de extracción debido que este actúa negativamente en la producción de biogás alterando las condiciones anaerobias de la zona. Sus principales componentes son ^[8]:

Pozos de extracción: se pueden y deben emplear en vertederos de nueva construcción como en los ya existentes en explotación. La ubicación de los mismos debe cumplir el siguiente esquema:

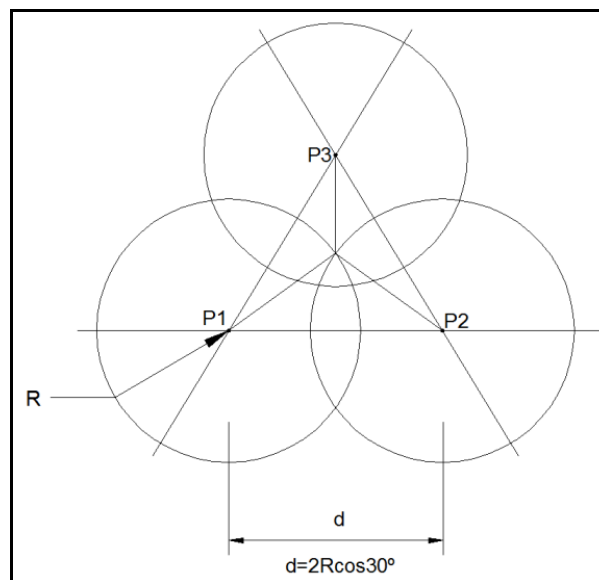


Figura 2.1.: Distancia entre Pozos de Extracción. Fuente: elaborada a partir de referencia [8].

Colectores y conductos: estos pueden ser aéreos o enterrados. En las siguientes tablas podemos ver las ventajas e inconvenientes para cada uno de ellos:

Colectores y Conductos Aéreos	
Ventajas	Inconvenientes
Control visual	Impacto visual
Adaptabilidad al terreno	Afección a elementos externos
Eliminación de condensados	

Tabla 2.1.: Ventajas e inconvenientes de los Colectores y Conductos Aéreos. Fuente: elaboración propia.

Colectores y Conductos Enterrados	
Ventajas	Inconvenientes
Protección de la tubería	Evacuación de condensados más complicada
Menor generación de condensados	Asentamientos diferenciales del terreno
Impacto visual reducido	

Tabla 2.2.: Ventajas e inconvenientes de los Colectores y Conductos Enterrados. *Fuente: elaboración propia.*

En los vertederos, la configuración que pueden presentar estas redes de colectores o conductos se pueden ver en los siguientes esquemas:

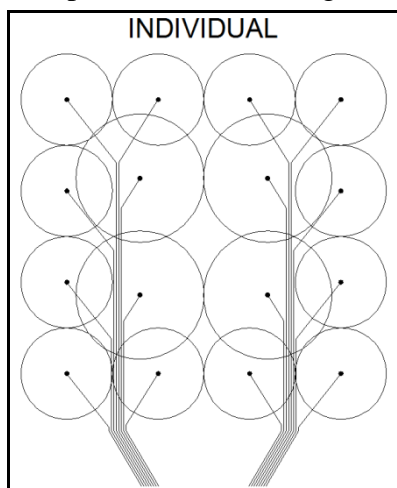


Figura 2.2.: Esquema de Colector Individual. *Fuente: elaboración propia.*

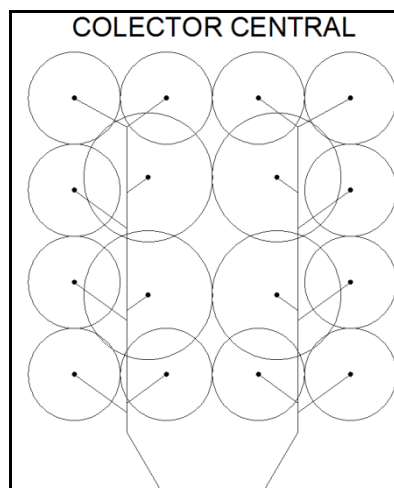


Figura 2.3.: Esquema de Colector Central. *Fuente: elaboración propia.*

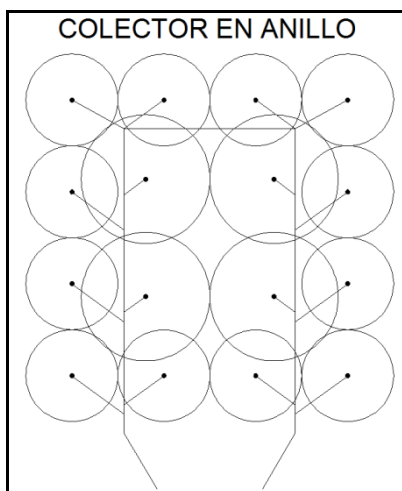


Figura 2.4.: Esquema de Colector en Anillo. *Fuente: elaboración propia.*

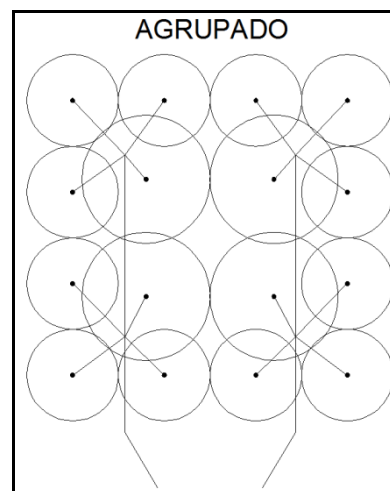


Figura 2.5.: Esquema de Colector Agrupado. *Fuente: elaboración propia.*

Sistemas de aspiración e impulsión del biogás: estos sistemas están compuestos fundamentalmente por soplantes y por otros elementos. Los soplantes pueden ser:

- Centrífugos
- Émbolos rotativos
- Otros (ventiladores, canal lateral, etc.)

Y dentro de los otros elementos podemos encontrar por ejemplo: filtros cortallamas, filtros de partículas, motores de los soplantes, variadores de frecuencia, etc.

Sistemas de acondicionamiento del biogás: para realizar el acondicionamiento del biogás es necesario eliminar principalmente las partículas, la humedad y los compuestos químicos que contiene. Algunos métodos utilizados para eliminar los componentes anteriores serían:

- Partículas: se usan separadores centrífugos, o bien, filtros de partículas.
- Humedad: se puede eliminar mediante métodos de absorción (silica, alumina, glicol, etc.), o bien, mediante equipos de frío + intercambiadores.
- Compuestos químicos: por ejemplo para eliminar los siloxanos se podría emplear carbón activo, silica gel, o bien, procedimientos de absorción líquida o refrigeración/enfriamiento. En cuando al H₂S se podría eliminar por lavado químico.

Elementos de medición y regulación: algunos de los elementos utilizados en los vertederos para realizar estas labores serían las válvulas (corte, regulación, seguridad, etc.), sondas de temperatura, medidores de presión, caudalímetros (máscico, de presión diferencial, etc.). A parte de todo lo anterior, en los vertederos es necesario medir también la composición del biogás obtenido (cantidad en % de metano y otros gases). Dichas mediciones pueden ser realizadas mediante el empleo de equipos fijos o portátiles, y a la entrada de cada línea de biogás tiene que existir una central de regulación y medida que obtenga los datos anteriormente comentados.

Sistemas de control: actualmente el control y la gestión de datos/parámetros del vertedero se realiza mediante el uso de herramientas informáticas.

Antorchas: es un dispositivo de seguridad y de protección medioambiental. Las condiciones de combustión que deben cumplir son que la temperatura sea de 900°C y el tiempo de retención sea superior a los 0,3 segundos. Existen dos tipos de antorchas:

- Llama abierta: el quemador se encuentra tras una visera. La llama se encuentra a la vista. La ventaja principal es que son económicas aunque es difícil tener control sobre la combustión.
- Cámara cerrada: el quemador se encuentra dentro de una cámara de combustión de acero recubierta por un material refractario. La ventaja principal que presenta este tipo con respecto a la anterior es que se puede controlar la combustión (tanto temperatura como el tiempo de retención). Además, estas antorchas poseen llama piloto y sistemas de seguridad como el control de vigilancia de llama y encendido.

Gasómetros: son sistemas de almacenamiento de biogás previo a su utilización. El tipo de gasómetro más habitual es el de membranas plásticas. Este posee una doble membrana. La lámina exterior está formada por un material resistente a las condiciones climatológicas (PVC) y la lámina interior es la que se encuentra en contacto con el biogás (polietileno). Este gasómetro posee una cámara de aire que es controlada mediante un soplante. El esquema del mismo se puede ver a continuación:

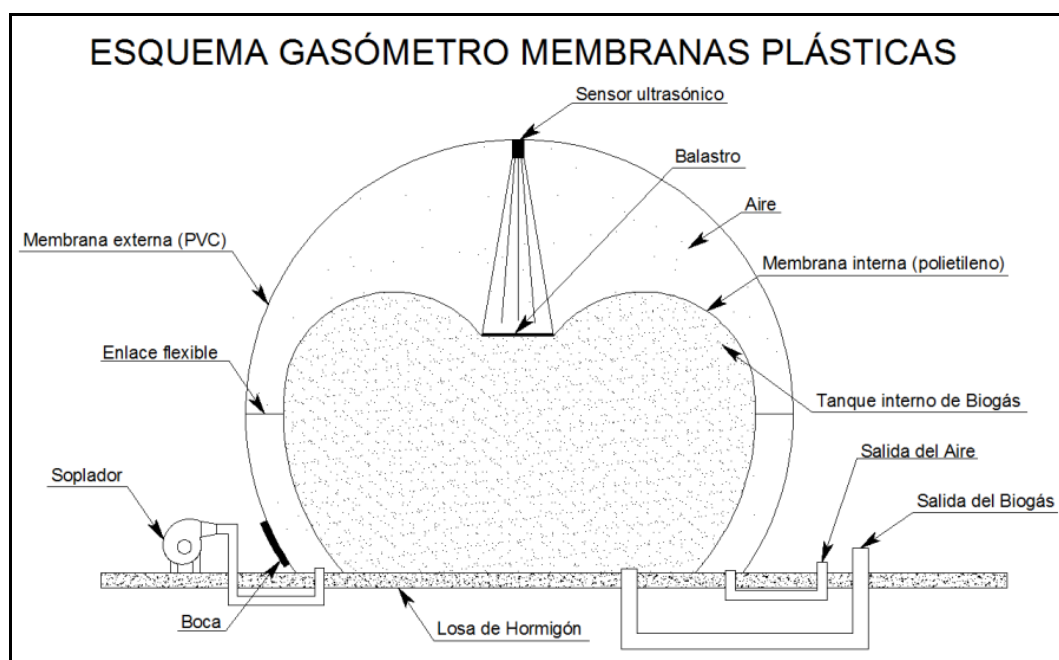


Figura 2.6.: Esquema de un Gasómetro de Membranas Plásticas. Fuente: elaborada a partir de referencia [8].

2.2.- GENBIVER – Modelo de Producción de Biogás para Vertederos de RSU

2.2.1.- Introducción

En este apartado del artículo se va a explicar brevemente el proceso seguido para la creación de un modelo de producción de biogás propio para vertederos de RSU. Para ello se parte de las variables principales de las que depende la producción del biogás expuestas anteriormente.

El programa creado recibe en nombre de GENBIVER. Este modeliza la generación de biogás en un vertedero controlado de RSU, calculando el volumen de biogás generado a partir de las variables anteriores. El programa informático determina en primer lugar el volumen teórico de biogás que produce la degradación anaerobia para a continuación aplicar un proceso de cálculo para el caudal recuperado anualmente de biogás en un vertedero, desde su inauguración hasta su clausura.

Este software está dividido en tres pantallas de introducción de datos y una cuarta en la cual se muestran los resultados obtenidos como consecuencia de la aplicación del modelo de producción planteado. Las pantallas de introducción de datos al programa se describen con mayor detalle en los apartados siguientes.

2.2.2.- Datos de Identificación de la Instalación y Bases de Cálculo

En este apartado se van a establecer las bases de partida que adopta GENBIVER para determinar la cantidad de biogás que produce la degradación anaerobia de la materia orgánica en un vertedero de RSU.

Este programa calcula la producción teórica de metano según la Demanda Química de Oxígeno, sabiendo que la materia orgánica se transforma mediante la degradación anaeróbica en metano (CH_4) y otros gases como el dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N), etc. Este software parte de una producción de metano por kg de DQO de materia orgánica es $0,35 \text{ m}^3\text{N}$. Esta es la producción máxima suponiendo una oxidación total de los residuos, algo que no ocurre en los vertederos debido al ineficiente funcionamiento del mismo como digestor anaerobio o debido a que parte de los residuos vertidos no son degradables biológicamente.

Además, hay que tener en cuenta que los RSU solo contienen un cierto porcentaje de materia orgánica biodegradable anaeróbicamente.

La primera pantalla de introducción de datos del software GENBIVER se muestra en la captura de pantalla siguiente. En ella se nos pide que introduzcamos los datos más destacados de la instalación a modelizar. Estos están divididos por apartados y son los siguientes:

- 1) Identificación de la Instalación: en este apartado se nos pide el nombre de la instalación, el titular de la instalación y el CIF del titular de la misma.
- 2) Localización de la Instalación: el software nos solicita la dirección de la instalación, el municipio en el que está situada, así como su Código Postal y Provincia.
- 3) Coordenadas Geográficas del Punto de Referencia de la Instalación: en este apartado se nos solicita el Huso UTM, las Coordenadas X e Y en metros así como la altitud sobre el nivel del mar a la que está situada la instalación.
- 4) Características Generales de la Instalación: en este apartado se nos piden una serie de características del vertedero como la capacidad del mismo en toneladas, la cantidad media diaria de residuos recibida en toneladas/día así como la clase a la que pertenece según el Artículo 4 del Real Decreto 1481/2001, es decir, si el vertedero es de residuos inertes, de residuos no peligrosos o de residuos peligrosos.
- 5) Datos de Contacto de la Instalación: en este apartado se nos solicita la fecha de cumplimentación del cuestionario, es decir, la fecha en la que se va a realizar la modelización. Además, se solicita también la persona que ha cumplimentado el cuestionario, es decir, la persona que ha manejado el software y la persona de contacto, es decir, la persona que ha proporcionado los datos necesarios para realizar la modelización, normalmente perteneciente a la instalación. Por último, se nos solicita el correo electrónico y teléfono de dicha persona.

The screenshot shows the GENBIVER 1.0 software interface. The main window is titled 'Modelo de Degradación Anaerobia en Vertedero [GENBIVER 1.0]'. The interface is divided into several sections:

- Datos de Identificación de la Instalación:** This section contains input fields for 'Nombre de la Instalación', 'Titular de la Instalación', and 'CIF del Titular de la Instalación'.
- Localización de la Instalación:** This section contains input fields for 'Dirección de la Instalación', 'Municipio', 'Código Postal', and 'Provincia'.
- Coordenadas Geográficas del Punto de Referencia de la Instalación:** This section contains input fields for 'UTM - Huso', 'Coordenadas X (en metros)', 'Coordenadas Y (en metros)', and 'Altitud de la Base Sobre el Nivel del Mar (en metros)'.
- Características Generales de la Instalación:** This section contains input fields for 'Capacidad del Vertedero (Toneladas)', 'Cantidad Media Diaria de Residuos Recibida (Toneladas/Día)', and a radio button selection for 'Clase de Vertedero Según el Artículo 4 del Real Decreto 1481/2001' (Para Residuos Inertes, Para Residuos No Peligrosos, Para Residuos Peligrosos).
- Datos de Contacto de la Instalación:** This section contains input fields for 'Fecha de Cumplimentación del Cuestionario', 'Persona que ha Cumplimentado el Cuestionario', 'Persona de Contacto', 'Correo Electrónico', and 'Teléfono'.

On the right side of the interface, there is a section titled 'Bases de Cálculo' which includes the chemical equation for the anaerobic degradation of organic matter:

$$C_xH_yO_z + \left(\frac{4x - b - 2c + 3d}{4}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{4x + b - 2c - 3d}{8}\right)CH_4 + \left(\frac{4x - b + 2c + 3d}{8}\right)CO_2 + 4xH_2$$

Below the equation, it states: 'Los coeficientes a, b, c y d dependen de la composición exacta de los residuos.' There is also a section titled 'Asunciones de Cálculo para el Volumen generado de Biogás:' with five numbered points (i-v) detailing the assumptions for biogas volume calculation.

Figura 2.7.: Paso 1º - Identificación de la Instalación y Bases de Cálculo del Software GENBIVER. Fuente: elaboración propia.

Los datos introducidos anteriormente tienen la finalidad de archivar los datos introducidos en el modelo junto con los resultados obtenidos en un informe global de la instalación.

En la segunda parte de esta pantalla se muestran las bases de cálculo que toma este software para realizar la modelización así como las asunciones tomadas en el cálculo del volumen de biogás generado.

Para validar los datos introducidos anteriormente y acceder a la segunda pantalla de cálculo de GENBIVER que se pasará a describir a continuación es necesario pulsar “siguiente”.

2.2.3.- Caudal de Biogás Recuperable

Para realizar el cálculo del biogás recuperable según el software propuesto hay que distinguir en primer lugar la composición de los RSU en dos grupos fundamentales: los residuos no biodegradables anaeróbicamente (materia inerte) de los residuos degradables anaeróbicamente (materia orgánica). En el software GENBIVER únicamente se van a considerar estos últimos.

A su vez, esta fracción el programa la divide en otras dos con el objetivo de lograr una mayor sencillez. En primer lugar tenemos la Fracción de Rápida Degradabilidad que está compuesta por restos de alimentación, podas de jardín, etc. Por otra parte tenemos la Fracción de Lenta Degradabilidad que está compuesta por papel, cartón, madera, etc. Esta división se hace debido a la diferente velocidad de degradación que poseen las diferentes tipologías de residuos. Para ello, en este programa los RSU se aglutinan en dos grandes grupos con velocidades de degradación similares. La menor velocidad de degradación de esta última fracción se debe al elevado contenido en celulosa, hemicelulosa y lignina. Hay que tener en cuenta además que la composición del sustrato no solo afecta a la velocidad de degradación sino también a la DQO.

Para realizar el cálculo del biogás recuperable es necesario introducir una serie de variables en la pantalla siguiente del software GENBIVER. Estas se pueden ver en la siguiente captura de pantalla del programa:

The screenshot shows the GENBIVER 1.0 software interface. The main title is 'Caudal de Biogás Recuperable'. The interface is split into two columns. The left column is for 'RÁPIDA DEGRADABILIDAD' and the right column is for 'LENTA DEGRADABILIDAD'. Each column contains a formula for calculating the volume of recoverable biogas (VRD and VLD) based on various input variables. The 'RÁPIDA DEGRADABILIDAD' section shows a calculated value of 110,5140855 for VRD, while the 'LENTA DEGRADABILIDAD' section shows a calculated value of 69,165278 for VLD. Both sections include a list of dependent variables with their respective values and units.

Variable	Valor	Unidad
VRD	110,5140855	Nm ³ /TRD
VLD	69,165278	Nm ³ /TLD
Q	350	Nm ³ /TQO
H	0,38	%
M	0,50	%
C	0,65	%
a	0,65	%
β	0,41	%
R	1,47	Ton. DQO/Ton. Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad
L	0,92	Ton. DQO/Ton. Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad

Figura 2.8.: Paso 2º - Caudal Recuperable de Biogás en Vertedero del Software GENBIVER. Fuente: elaboración propia.

Una vez realizada la justificación de la división de los RSU en las dos categorías que hace el software, se enumeran las variables dependientes que toma GENBIVER relacionadas con la generación de biogás en vertedero. Estas se enumeran a continuación:

- 1) Caudal de Metano Generado por Unidad de DQO: el programa parte por defecto de una producción de metano de 0,35 m³N por kg de DQO. Con ella se calcula el caudal de biogás recuperable en el vertedero tanto para la Fracción de Rápida Degradabilidad como para la Fracción de Lenta Degradabilidad. Este valor se puede sustituir por otro que crea más conveniente el usuario.

- 2) Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Rápida Degradabilidad: en el modelo planteado se supone una DQO media, por gramo de sustrato seco, para la materia orgánica de rápida degradabilidad (restos de alimentación, podas de jardín, etc.) de 1,47 gramos. Se adopta este valor debido al mayor contenido en proteínas y lípidos que contiene esta fracción.
- 3) Tonelada de DQO/Tonelada de Materia Orgánica de Lenta Degradabilidad: en el modelo planteado se supone una DQO media, por gramo de sustrato seco, para la materia orgánica de lenta degradabilidad (papel, cartón, madera, etc.) de 0,92 gramos. Esto se debe fundamentalmente al mayor contenido en celulosa que posee esta fracción.
- 4) Relación de Biodegradabilidad frente a DQO: teniendo en cuenta únicamente los parámetros anteriores, el modelo de cálculo planteado arroja un error por exceso debido a que no toda la materia orgánica químicamente lo es biológicamente. Por lo tanto es necesario estimar la cantidad de DQO que es degradable biológicamente. El software GENBIVER adopta como valor un 65% por defecto. Por supuesto, este valor es totalmente modificable por el usuario del software de manera que se pueda ajustar el modelo a sus necesidades.
- 5) Rendimiento de Mineralización: el vertedero no es un reactor anaerobio totalmente eficiente. La mineralización incompleta se debe a factores tales como el grado de trituración de las basuras, su mayor o menor compactación, la falta de agua en el vertedero, etc. En este modelo se adoptará un rendimiento de mineralización del 41% aunque este valor es totalmente ajustable por el usuario.
- 6) Contenido de Metano del Biogás: el contenido de metano del biogás que se genera en el vertedero varía en función del compuesto que se degrade. El metano que efectivamente se genera en un vertedero está entre el 40% y el 50% del biogás teórico generado ^[9, 10 y 11]. En el modelo planteado se supone una concentración de metano en el biogás recuperado del 50% en volumen de gas seco, valor habitual en los vertederos según la bibliografía.
- 7) Humedad de los Residuos Depositados en el Vertedero: los residuos depositados en los vertederos contienen una cantidad de humedad variable. Dicha cantidad depende fundamentalmente de la tipología de los residuos de que se trate, de la época del año en que se realice la recogida y del sistema de gestión empleado. En este modelo se parte por defecto de un valor estimado de 38 gramos de agua por cada 100 gramos de materia orgánica vertida. En los cálculos del modelo se debe distinguir entre la cantidad de materia orgánica húmeda vertida y la cantidad de materia orgánica seca vertida que se transforma en metano.
- 8) Rendimiento de la Captación: ningún sistema de captación actual es eficiente al 100%. Con lo cual se hace necesario suponer una determinada disminución de rendimiento. En este modelo, dicha disminución se cuantifica en un 35%, considerando así una tasa de recuperación del 65% (valor habitual en la bibliografía).

Una vez introducidos los datos anteriores para las dos fracciones en las que divide el software los residuos depositados en vertedero habría que recalcular el volumen de biogás recuperable por tonelada de residuo para la Fracción de Rápida y Lenta Degradabilidad. Para ello bastará con pulsar los dos botones de “Re-Calculación” que aparecen en la parte inferior del formulario. Una vez recalculadas ambas fracciones ya se podrá pasar al tercer formulario de GENBIVER. Este se explica a continuación.

2.2.4.- Cálculo de la Velocidad de Generación de Biogás

La velocidad de generación de biogás en un vertedero es proporcional a la velocidad a la que se produce la degradación de la materia orgánica en el mismo.

Para calcular esta es necesario definir los tiempos de degradación de los residuos en el vertedero. Esta constante va a recibir el nombre de “*d*”, y dependerá de la tipología de la tipología de residuos presente en el vertedero. Los valores empleados en el modelo planteado para esta constante (expresada en años) se pueden ver en la captura de pantalla que aparece en la figura 2.9.

La expresión siguiente define el método de cálculo que realiza GENBIVER. Este tiene en cuenta las dos fracciones de residuos comentadas anteriormente, además de dos modelos de degradación diferentes, uno para vertedero seco y otro para vertedero húmedo. La expresión obtenida se puede ver a continuación:

$$Q(t) = \left[Z \cdot X \cdot \left(e^{1/d_{xs}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{xs}} + W \cdot Y \cdot \left(e^{1/d_{ys}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{ys}} \right] \cdot PVS \\ + \left[Z \cdot X \cdot \left(e^{1/d_{xh}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{xh}} + W \cdot Y \cdot \left(e^{1/d_{yh}} - 1 \right) \cdot e^{-t/d_{yh}} \right] \cdot PVH \quad [Ec.2.1.]$$

donde:

- $Q(t)$ → Caudal de biogás obtenido expresado en m³N/t.
- t → Año sobre el que se presente calcular la producción de biogás.
- d_{xs} → Tiempo de degradación seco para la Fracción de Rápida Degradabilidad (años).
- d_{ys} → Tiempo de degradación seco para la Fracción de Lenta Degradabilidad (años).
- d_{xh} → Tiempo de degradación húmedo para la F. de Rápida Degradabilidad (años).
- d_{yh} → Tiempo de degradación húmedo para la F. de Lenta Degradabilidad (años).
- X → Tanto por uno de la Fracción de Rápida Degradabilidad.
- Y → Tanto por uno de la Fracción de Lenta Degradabilidad.
- PVS → Tanto por uno de la producción de biogás debida al modelo en seco.
- PVH → Tanto por uno de la producción de biogás debida al modelo en húmedo.

Así, la variable principal a tener en cuenta para determinar el peso del modelo en seco y del modelo en húmedo de generación de biogás es la precipitación media donde se ubica el vertedero. En función de dicha precipitación media de la zona se dará más peso al modelo de vertedero húmedo que al seco y viceversa.

Otra variable importante que tiene este programa en cuenta es la ubicación del vertedero. Es necesario tener en cuenta esta variable debido a que se ha corroborado al aplicar el modelo a diferentes instalaciones, que existen vertederos que a pesar de estar situados en una zona sensiblemente húmeda o seca, este se comporta más como un vertedero de una tipología diferente. Es decir, existen vertederos ubicados en zonas húmedas que se comportan más como vertederos secos y por el contrario, existen vertederos ubicados en zonas secas que se comportan más como vertederos húmedos. En estos casos me refiero únicamente al comportamiento primario de la instalación dado que estas instalaciones no se comportarán de ningún modo como un vertedero perfecto de estas dos tipologías.

También se tendrán en cuenta otros factores secundarios como puede ser temperatura media de la zona, etc. Para controlar el peso que se le da al modelo en húmedo y en seco para una determinada instalación existen dos variables que se pueden ver en la figura 2.9. Estas son las pluviometrías máximas en la que una instalación se comporta como un vertedero en húmedo y en seco. Dependen de las variables expuestas anteriormente. Por defecto adoptan los valores que se pueden ver en dicha figura.

Por último, con el fin de obtener la producción total de biogás en un vertedero, es necesario modelizar este como un conjunto de capas de residuos de distinta antigüedad

vertidas unas sobre otras de manera superpuesta. Con lo cual, para obtener la producción de biogás en un determinado vertedero para un año “t” es necesario calcular la producción de biogás en cada una de las capas presentes en el vertedero teniendo en cuenta las distintas características que estas presentan (antigüedad, cantidad de residuos vertidos, etc.), ya que el gas que se genera en una de las capas se mezcla con el generado en otras capas. El biogás proveniente de cada una de las capas se sumará y posteriormente puede ser captado por alguno de los métodos existentes o ser vertido directamente a la atmósfera.

Para calcular la velocidad de generación de biogás en un vertedero, GENBIVER, en la pantalla siguiente muestra el modelo cinético de primer orden empleado en los cálculos. El modelo empleado depende de los cálculos comentados en los pasos anteriores. Además, para realizar la modelización de una instalación se necesitan aportar los siguientes datos adicionales:

- 1) Fecha de Apertura de la Instalación: es necesario conocer el año en el cual se comienzan a verter residuos en la instalación.
- 2) Fecha de Cierre de la Instalación: se necesita conocer el año en el que cesan los vertidos de RSU en el vertedero.
- 3) Años a Modelizar desde el Cierre de la Instalación: por defecto se consideran 25 años, dado que es un tiempo más que suficiente para tener en cuenta la mayor cantidad de biogás que se genera en esta una vez que se ha cerrado. Hay que tener en cuenta que el vertedero seguirá generando biogás muchos más años (incluso más de 100 años después del cierre de la instalación) pero este será en cantidad demasiado reducida para que pueda ser tenida en cuenta de cara a un posible aprovechamiento comercial.
- 4) Fracción de RSU de Rápida Degradabilidad: que tanto por uno de residuos de rápida degradabilidad contienen los RSU vertidos en el vertedero. En este modelo se supone por defecto que la Fracción de Rápida Degradabilidad representa el 50% del total de los RSU depositados en vertedero (restos de alimentación, jardín, etc.).
- 5) Fracción de RSU de Lenta Degradabilidad: que tanto por uno de residuos de lenta degradabilidad contienen los RSU vertidos en el vertedero. En este modelo se supone por defecto que la Fracción de Lenta Degradabilidad representa el 25% del total de los RSU depositados en vertedero (papel, cartón, etc.).

The screenshot shows the GENBIVER 1.0 software interface. The main window is titled 'Cálculo de la Velocidad de Generación de Biogás en un Vertedero'. It contains several sections:

- Residuos Depositados en el Vertedero Según Tipologías y Años:** A table with columns for 'Vertederos Húmedos' and 'Vertederos Secos'. Input fields for 'Fracción de Rápida Degradabilidad' (1 and 6) and 'Fracción de Lenta Degradabilidad' (15 and 25) are present.
- Límites Pluviométricos Empleados en el Modelo (mm):** Input fields for 'Pluviometría Máxima' (200) and 'Pluviometría Mínima' (2500).
- Módulo Cinético de Primer Orden Empleados en la Modelización:** A mathematical equation: $Q(t) = 110,5140255 X \cdot (e^{1/45t} - 1) \cdot e^{-1/45t} + 69,165279 \cdot Y \cdot (e^{1/45t} - 1) \cdot e^{-1/45t}$.
- Información de Partida para la Realización del Modelo del Vertedero:** Input fields for 'Fecha de Apertura de la Instalación' (1992), 'Pluviometría Media Anual de la Instalación' (1500), 'Fecha de Cierre de la Instalación' (2011), 'Años a Modelizar desde el Cierre de la Inst.' (25), 'Fracción de RSU de Rápida Degradabilidad' (0,50), and 'Fracción de RSU de Lenta Degradabilidad' (0,25).
- Composición Média de los RSU del Vertedero:** Input fields for 'Materia Orgánica (%)' (50), 'Papel y Cartón (%)' (15), 'Plásticos (%)' (10), 'Textiles (%)' (3), 'Metales (%)' (4), 'Vidrios (%)' (7), and 'Otros (%)' (11).

A dialog box titled 'Cargar Instalación' is open, showing a list of installations: 'Vertedero_Menuelo', 'Vertedero_LaZoneda', 'Vertedero_LaZoneda Test', and 'Vertedero_Calahorra'. Buttons for 'Cargar' and 'Salir' are visible. At the bottom of the main window, there are buttons for 'VALIDAR DATOS DE MODELO' and 'CALCULAR MODELO DE PRODUCCIÓN'.

Figura 2.9.: Paso 3º - Velocidad de Generación de Biogás en un Vertedero del Software GENBIVER. Fuente: elaboración propia.

Una vez introducidos estos datos es necesario “Validar los Datos del Modelo”. Esto creará una tabla donde las filas son los distintos años en los que la instalación ha permanecido abierta, definidos anteriormente.

En esta tabla se introducirán en el modelo la cantidad de residuos depositados en el vertedero separados por año y tipología. Las tipologías en las que clasifica este programa los RSU son: Urbanos Asimilables a Urbanos, Rechazo de Compostaje, Lodos EDAR y Otros [No Inertes]. Las cantidades deben ser introducidas en toneladas. En la captura de pantalla siguiente se puede ver el formulario de introducción de datos de la instalación en GENBIVER. Esta aplicación permite cargar instalaciones que previamente han sido guardadas en base de datos o introducir instalaciones nuevas a partir de la definición de los años de apertura y cierre de la instalación. Una vez introducidas las toneladas vertidas en una instalación y separadas por categorías se puede guardar esta en la base de datos para que esté disponible para cálculos posteriores. El botón “Limpiar” sirve para eliminar los datos de una instalación y así poder introducir otra.

Por último, una vez introducidos todos los datos anteriores ya es posible obtener los resultados del modelo. Para ello será necesario pulsar el botón “Calcular Modelo de Producción”. Una vez finalizados los cálculos, pulsando “siguiente” se mostrarán los resultados.

2.2.5.- Aplicación de GENBIVER a Vertederos Reales

En este apartado se va a aplicar el software a un vertedero de RSU de gran tamaño como es el de La Zoreda (Asturias) y a uno de pequeño tamaño como es el de Calahorra (La Rioja).

Para realizar la modelización de estos vertederos es necesario introducir en el software GENBIVER una serie de variables explicadas en los apartados anteriores. La figura 2.7 muestra la pantalla donde se deben introducir los datos de identificación de la instalación y se muestran las bases de cálculo y asunciones que adopta este modelo. En la segunda se realiza el cálculo del caudal de biogás recuperable para las Fracciones de Rápida Degradabilidad y para la Fracción de Lenta Degradabilidad tomadas por el modelo. Los valores adoptados por defecto por GENBIVER son los mostrados en la figura 2.8. Estas dos figuras no se van a particularizar para cada instalación dado que se parte de los mismos valores.

La siguiente pantalla sí será distinta para cada ejemplo planteado en este apartado debido a que será necesario introducir la cantidad de residuos vertidos (en toneladas) y separados por tipologías. Además, también será necesario proporcionar la fecha de apertura de la instalación, la fecha de cierre de la instalación, los años a modelizar desde el cierre de la instalación, la Fracción de RSU de Rápida Degradabilidad cuantificada en tanto por uno y la Fracción de RSU de Lenta Degradabilidad cuantificada también en tanto por uno.

Las capturas de pantalla correspondientes a la modelización con GENBIVER de los dos ejemplos planteados, con los valores respectivos de cada una de las variables expuestas anteriormente, se pueden ver a continuación:

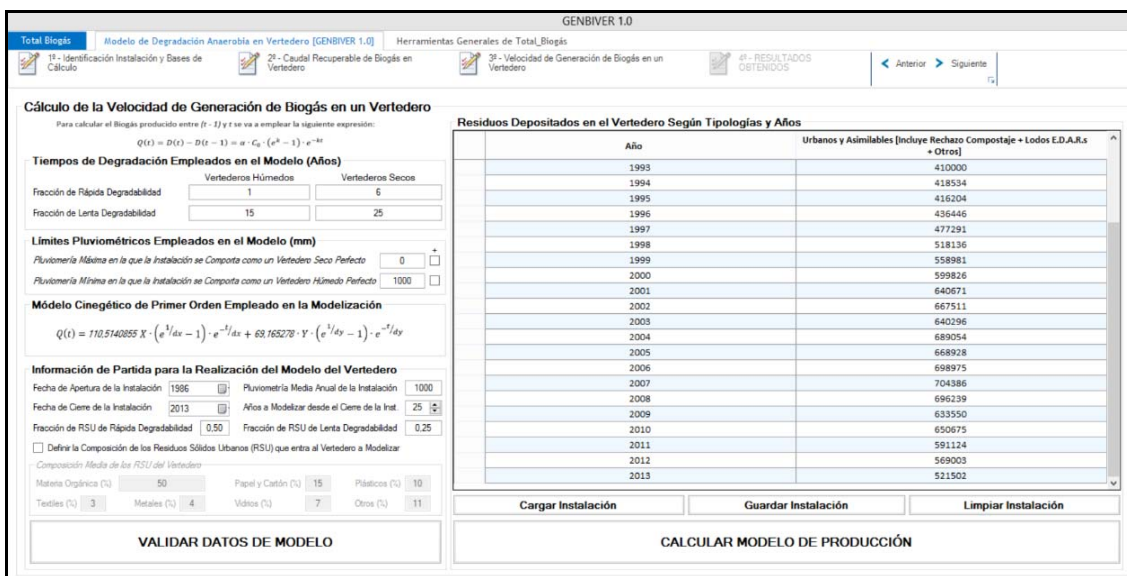


Figura 2.10.: Paso 3º - Velocidad de Generación de Biogás en V. de La Zoreda. Fuente: elaboración propia.

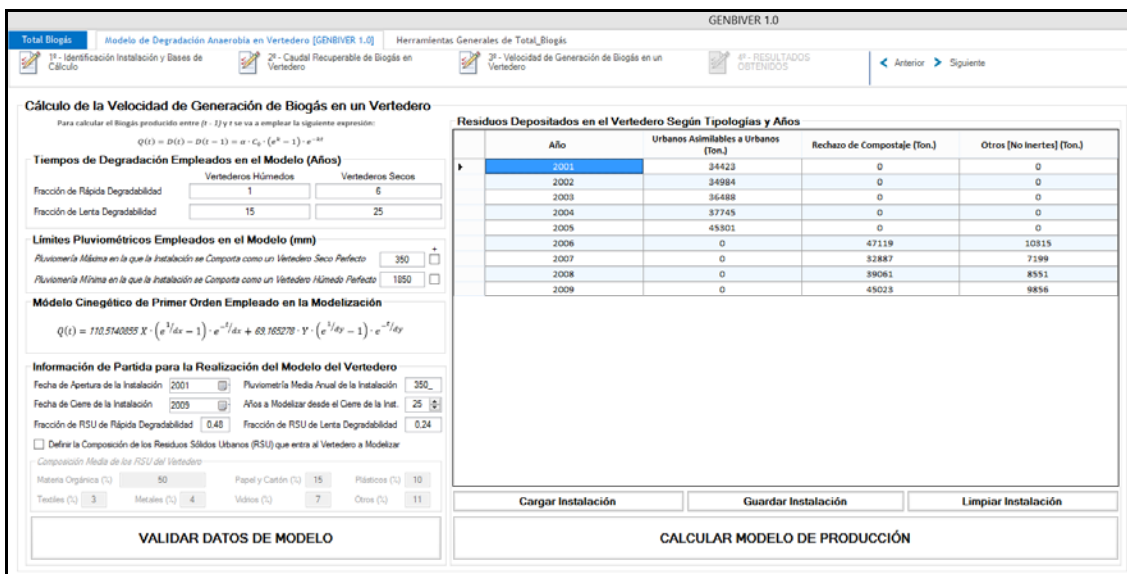


Figura 2.11.: Paso 3º - Velocidad de Generación de Biogás en V. de Calahorra. Fuente: elaboración propia.

2.2.6.- Resultados obtenidos por la aplicación de GENBIVER en Vertederos Reales

Los resultados obtenidos de dos de las modelizaciones realizadas se muestran a continuación. En ellos se pueden ver distintas gráficas de producción y caudal de biogás para cada instalación.

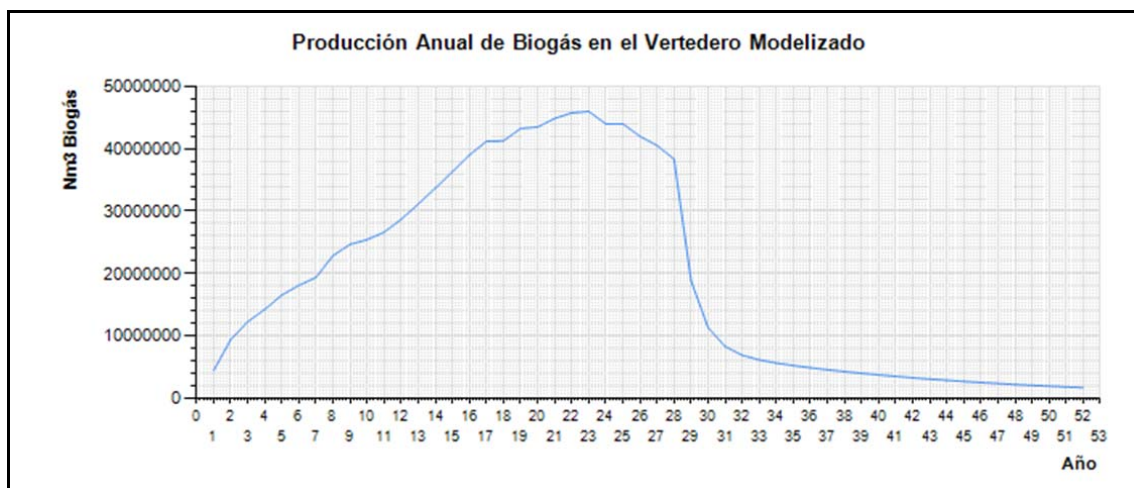


Figura 2.12.: Producción de Biogás Anual obtenida por el Modelo para el V. de la Zoreda (Asturias) [Año 0 = 1986].
Fuente: elaboración propia.

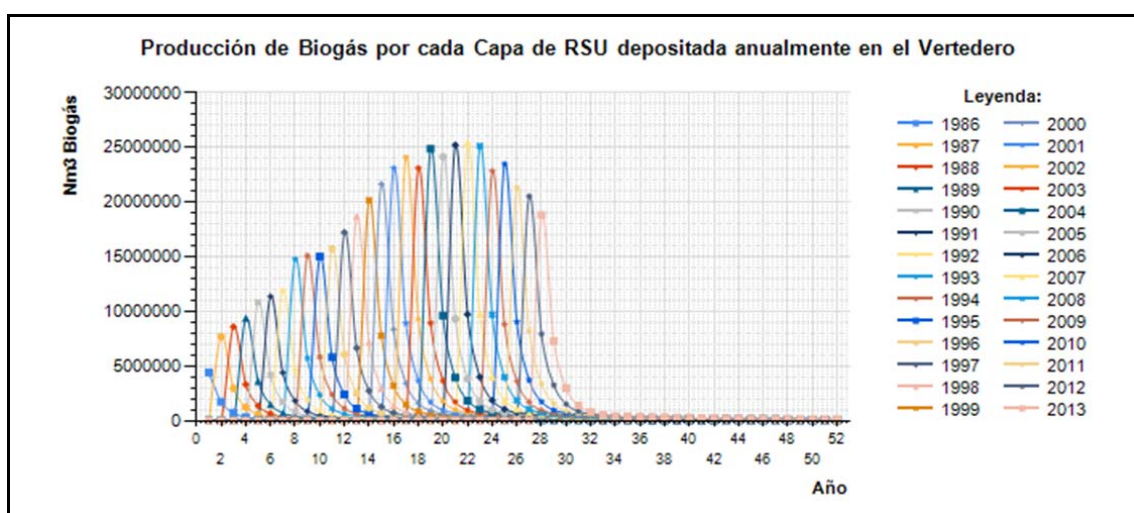


Figura 2.13.: Producción de Biogás por cada Capa de RSU vertida anualmente en el V. de la Zoreda [Año 0 = 1986].
Fuente: elaboración propia.

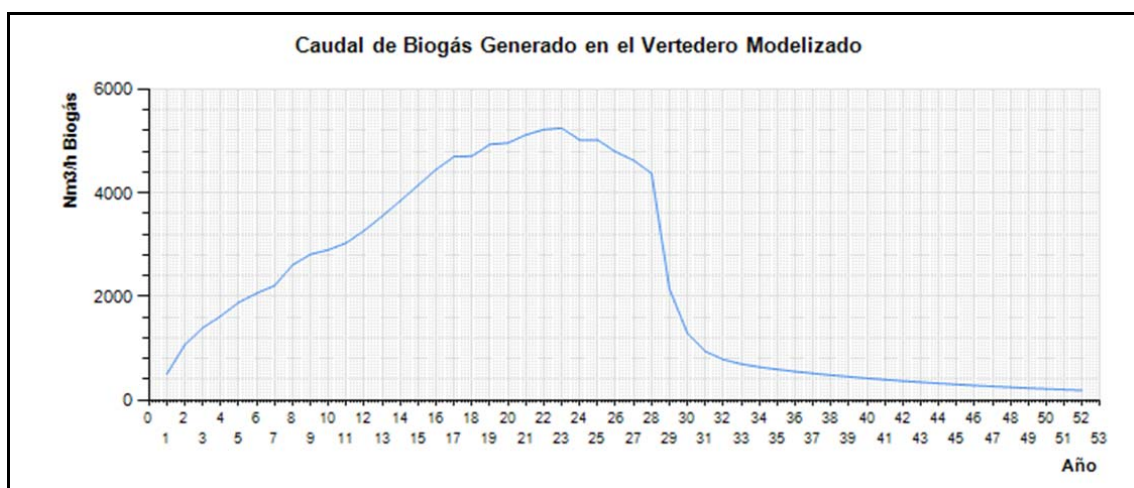


Figura 2.14.: Caudal de Biogás Anual Generado obtenido por el Modelo para el V. de la Zoreda [Año 0 = 1986].
Fuente: elaboración propia.

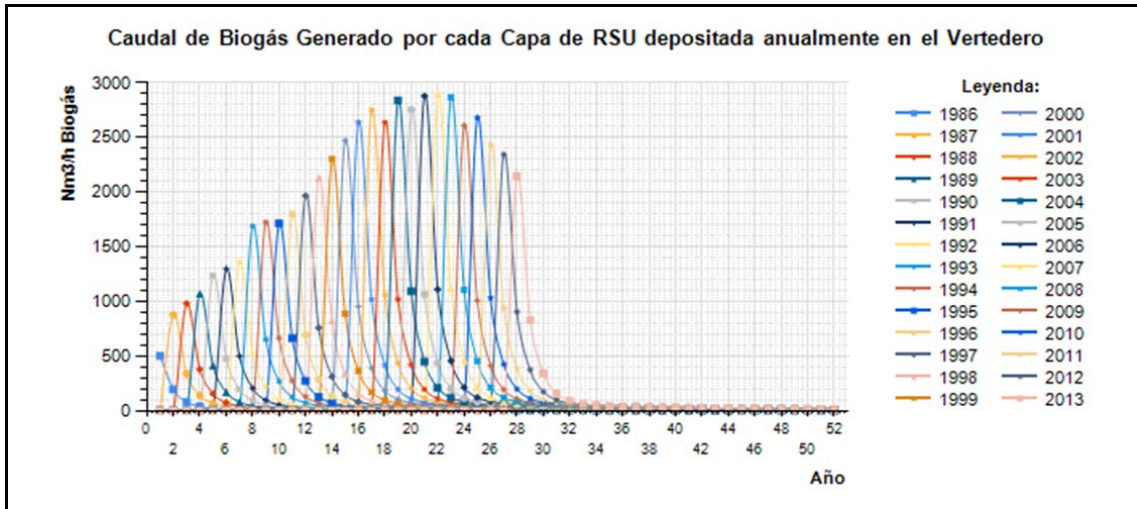


Figura 2.15.: Caudal de Biogás Generado por Capa de RSU vertida anualmente en el V. de la Zoreda [Año 0 = 1986].
Fuente: elaboración propia.

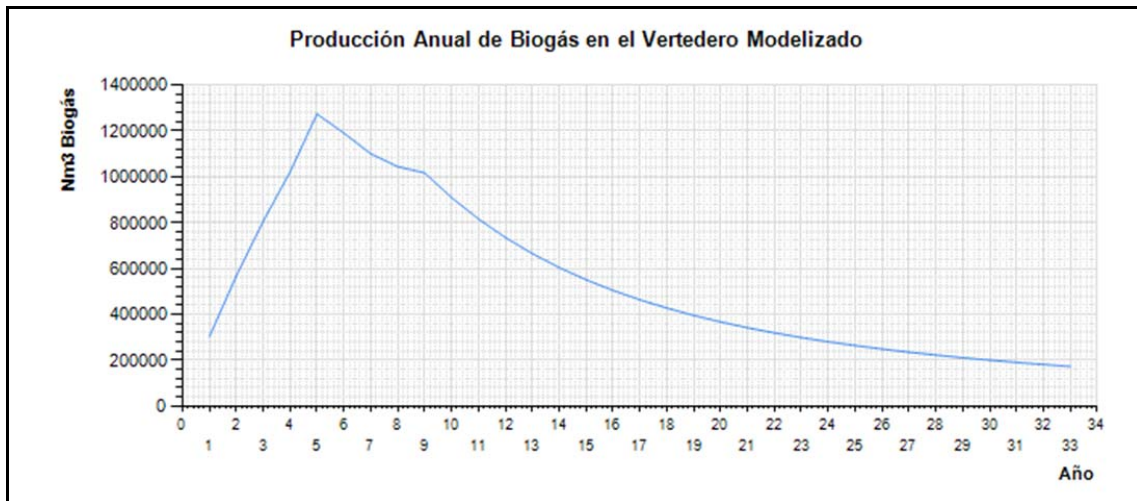


Figura 2.16.: Producción de Biogás Anual obtenida por el Modelo para el V. de Calahorra (La Rioja) [Año 0 = 2001].
Fuente: elaboración propia.

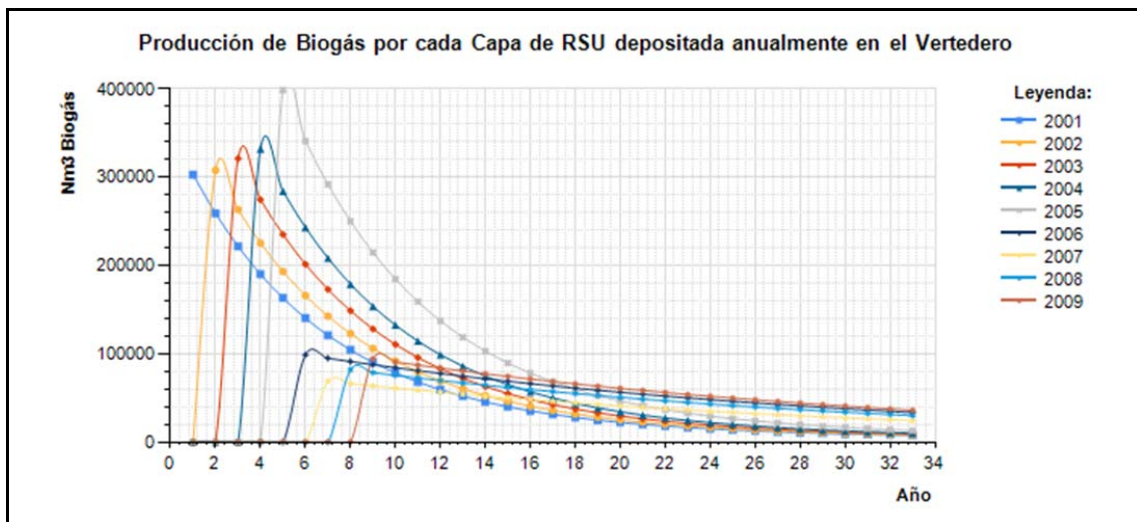


Figura 2.17.: Producción de Biogás por cada Capa de RSU vertida anualmente en el V. de Calahorra [Año 0 = 2001].
Fuente: elaboración propia.

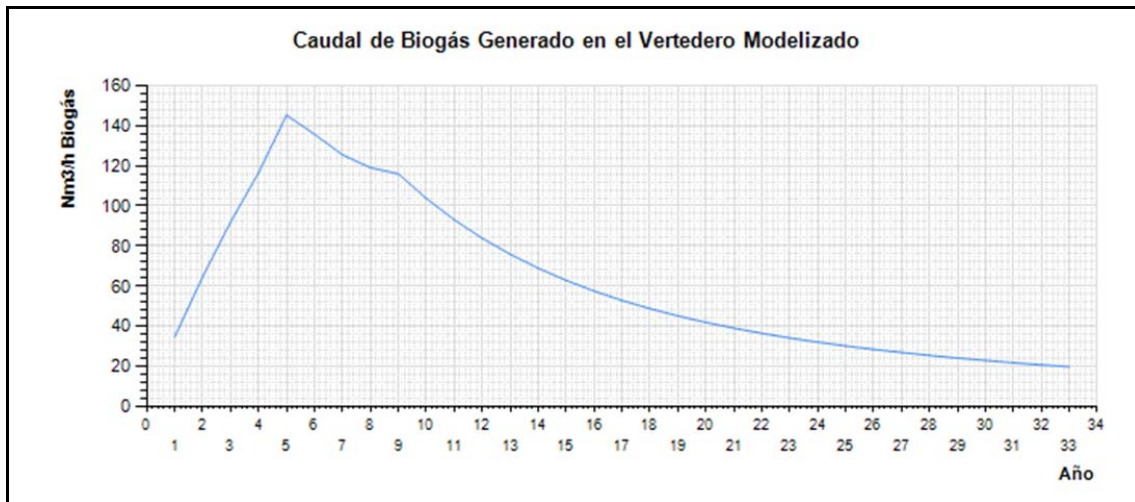


Figura 2.18.: Caudal de Biogás Anual Generado obtenido por el Modelo para el V. de Calahorra [Año 0 = 2001].
Fuente: elaboración propia.

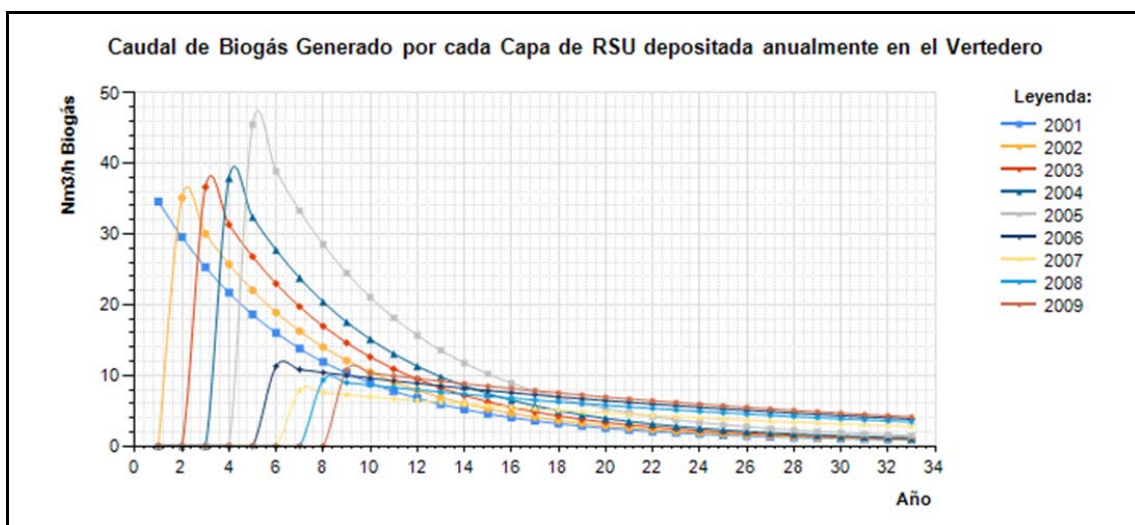


Figura 2.19.: Caudal de Biogás Generado por Capa de RSU vertida anualmente en el V. de Calahorra [Año 0 = 2001].
Fuente: elaboración propia.

2.2.7.- Conclusiones y Precisión obtenida por el Software creado

El modelo de producción aquí planteado resulta muy útil para estudiar la viabilidad del aprovechamiento energético del biogás producido en vertedero en diferentes aplicaciones. Previamente a su utilización ha sido necesario testarlo con diferentes instalaciones reales para conocer el grado de precisión del mismo.

El modelo de producción construido ha demostrado tener un grado de precisión elevado en las instalaciones estudiadas. A continuación se presentan los resultados de precisión obtenidos por el modelo para dos de las instalaciones analizadas. Para ello se ha comparado el biogás real producido con los valores arrojados por el modelo y se ha mostrado la precisión anual obtenida. Así, para el caso del vertedero de la Zoreda se ha obtenido una precisión que ronda el 93%. Los resultados obtenidos por el software para esta instalación se pueden ver a continuación:

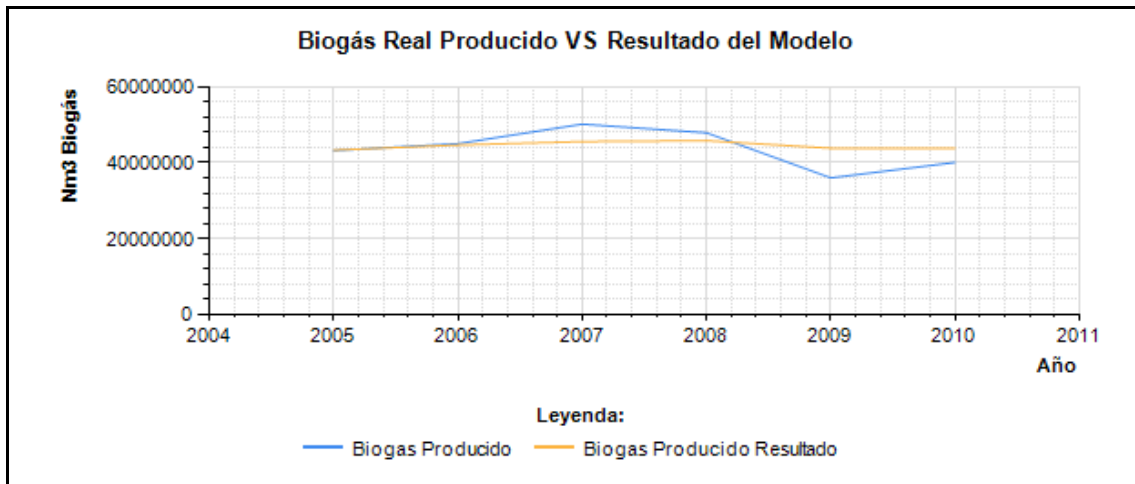


Figura 2.20.: Biogás Producido Real VS Modelo para el Vertedero de la Zoreda. Fuente: elaboración propia.

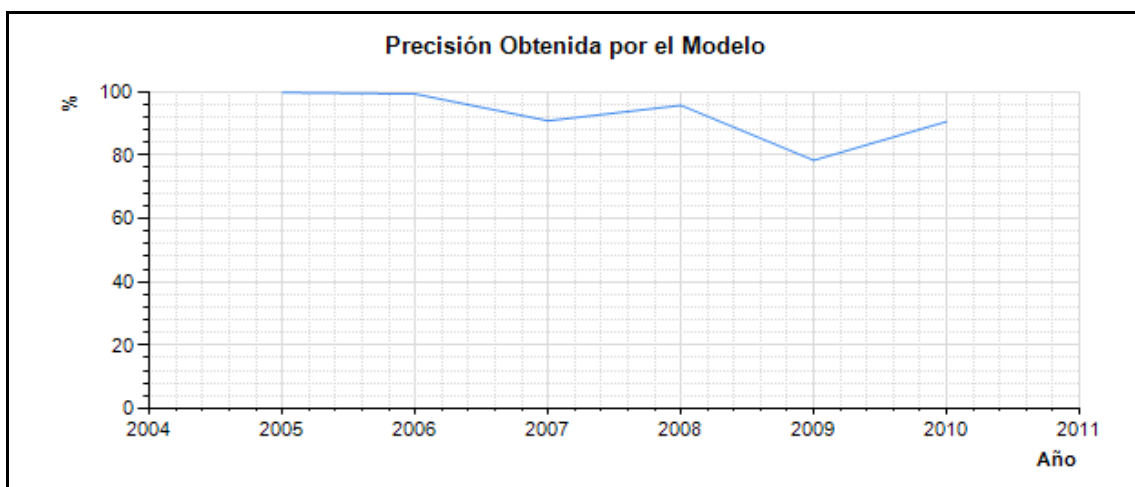


Figura 2.21.: Precisión Obtenida por el Modelo para el Vertedero de la Zoreda. Fuente: elaboración propia.

Por último, para el caso del vertedero de Calahorra se ha obtenido una precisión que ronda el 95%. Los resultados obtenidos por el modelo para este vertedero se pueden ver a continuación. Para ello se ha comparado el biogás real producido con los resultados arrojados por el software, y por último se ha mostrado la precisión anual obtenida:

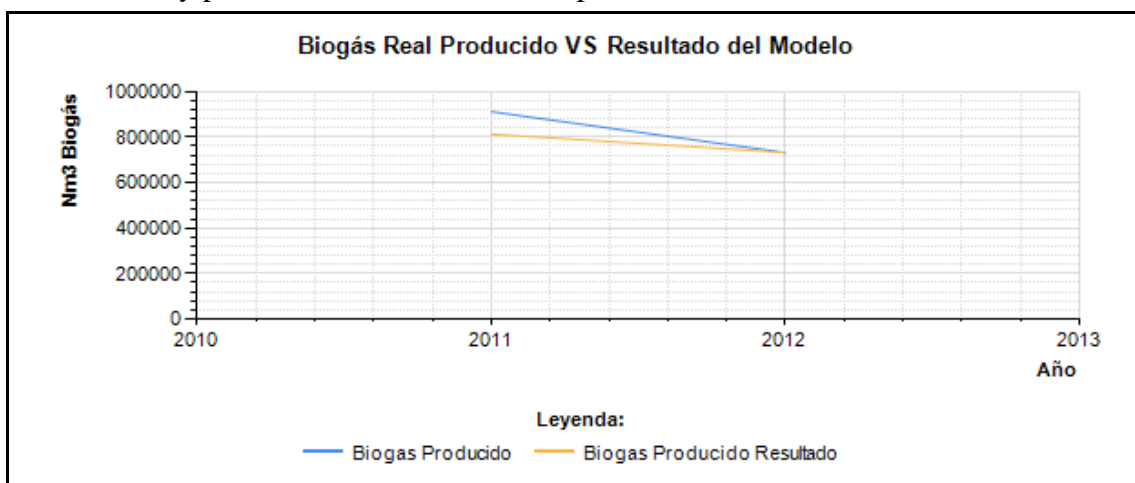


Figura 2.22.: Biogás Producido Real VS Modelo para el Vertedero de Calahorra. Fuente: elaboración propia.

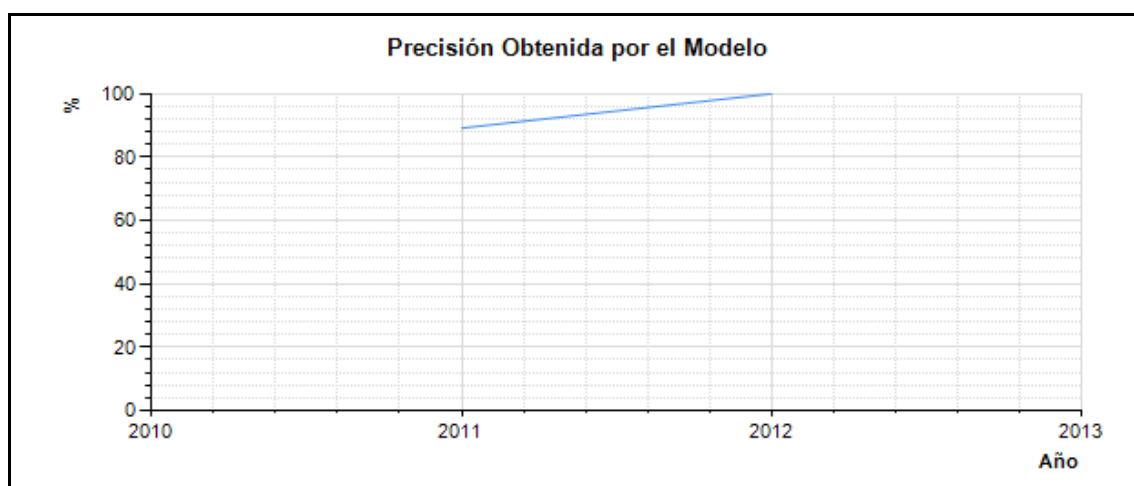


Figura 2.23.: Precisión Obtenida por el Modelo para el Vertedero de Calahorra. Fuente: elaboración propia.

La precisión obtenida por el modelo se ha obtenido comparando el resultado del modelo con el proporcionado por la empresa gestora del vertedero. Esta precisión es una estimación debido a que los resultados proporcionados por las empresas gestoras de estas instalaciones no son totalmente precisos. Los valores de fugas proporcionados por estas son muy dispares entre diferentes años, con lo que los resultados proporcionados deben tomarse con reservas.

3. Las Aplicaciones No Convencionales del Biogás

En función de la aplicación a la que se vaya a destinar el biogás producido en un vertedero, este requerirá un grado de pureza diferente. Así en la tabla siguiente se puede ver un resumen de los tratamientos que habría que aplicarle en función de su uso a posteriori:

Tabla 3.1.: Nivel de Tratamiento del Biogás en función de su uso final. Fuente: elaborada a partir de referencia [11].

Nivel de Tratamiento del Biogás en función de su uso final			
Uso	Eliminación Agua	Eliminación CO ₂	Eliminación de H ₂ S
Caldera (calor)	Parcial	No necesario	No necesario
Motores (calor + electricidad)	Parcial	No necesario	Parcial
Combustible vehículos	Elevada	Elevado	Elevado
Inyección Red Gas Natural	Elevada	Elevado	Elevado
Pilas de Combustible	Elevada	Elevado	Elevado

Además, estas aplicaciones se podrían ordenar en función del grado de depuración que debe presentar el biogás de estados de menor a mayor refinado. Así, el empleo en la combustión es la aplicación que necesita una menor depuración del gas seguida por la generación de electricidad y calor en motores de combustión. Las demás aplicaciones necesitan de biogás de mayor pureza (biogás de alto grado). Esta ordenación se puede ver en el siguiente esquema:

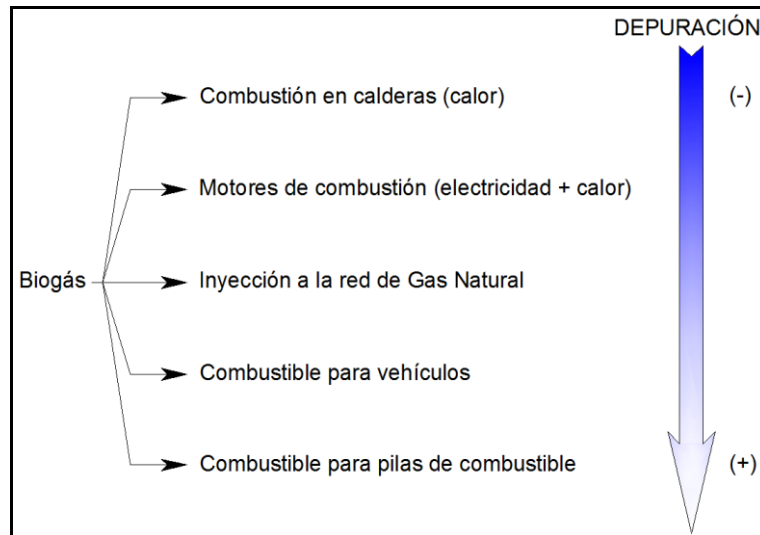


Figura 3.1.: Ordenación de las Aplicaciones según el Grado de Pureza necesario del Biogás.
Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se pueden ver las necesidades de tratamiento del biogás en función del uso que se le vaya dar a posteriori:

Tabla 3.2.: Tratamiento del Biogás en función de su uso final. Fuente: elaborada a partir de referencia [12].

Tratamiento del Biogás en función de su uso final	
Uso	Tratamiento
Caldera (calor)	Desulfuración
Motores (calor + electricidad)	Desulfuración
Combustible Vehículos	Purificación + Compresión + Almacenamiento
Inyección Red Gas Natural	Purificación + Bombeo + Odorización
Pilas de Combustible	Purificación + Reformado

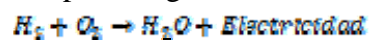
Por último, entendemos por Aplicaciones No Convencionales aquellas en las que actualmente no se suele emplear el biogás (año 2014). Estas aplicaciones tienen en común que se suele emplear el denominado biogás de alto grado, y las más destacadas son:

- 1) Substituto del Gas Natural: incorporando el biogás purificado a redes de gas natural.
- 2) Combustible de Pilas de Combustible: se emplea directamente en las MCFC y SOFC.
- 3) Combustible para vehículos: se tendría que almacenar como gas comprimido.

3.1. Generación de electricidad mediante Pilas de Combustible

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos que producen electricidad a partir de una reacción química. En ellas, la reacción química no se acaba nunca mientras le sean suministrados tanto el combustible como el oxidante. En el ánodo se le inyecta el combustible mientras que en el cátodo se le inyecta el oxidante. Ambos electrodos de la pila de combustible están separados por un electrolito iónico conductor. Como combustibles más comunes destacan el hidrógeno y el amoníaco mientras que el oxidante es normalmente aire u oxígeno.

En la reacción química que produce la electricidad en la pilas de combustible interviene el hidrógeno y el oxígeno generando vapor de agua. Esta reacción se puede ver a continuación:



Cuando se emplea biogás para la generación de electricidad en las pilas de combustible, lo más habitual es someterlo a un proceso de depuración para transformarlo en hidrógeno a posteriori ^[9 y 10]. Pero existen dos tipos de pilas de combustible en las que el biogás se puede

utilizar directamente como combustible (es necesario someterlo a un proceso de desulfuración). Estas pilas se comentan brevemente a continuación.

Pilas de combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC): la temperatura de operación oscila entre los 600°C a los 1000°C y como electrolito emplean una mezcla de sales de carbonato fundido en suspensión en una matriz cerámica porosa (solución líquida de litio, sodio y potasio) [13, 14 y 15]. En el diagrama que se puede ver a continuación se muestra el sistema de funcionamiento de las Pilas de Carbonatos Fundidos (MCFC):

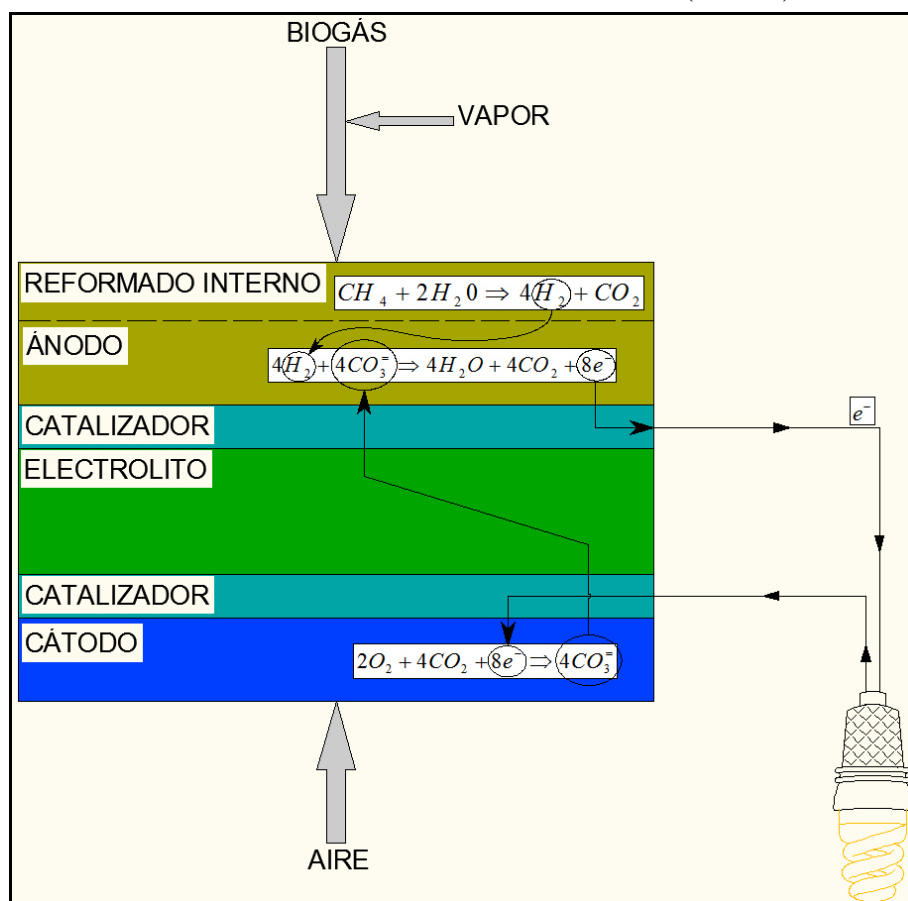


Figura 3.2.: Diagrama de Funcionamiento de las Pilas de Carbonatos Fundidos (MCFC). Fuente: elaboración propia.

Las ventajas y desventajas más destacadas se deben a una elevada temperatura de funcionamiento, destacando una mayor eficiencia y el uso de catalizadores de bajo coste (no es necesario emplear catalizadores de metales preciosos). Se obtiene una mayor eficiencia debido a que cuando se combina con una turbina esta puede llegar al 65%, un resultado muy superior a Pilas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFCs) por ejemplo. Incluso puede alcanzar valores del 85% si se aprovecha el calor residual generado en el proceso. Además, consecuencia directa de esto es que el monóxido de carbono no es un elemento que provoque envenenamiento sino que puede ser empleado como combustible. Esta particularidad hace posible que se puedan emplear una amplia variedad de combustibles como pueden ser el gas natural, biogás, etc. Y debido a las altas temperaturas de operación no necesitan un reformador externo (el combustible inyectado se convierte en hidrógeno en la propia pila) produciéndose el reformado en el interior de la pila lo que reduce también los costes.

La principal desventaja de esta tecnología es la disminución de la durabilidad de la pila de combustible debido a las elevadas temperaturas de operación y el empleo de un electrolito corrosivo. Estos dos condicionantes causan roturas de componentes y también corrosión. En la actualidad estos problemas están en fase de estudio y mejora por los fabricantes de las mismas con el objetivo de aumentar la vida de este tipo de pilas sin disminuir su rendimiento.

Hoy en día las Pilas de Combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC) se están empleando en varios lugares en todo el mundo para la generación estacionaria de energía eléctrica aunque su empleo con biogás aún es esporádico. El tamaño típico de estas es de varios cientos de kW. Los problemas principales para que esta tecnología penetre en el mercado y pueda competir con los sistemas tradicionales de generación de energía son fundamentalmente de índole técnico (anteriormente explicado). En la actualidad, las investigaciones se centran en lograr aumentar su vida útil y la reducción de costes. Un aumento de la durabilidad de la Pila de Combustible lleva emparejado una disminución de costes de operación y mantenimiento del sistema. Además, se están explorando otros métodos como el aumento de la densidad energética de estos sistemas y procesos de fabricación más baratos (la producción en masa contribuirá en la reducción de costes).

Pilas de Óxidos Sólidos (SOFC): la temperatura de operación oscila entre los 600°C y los 1000°C, lo que hace que no sea necesario el empleo de materiales preciosos en el proceso de reformado provocando una disminución de costes de los equipos. Este tipo de pilas emplean electrolitos y electrodos sólidos formados normalmente por óxido de zirconio sólido el primero y una membrana cerámica dura no porosa de óxido de zirconio (ZrO_2) dopado mediante itrio el segundo ^[16 y 17].

Las ventajas y desventajas de este tipo de pilas se basan en la alta temperatura de operación y el uso de un electrolito sólido. Esta elevada temperatura provoca que los iones de oxígeno del comburente atraviesen rápidamente la membrana cerámica y que, por lo tanto resistan mejor que otro tipo de pilas de combustible los compuestos de azufre y el monóxido de carbono. Además, las Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) pueden emplear diversos tipos de combustibles, entre ellos el biogás, producido en vertederos o EDAR.

Como resultado de esas elevadas temperaturas de operación se dan una serie de inconvenientes que no se producen en otro tipo de pilas que operan a temperaturas más bajas, como son la necesidad de aislarlas térmicamente para proteger el personal y lo lentas que son a la hora de producir energía. Estos inconvenientes provocan que la fabricación de este tipo de pilas de combustible sea muy costosa.

El empleo más común de las Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC) es la generación estacionaria de electricidad. Se suelen emplear en plantas relativamente grandes para cogenerar electricidad y energía térmica debido a su elevada temperatura de funcionamiento. En dichas plantas se pueden alcanzar eficiencias superiores al 60%.

En el diagrama que se puede ver a continuación se muestra el sistema de funcionamiento de las Pilas de Óxidos Sólidos (SOFC):

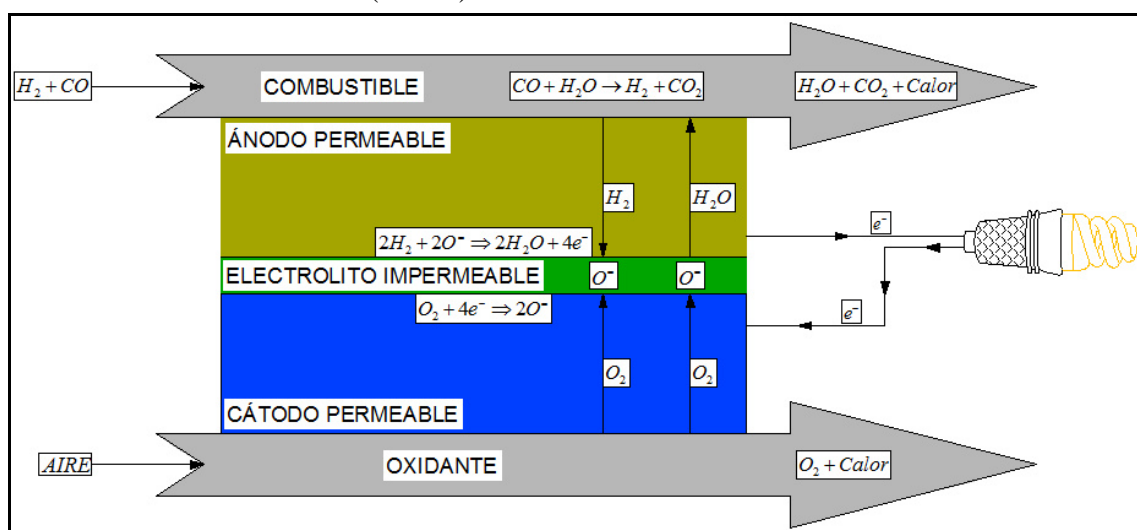


Figura 3.3.: Reacciones Electrolyticas en la Pila de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC). Fuente: elaboración propia.

3.2. Empleo del Biogás como combustible para vehículos

El empleo del biogás como combustible en vehículos junto con su empleo en los diferentes métodos de generación de energía eléctrica son las alternativas con más futuro de este gas. El biogás puede ser usado en vehículos ligeros, pesados, equipados con motores de combustión interna o pilas de combustible lo que le da mucha versatilidad.

En la actualidad ya existen en el mercado numerosos vehículos que emplean el gas natural como combustible. El biogás puede sustituir a este realizando únicamente un proceso de refinado con el fin de eliminar impurezas (partículas sólidas, agua, CO₂, SH₂...) consiguiendo de esta forma aumentar la concentración de metano hasta niveles del 95%.

En cuanto a las ventajas que presenta un vehículo que funciona con biogás con respecto a uno que funciona con un combustible tradicional (diésel o gasolina) podríamos citar que estos presentan un mayor rendimiento que un motor convencional, además los motores son más duraderos y emiten una menor cantidad de ruido. En cuanto a las desventajas destacan que estos tienen una menor autonomía y que además presentan un arrancado más lento.

Para utilizar el biogás como combustible de automoción es necesario someterlo a diversas técnicas de refinado y limpieza con el fin de que este adquiera características similares al gas natural. Las principales técnicas son la absorción en agua, absorción física, absorción química, PSA, separación por membrana y criogénesis. La elección de una u otra técnica depende de la composición del biogás de partida, del volumen de tratamiento y de la aplicación posterior del biogás, etc.

3.3. Inyección del Biogás en las Redes del Gas Natural

El biogás, de manera análoga al gas natural, está constituido principalmente por metano, pudiendo sustituir a este en la mayoría de aparatos que funcionen con gas natural sin realizar grandes modificaciones. Para que el biogás pueda sustituir al gas natural es necesario someterlo a un proceso de limpieza y refinado. Este proceso de purificación consiste básicamente en la eliminación del agua, partículas sólidas y principalmente de los gases CO₂, SH₂ y NH₃. Cuando este se inyecta en las redes de gas natural recibe el nombre de biometano (biogás con más de un 97% de contenido en metano).

El empleo de esta técnica tiene ventajas importantes entre las que destacan la posibilidad de conectar la zona de producción con las áreas de consumo, la mejora de la seguridad del suministro además de ser posible, en cierto modo, adaptar la producción del gas a la demanda. Además esta técnica supone una oportunidad, ya que reduce la dependencia energética del exterior ^[18] muy interesante a día de hoy.

Existen países donde esta técnica ha sido probada con éxito entre los que destacan Estados Unidos, Alemania, Suecia, Francia y Suiza. Incluso en Alemania y Suecia existen especificaciones de calidad que ha de cumplir el biogás a la hora de ser inyectado a la red de gas natural. Sin embargo, en España todavía no existen muchas iniciativas en este campo.

4. Situación actual y perspectivas futuras sobre el Sector del Biogás

En la actualidad (2015), el biogás generado en vertedero constituye el principal contribuyente para la generación de este gas. Además, mediante la transposición de la Directiva de Vertederos 99/31/CE al sistema jurídico español como el RD1481/2011, se fija una disminución de los residuos biodegradables en vertedero (en peso) del 50% en el año 2009 y llegando hasta un 65% en el año 2015 con respecto a los niveles de 1995. A finales de 2010 el biogás de vertedero constituía aproximadamente un 70% de su producción ^[19], pero en el futuro disminuirá su peso como contribuyente principal a favor de otras fuentes como

las plantas de codigestión, que están en una etapa de desarrollo incipiente y tienen un gran potencial de cara al futuro. Lo explicado se puede ver de manera gráfica a continuación:

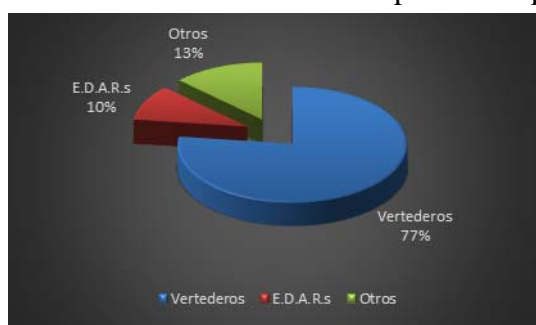


Figura 4.1.: Origen del Biogás (Año 2008).
Fuente: elaboración propia.

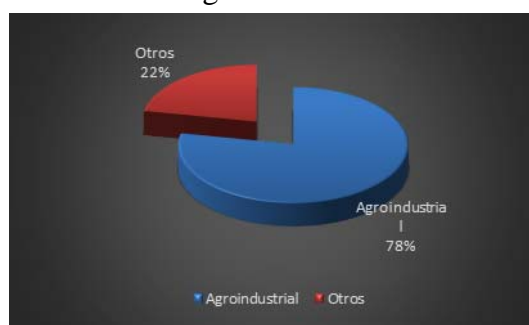


Figura 4.2.: Origen esperado Biogás (2020).
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en las gráficas siguientes se puede ver la producción de biogás (para el año 2008 y la esperada en el año 2020) y la producción de energía eléctrica (para el año 2010 y la esperada en los años 2015 y 2020).

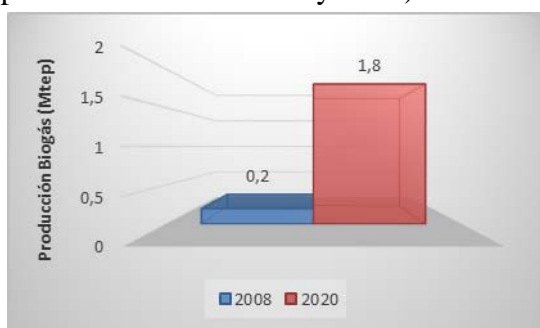


Figura 4.3.: Producción de Biogás en Mtep.
Fuente: elaboración propia.

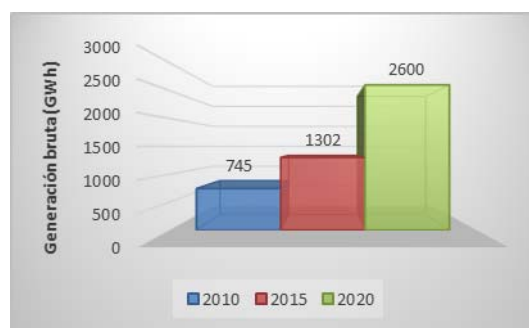


Figura 4.4.: Generación bruta en GWh.
Fuente: elaboración propia.

Por último, en la tabla siguiente se muestran los objetivos de producción para el biogás a cumplir en España para los años 2010, 2015 y 2020 ^[20]:

Objetivo	2010		2015		2020	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Biogás	177	745	220	1302	400	2600
Biomasa total	825	4228	1162	7142	1950	12200
Total Renovables	39214	97121	50996	112797	63761	146080

Tabla 4.1.: Objetivos para 2010, 2015 y 2020 (Biogás). Fuente: elaborada a partir de referencia [19].

4.1. Instalaciones destacadas de producción de Biogás en España

4.1.1. Complejo de Biometanización de Valdemingómez (Madrid)

El parque tecnológico de Valdemingómez constituye el complejo de tratamiento de residuos más avanzado de España y uno de los más avanzados de Europa. Dentro de este parque se incluyen dos plantas de biometanización llamadas “La Paloma” y “Las Dehesas” además de una planta de tratamiento del biogás que permite su tratamiento e incorporación a la red de distribución.

Este gran complejo de tratamiento de residuos es capaz de gestionar unas 295000 toneladas de residuos orgánicos, el 70% materia orgánica procedente de residuos domiciliarios, que se convertirán en 240000 toneladas de biomasa ^[21]. Esta biomasa, mediante los tratamientos que recibe en este complejo se transforma en 34 millones de metros cúbicos de biogás que se puede utilizar en diferentes usos.

Dentro de este complejo destaca la planta de “Las Dehesas” que recibe más de la mitad de los residuos que llegan a Valdemingómez. El proceso de metanización que se lleva a cabo se realiza mediante una fermentación anaerobia por vía seca en la que un 30% de la materia que entra en los digestores es seca.

Los residuos al entrar a la planta reciben un pretratamiento. En esta fase los residuos son sometidos a una serie de procedimientos mecánicos y físicos obteniendo un residuo orgánico con aspecto de “barro” que sale hacia la digestión. Este procedimiento comienza con una separación por tamaño de malla y posteriormente se separan los inertes que van a vertedero.

Esta planta cuenta con 5 digestores ^[22], con forma de cilindros huecos de 19 metros de altura y 3600 m³ de capacidad. En esta fase, en primer lugar el material pretratado debe homogeneizarse en un sistema mezclador para posteriormente pasar a los digestores mediante el empleo de bombas. Una vez que el material entra en el digestor debe estar continuamente en movimiento para evitar que este se solidifique. El material debe estar dentro del digestor 21 días mientras se va extrayendo el gas a través de una tubería en la parte superior para ser almacenado en gasómetro. Para calentar el material en digestión se emplea una caldera que produce, a partir del biogás generado, vapor de agua.

Una vez producida la digestión, el material residual obtenido se debe deshidratar separando para ello la parte sólida de la líquida. La fracción sólida es llevada a una planta de compostaje mientras que la líquida se lleva a una planta depuradora para ser tratada.

4.1.2. Planta de Biometanización y Vertedero de Pinto

En esta instalación se obtiene biogás a partir de los residuos biodegradables que entran a ella, así como del vertedero anexo. Este biogás obtenido se emplea para la producción de energía eléctrica.

Algunas características destacadas de esta planta ^[20] son:

- Capacidad de tratamiento: 140000 t/año
- Potencia instalada: 15543 kW
- Energía producida: 117730 MWh/año

Esta instalación está compuesta por cuatro zonas bien diferenciadas que son: zona de tratamiento de la materia seca, zona de tratamiento de la materia húmeda, zona de biodigestión y producción eléctrica, y zona de compostaje. La planta cuenta con dos digestores de 6500 m³ cada uno y el tiempo de permanencia del material a digerir es de 21 días. El biogás en la planta se extrae por la parte superior de los biodigestores para a continuación ser sometido a procesos de filtración y enfriamiento antes de ser almacenado en el gasómetro. En esta planta también se obtiene biogás procedente del vertedero adyacente. El biogás obtenido es conducido hacia los motores para alimentarlos y así generar energía eléctrica (cuenta con 11 motogeneradores de 1,413 kWe cada uno).

En 2007 esta planta puso en funcionamiento un ciclo combinado para aprovechar el calor residual proveniente de los gases de escape de los motores. Mediante este ciclo combinado, dotado de una turbina de vapor, se mejora el rendimiento global de la instalación y se evita la emisión a la atmósfera de 21769 toneladas/año de CO₂. La potencia instalada de la turbina de vapor del ciclo combinado es de 1019 kWe y la energía exportada es de 7GWh/año.

4.2. Usos actuales del Biogás producido en Vertedero

En España prácticamente la totalidad de los vertederos existentes emplean el biogás producido como combustible en motores de combustión interna. Para realizar este aprovechamiento energético previamente se eliminan las impurezas que este contiene. El

biogás posee un octanaje que oscila entre 100 a 110 (ideal para motores con alta relación volumétrica de compresión) aunque tiene baja velocidad de encendido. Además, es poco lubricante, posee un elevado contenido de humedad y un bajo PCI. Por estos motivos los motores diésel y gasolina deben ser modificados para suministrar la mezcla aire-gas correcta.

En la tabla siguiente se puede ver una comparativa de ambos motores:

Características de los Motores			
Tipo	Motor Gasolina	Motor Diésel	Motor Diésel
Proceso	Gas-Otto	Gas-Otto	Ignición
Precio	Bajo	Muy alto	Alto
Grado de eficiencia	20-25%	30-35%	25-35%
Duración	Baja	Media	Media
Nivel de ruido	Medio	Alto	Alto
Grado de mantenimiento	Alto	Medio	Alto
Combustible de reemplazo en caso de fallo	Gasolina	GLP	Diésel
Potencia	5-30	>150	30-150

Tabla 4.2.: Características de los Motores. Fuente: elaborada a partir de referencia [23].

En el gráfico siguiente se puede ver la potencia instalada, en los diferentes vertederos analizados, en motores de combustión interna:

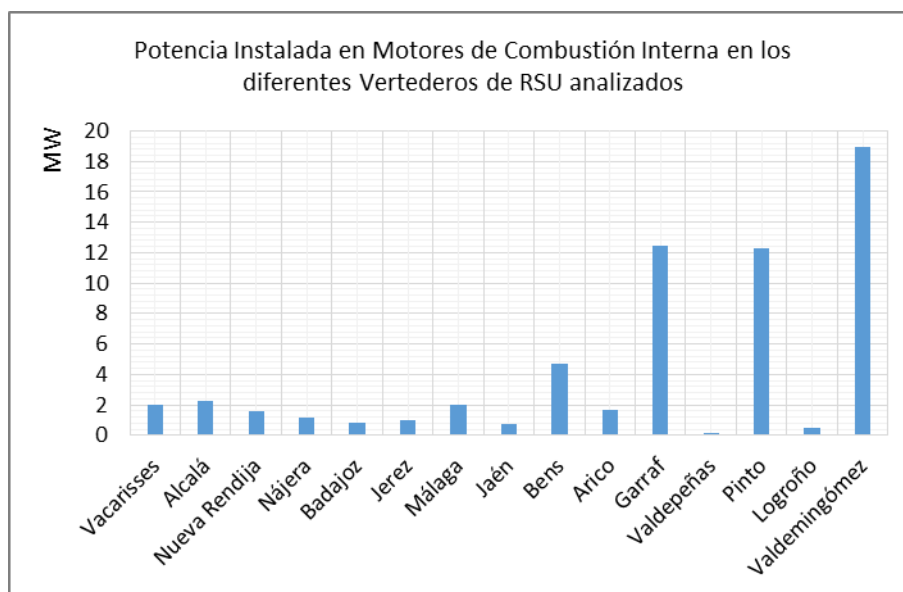


Figura 4.5.: Potencia Instalada en Motores de Combustión en los diferentes Vertederos. Fuente: elaboración propia..

En España las aplicaciones no convencionales comentadas anteriormente tienen escasa presencia. Únicamente el complejo de biometanización de Valdemingómez (Madrid) incorpora biogás producido, previamente tratado, a la red de distribución de gas natural. En otros países esta técnica está siendo ampliamente utilizada. Un ejemplo de esto es Alemania, en la cual, en el año 2014 se ha llegado a las 151 plantas que inyectan biometano a las redes de gas natural existentes. La construcción de plantas de inyección de biometano a red de gas natural sigue en aumento, un ejemplo de esto es la propia Alemania en la que en el 2013 se han construido 21. En otros países como Austria, Francia, Suecia, Suiza, Holanda, Reino Unido y Dinamarca esta tendencia también está en aumento.

Como contrapartida a este panorama está España, debido a que antes del 2008 existían numerosos proyectos de instalaciones de producción de biogás y algunos de ellos pretendían inyectarlo a la red de gas natural, pero con la crisis económica estos han quedado abandonados. A día de hoy el sector del biogás está estancado y no existen proyectos para inyectarlo a la red de gas natural a corto plazo.

Respecto al empleo del biogás en pilas de combustible existen proyectos de investigación en diferentes países del mundo y alguna aplicación comercial aunque no ampliamente desarrollada. En España, EMUASA está analizando su posible viabilidad comercial en EDAR pero es uno de los pocos proyectos de investigación que existen en este campo. Al igual que en el caso anterior, el biogás en la automoción no tiene desarrollo en España.

A diferencia de España numerosos países del mundo están pujando por los usos no convencionales del biogás. Estos han demostrado estar en un estado de madurez suficiente para ser rentables tanto económica como técnicamente. Estos usos tienen en común requerir un biogás de alto grado pero la tecnología de depuración del biogás es una tecnología madura. Esta se lleva usando en Estados Unidos desde 1981 y en Europa desde el año 1987. En cuanto a España estas tecnologías no se han empleado de manera comercial hasta el año 2008. En España únicamente tenemos una operando de manera comercial en Madrid con una capacidad de tratamiento de 4000 Nm³/h de gas bruto.

Las tecnologías de depuración de biogás están cogiendo fuerza en la actualidad, y por ende las aplicaciones no convencionales del mismo, debido fundamentalmente a la disminución de precios que estas están experimentando y al incremento en el precio de los combustibles. En las gráficas siguientes se puede corroborar esta tendencia y ver el número de ellas clasificadas por tamaños. Esta tendencia no se espera que cambie en un futuro cercano.

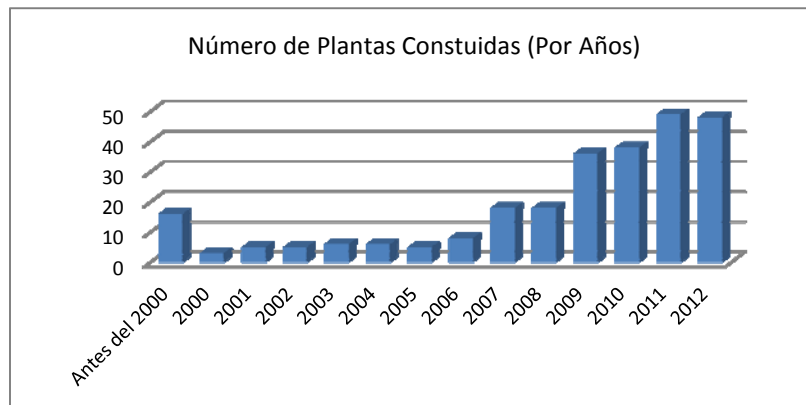


Figura 4.6.: Número de Plantas Construidas por Año. Fuente: elaborada a partir de la referencia [24].

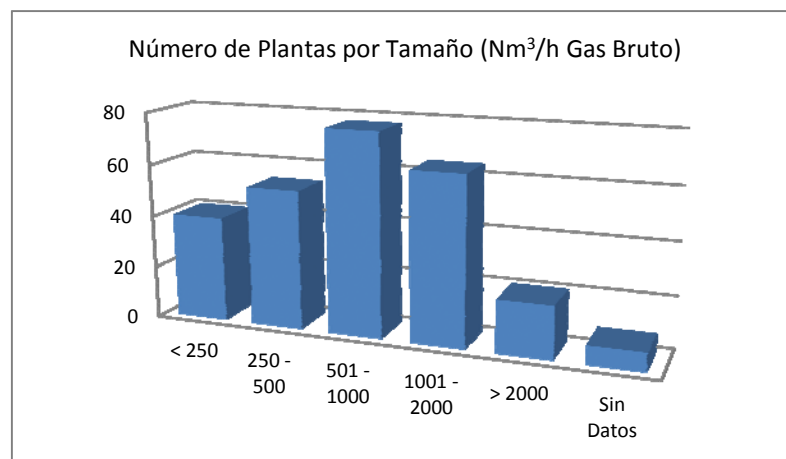


Figura 4.7.: Número de Plantas de Depuración de Biogás por tamaño. Fuente: elaborada a partir de la referencia [24].

5. Referencias

- [1] Campos Pozuelo, E., Elías Castells, X. y Flotats Ripio, X. (2012). “Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Tratamiento y valorización energética de residuos”. Díaz de Santos, Madrid.
- [2] Gendebien, A. et al. “Landfill biogas. From environment to energy”. Commission of the European Communities. Final report EUR 14017/1 EN.
- [3] Pacey, J. y DeGier, J. “The factors influencing landfill gas production” Conference proceedings “Energy from Landfill Gas”. Solihull, Gran Bretaña.
- [4] Stegman, R. y Spendlin, H. “Research activities on enhancement of biochemical processes in sanitary landfills”. Water poll. Res. J. Canada.
- [5] Suflita, J. et al. (1992). “The world’s largest landfill: A multidisciplinary investigation”. Environmental, Science and Technology, 26, 1486-1495.
- [6] Rao Gurijala, K. y Suflita, J. (1993). “Environmental factors influencing methanogenesis from refuse in landfill samples”. Env. Sci. Tech., 27, 1176-1181.
- [7] Attal, A. et al. (1992). “Anaerobic digestion of municipal wastes in landfill”. Wat. Sci. Tech., 25, 243-253.
- [8] “Aprovechamiento energético del biogás. Sistemas de gestión y manipulación del gas”. (2012). Idom y Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- [9] Marticorena, B. et al. (1993). “Prediction rules for biogas valorisation in municipal solid waste landfills”. Wat. Sci. Tech., 27, 235-241.
- [10] Coops, O.; Luning, L.; Oonk, H. y Weenk, A. (1995). “Validation of landfill gas formation models”. Sardinia 95, Fifth International Symposium by CISA, 1, 635-646.
- [11] “El sector del biogás agroindustrial en España” (2010). IDAE, Mesa sobre materia prima agraria y biocombustibles. Ministerio de Medio Ambiente.
- [12] Cuesta Santianes, M^a J. et al. (2009). “Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento”. Informe de Vigilancia Tecnológica Madri+d.
- [13] Hirschenhofer, J. H. et al. (2002). “Fuel cell handbook”, sixth edition. US Department of Energy.
- [14] Larinne, J. y Dicks, A. (2000). “Fuel cell systems explained”. Wiley and Sons, UK.
- [15] Carrette, L., Friedrich, K. A. y Stimming, U. (2001). “Fuel cells-fundamentals and applications”. Fuel Cells from Fundamental to Systems 1, 1, 5-39.
- [16] “Fuel cell handbook” (2004). US Department of Energy. Morgantown, USA.
- [17] Moure, C. (2002). “Pilas de combustible de Óxido Sólido (SOFC). Materiales utilizados en la tecnología de las SOFC”. Conferencias “Red de pilas de combustible” del CSIC.
- [18] “Inyección de biometano en las redes de distribución de gas” (2012). Dirección de Red de Gas, Eficiencia Energética y Renovables. Gas Natural Fenosa.
- [19] Ferreira Aparicio, P. (2012). “Aspectos básicos del biogás”. Jornada del Aprovechamiento Energético del Biogás.
- [20] “Presentación BioPinto”. GEDESMA. Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio.
- [21] “Biogas plant could supply public transport buses of Madrid”. NGV Journal.
- [22] “Complejo de biometanización de Valdemingómez (Madrid)” (2009). RETEMA.
- [23] “Estudio de soluciones viables para el aprovechamiento del biogás en Extremadura”. Proyecto ALTERCEXA.
- [24] “Up-grading Plant List”. IEA Bioenergy, Task 37. [www.iea-biogas.net]. [Consulta: 11-03-2015].