



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás.

Fundamentos

Apellidos, nombre	Palau Estevan, Carmen Virginia (virpaes@agf.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Natural Universidad Politécnica de Valencia



1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a presentar los fundamentos de la digestión anaerobia, particularizando en la mezcla de diversas materias primas o codigestión de residuos ganaderos, agrícolas y agroindustriales. Este proceso genera dos subproductos que pueden ser valorizados el biogás y el digestato.

2 Introducción

La digestión anaerobia es un proceso biológico que sucede de forma natural en el medio ambiente donde la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno. Por ejemplo, en el fondo de lagos o en el estómago de rumiantes se produce este fenómeno de digestión.

Pero, **¿qué productos genera este proceso que lo hace interesante?** La digestión anaerobia produce **biogás** que es una mezcla de gases combustibles utilizados en diferentes aplicaciones como fuente de energía, y también, un **digestato** o residuo orgánico que puede ser utilizado como fertilizante en suelos agrícolas.

Este fenómeno se puede reproducir a nivel industrial en digestores y aprovechar los productos resultantes con fines energéticos y/o como enmiendas orgánicas del suelo.

La mezcla de estos gases combustibles, llamada biogás, está compuesta, fundamentalmente, de metano (50-70% CH₄), dióxido de carbono (30-50% CO₂), ácido sulfhídrico (<2% SH₂) y otros gases (NH₃, N₂, H₂...). El metano es el principal gas combustible y, la mezcla de gases tiene una potencia calorífica en torno a 5500 kcal/m³ (con un 60% de CH₄).

¿Cuáles son las equivalencias con otros combustibles? La comparativa se muestra en la Figura 1.

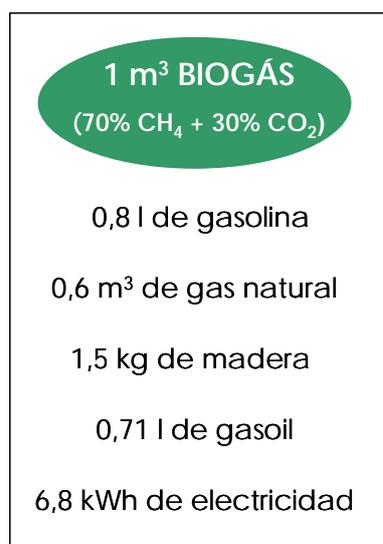


Figura 1. Equivalencias de biogás y otros combustibles.
Fuente: CIEMAT.



De esta forma, **abordaremos el tema atendiendo a los siguientes puntos:**

1. Conceptos básicos: Descripción del proceso, parámetros de control y tipo de tecnologías.
2. Co-digestión como técnica que mejora el proceso.
3. Ventajas e inconvenientes.

3 Objetivos

Una vez leído con detenimiento este documento el lector será capaz de:

- entender el proceso de digestión anaerobia y cuales son los parámetros que intervienen.
- saber las materias primas que mezcladas optimizan el proceso de co-digestión.
- distinguir las ventajas e inconvenientes de la co-digestión anaerobia.

4 Conceptos básicos

La digestión anaerobia es un proceso biológico cuyos antecedentes primarios se remontan a 1776 cuando Volta descubrió que al descomponerse los vegetales en medios al abrigo del aire se generaba un gas con alto contenido en metano.

Dalton, en 1804, estableció la composición química del metano (CH_4) y Beauchamp a mediados del siglo XIX estableció la presencia de microorganismos en estos procesos de digestión. En 1884, Pasteur investigó sobre la producción de biogás a partir de residuos animales, proponiendo la utilización del biogás para la iluminación de las calles (Muñoz Valero et al., 1987).

Tras la Segunda Guerra Mundial, los tratamientos aerobios y terciarios fueron los grandes protagonistas en cuanto al procesamiento de residuos. Sin embargo, y con las recientes crisis energéticas, la tecnificación del proceso de digestión anaerobia ha tomado un nuevo auge, al ser un proceso energéticamente favorable.

4.1 El proceso biológico de digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso en el que la materia orgánica es degradada por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno, originando una mezcla, fundamentalmente, de metano y dióxido de carbono (biogás) y una suspensión acuosa de materiales sólidos degradados junto con nitrógeno, fósforo y otros elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa.

El proceso engloba diferentes etapas en las que intervienen diversas poblaciones de bacterias como se muestra en la Figura 2.

La primera fase es la **hidrólisis** de la materia orgánica, donde los compuestos complejos se transforman en moléculas solubles y degradables como azúcares, aminoácidos, alcoholes y ácidos de cadena larga. Este pretratamiento del material mejora propiedades como la viscosidad y la solubilidad facilitando la



degradación del producto en fases posteriores y aumentando la velocidad del proceso.

En la siguiente etapa, **acidogénesis**, las bacterias acidogénicas actúan sobre los compuestos provenientes de la hidrólisis transformándolos en ácidos de cadenas más cortas como ácido acético, butírico, propiónico y valérico, mientras que en la acetogénesis, estos productos intermedios son convertidos por las bacterias acetogénicas en ácido acético, H_2 y CO_2 .

En la última etapa del proceso, **metanogénesis**, las bacterias metanogénicas forman metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) a partir de los compuestos anteriores.

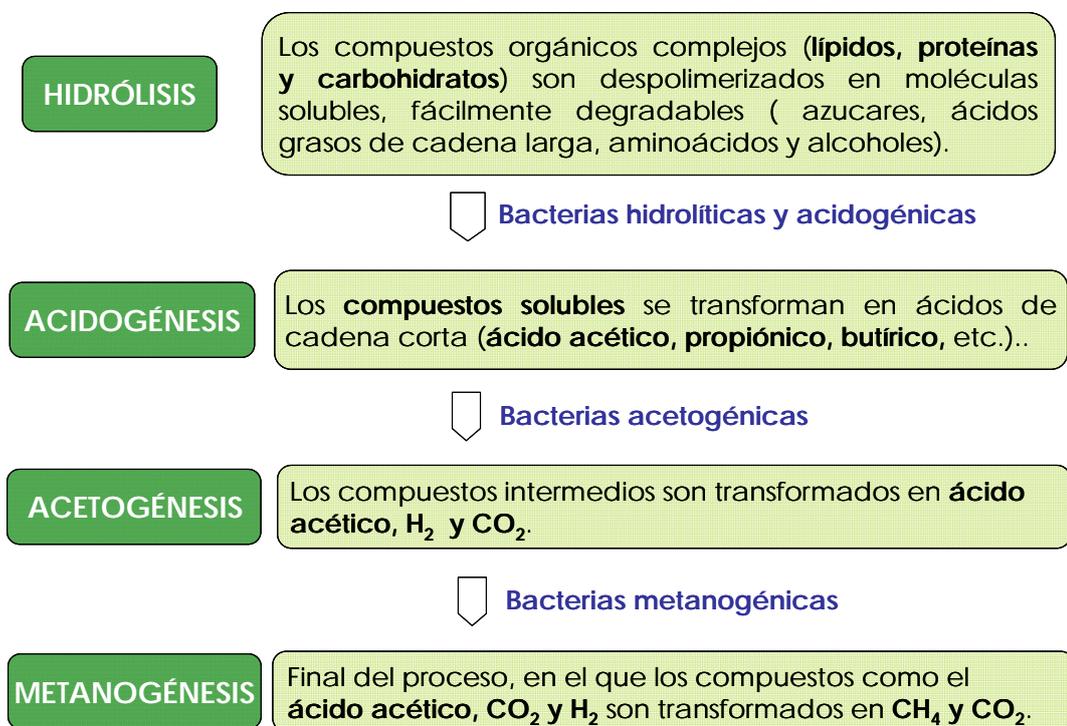


Figura 2 . Etapas del proceso de digestión anaerobia.

Pero, ¿estas reacciones se suceden de forma natural y sin alteraciones generando siempre, eficientemente, biogás? La respuesta es no, la digestión anaerobia es un proceso biológico vivo en el que multitud de microorganismos intervienen y pueden ser afectadas sus poblaciones.

La composición química del sustrato y las condiciones de funcionamiento del proceso condicionan el desarrollo de las diferentes poblaciones bacterianas. De esta forma, las características de la materia prima (humedad, carga orgánica, posibles inhibidores, etc) y los parámetros ambientales y operacionales del sistema son determinantes para obtener buenos rendimientos de producción de biogás.

Por este motivo, es recomendable que las condiciones bajo las que se desarrolla la actividad microbiana sean constantes. Dichas condiciones dependen de numerosos parámetros, usualmente clasificados en parámetros ambientales y operacionales (Elias, 2005).



4.2 Parámetros de control del proceso

Se conocen ya con mucha exactitud los parámetros fundamentales que regulan la fermentación anaerobia, tales como temperatura, pH, relación carbono/nitrógeno fósforo, tiempo de retención hidráulica, etc... Estos conocimientos han permitido en los últimos años se alcance un gran progreso en el diseño de digestores, mejorando notablemente su eficacia, abaratando su coste e introduciendo los elementos de seguridad y control del proceso necesarios.

¿Cuáles son los **parámetros ambientales?**, aquellos sobre los que no se puede actuar directamente cuando el proceso está en marcha, sino que dependen de las características de la materia prima y del desarrollo in-situ de las reacciones químicas. ¿Y los **parámetros operacionales?** Son los que el técnico puede controlar y actuar sobre ellos durante el proceso de producción de biogás a partir de ciertas señales que informan sobre el desarrollo del mismo.

4.2.1 Parámetros ambientales

La medición del pH del proceso es una variable indicadora de su desarrollo. El óptimo está alrededor de 7 aunque se puede operar en el intervalo 6,5 a 7.5. Si el pH desciende por debajo de 4,5-5 puede producirse una inhibición de la actividad microbiana que afecta a las bacterias fermentativas disminuyendo la velocidad de digestión. El descenso del pH puede deberse a varias causas como una carga orgánica excesiva, amplias variaciones de temperatura, acumulación de costra en el digestor, presencia de sustancias no deseables, etc.

El pH es también un parámetro que permite diagnosticar el proceso de digestión, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Por ejemplo, una sobrecarga de materia orgánica puede producir desequilibrios entre la producción y consumo de ácidos grasos volátiles, y consecuentemente provocar el descenso del pH y la acidificando el reactor. En función de la alcalinidad del sustrato, este efecto será más o menos acusado.

No obstante, el pH puede resultar en ocasiones una variable demasiado lenta para diagnosticar problemas, y se suele recurrir al análisis del contenido en metano del biogás como indicador de anomalías en el proceso.

Otro parámetro es el contenido en sólidos totales (ST) de la materia prima. Este punto, afecta al tipo de fermentación metánica con biomasa, dando origen a fermentaciones por vía seca y por vía húmeda.

El agua contenida en los residuos no produce biogás pero sí que es esencial para garantizar un buen rendimiento del proceso. Los tratamientos por vía húmeda, con un contenido en ST inferior al 15%, son los más habituales, ya que el bombeo, transporte y agitación en el digestor es más sencilla y genera menos problemas de funcionamiento que en vía seca.

Además, las bacterias dentro del digestor deben tener contenidos en C y N adecuados para su correcto crecimiento. De esta forma, los nutrientes dependerán de la composición del material introducido en el digestor. La relación C/N debe estar entorno a 30/1, valores inferiores pueden disminuir la velocidad de reacción (Elias, 2005). En general, los fangos de depuradoras o la FORSU (Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos), no presenta problemas de nutrientes. Otros, sustratos con una relación C/N baja, como las deyecciones ganaderas, pueden producir un incremento de amonio en el



digestor, y por tanto, la inhibición de la producción de metano. La combinación adecuada de la materia prima a codigerir condiciona el desarrollo del proceso y la producción de biogás.

Asimismo, en la composición del material existen inhibidores que impiden la fermentación metánica, por lo que se deberá llevar un control exhaustivo en laboratorio de la biomasa para evitar problemas. Por ejemplo, concentraciones elevadas de amoníaco (producidas por exceso de nitrógeno en la biomasa) inhiben el proceso, también lo inhiben elevadas concentraciones de sales minerales, pesticidas, detergentes, metales pesados, antibióticos o productos desinfectantes

4.2.2 Parámetros operacionales

La temperatura es una de las variables del proceso más críticas que afecta directamente a la velocidad de producción de ácidos y al rendimiento del proceso. De forma general, temperaturas más altas aceleran las reacciones químicas y biológicas del proceso, aunque también aumentan los requerimientos energéticos y pueden disminuir la estabilidad del proceso (Fannin, 1987).

A efectos de tratamiento de la biomasa, existen tres rangos de temperatura con producción de biogás en diferentes grados de eficiencia:

- o Psicofílico: Para temperaturas inferiores a 25°C, en donde el máximo rendimiento se logra a esta temperatura. Con temperaturas inferiores a 15°C la velocidad del proceso obtiene rendimientos bajos.
- o Mesofílico: Para un intervalo de temperaturas entre los 25 y 45°C, con un óptimo entre los 33 y 38°C para la producción de biogás, habiéndose comprobado que esta producción aumenta en un 1 % por cada grado que se eleve la temperatura. No obstante, desde el punto de vista de optimizar la energía neta producida, es decir, analizando el balance energético de una instalación, el óptimo se sitúa entre los 35-37°C. Actualmente, el proceso mesofílico es el más utilizado para la digestión anaerobia.
- o Termofílico: Para un intervalo entre los 45 - 65°C con un óptimo productivo alrededor de los 60°C. El proceso es mucho más rápido pero por el contrario presenta un balance energético más desfavorable y aumentan los problemas de control del digestor.

Otros factores a controlar son el tiempo de retención hidráulico (TRH) y la velocidad de carga orgánica (VCO), que son parámetros de diseño que dependen de la tecnología utilizada y del tipo de sustrato.

El TRH es el período medio de permanencia de un sustrato en el digestor, que permite el desarrollo de la población bacteriana y del proceso de producción de biogás. Este se obtiene dividiendo el volumen total del digestor entre el caudal de tratamiento, y se expresa en unidades de tiempo, normalmente en horas o días.

El tiempo de retención es un factor muy importante en el proceso de digestión anaerobia. En términos globales puede afirmarse que, a igualdad del resto de



condiciones, al aumentar el tiempo de retención se consigue una mejor digestión de la materia orgánica, pero se precisa un mayor volumen del digestor. El tiempo de retención mínimo al que se puede operar depende, fundamentalmente, de la temperatura y del procedimiento de digestión empleado. Actualmente, con los sistemas con mezcla total mediante agitador tienen un tiempo de retención en torno a 25-35 días trabajando dentro del rango mesófilo de temperatura (Al Seadi et al. 2008).

La VCO es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen del digestor y tiempo. Valores bajos de VCO implican baja concentración de sustrato y/o elevado tiempo de retención. Un incremento en la velocidad de carga orgánica implica la reducción en la producción de biogás por unidad de materia orgánica.

Finalmente, la agitación del material a digerir en los reactores anaerobios consigue un buen contacto del sustrato fresco y de la población bacteriana, favorece la uniformidad de temperatura en toda la biomasa aumentando la eficiencia del digestor al evitar la formación de espacios inactivos, proporciona una densidad uniforme en la población bacteriana y previene la formación de costras y espumas (Elias, 2005).

4.3 Tecnologías para la digestión anaerobia

Las tecnologías actuales de fermentación anaerobia se clasifican en sistemas discontinuos y sistemas continuos.

En los sistemas de producción de biogás discontinuos, también conocidos como sistemas bañera, el digestor se llena completamente con sustrato fresco y se cierra herméticamente. El sustrato es degradado hasta el final del tiempo de digestión, sin añadir o extraer nada del mismo. La producción de biogás comienza lentamente tras el llenado y sellado, creciendo hasta alcanzar un máximo y disminuyendo después. Tras el proceso, el tanque es vaciado y una pequeña parte del digestato permanece para inocular el nuevo sustrato.

Actualmente los sistemas más avanzados y habituales en digestión anaerobia de biomasa son los continuos. Éstos se caracterizan por una alimentación regular del digestor, la misma cantidad de sustrato es añadida y extraída diariamente. Como resultado se obtiene una producción de biogás constante y controlada que se puede almacenar en un gasómetro. El biogás antes de su aprovechamiento como gas combustible se depura mediante una serie de filtros (Figura 3).

El biogás producido se puede aprovechar en sistemas de cogeneración donde se quema en motores de combustión interna generando electricidad y simultáneamente recuperando el calor residual. También, puede utilizarse en calderas para la generación de vapor o calentamiento de un fluido para producción energía térmica.

El principal inconveniente de este sistema es el consumo de energía necesaria para calentar los digestores en el rango de temperatura de trabajo.

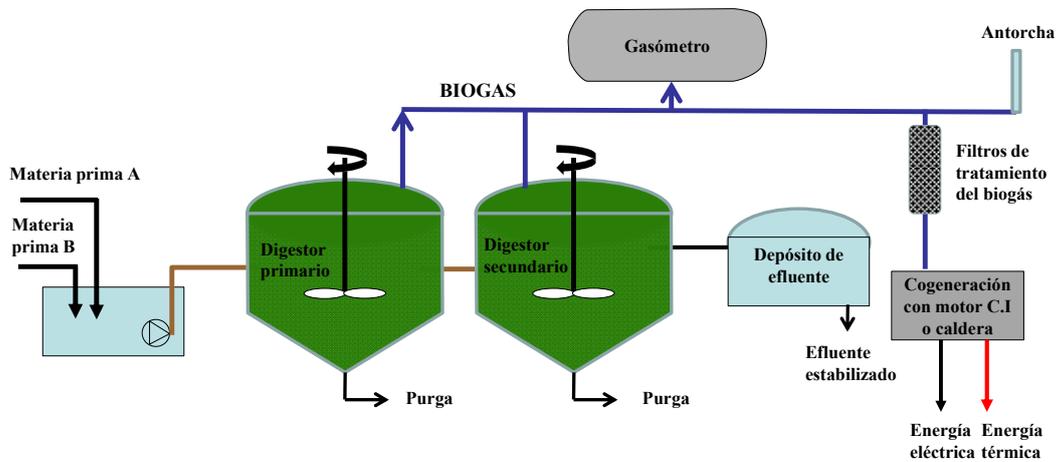


Figura 3. Diagrama del proceso de producción de biogás.

Los tipos de digestores y su grado de tecnificación es diversa, y no es objeto de este artículo. El más común en digestión anaerobia de biomasa en el ámbito rural es el reactor de mezcla completa con agitación interna con un digestor primario y otro secundario para mejorar el proceso y sus rendimientos (Figura 4).



Figura 4. Digestores anaerobios primario y secundario.

5 Co-digestión de residuos

Pero, ¿es eficiente la digestión anaerobia con cualquier tipo de residuo? La digestión conjunta de dos o más substratos de diferente origen y composición se constata como una forma de optimización de este proceso, ya que aumenta la producción de biogás.

La mezcla de diferentes substratos, o **co-digestión**, compensa las carencias de cada uno por separado. Además de esta ventaja, la co-digestión nos permite compartir instalaciones de tratamiento de diversos residuos y compensar las variaciones temporales de producción de cada substrato, a la vez que reducimos costes de inversión y de explotación (Flotats, 2008).



La co-digestión puede realizarse entre diferentes tipos de sustratos, aunque habitualmente en zonas rurales es entre purines, con una baja tasa de producción de metano pero con alto contenido en agua y nutrientes, y con alta capacidad tampón, y otros sustratos fácilmente degradables como residuos de agroindustriales, residuos orgánicos urbanos, residuos animales o cultivos energéticos.

En la co-digestión la proporción entre los sustratos utilizados es variable y afecta a la producción final de biogás y a su contenido en metano. En el caso de la fermentación de residuo ganadero y cultivos energéticos la proporción suele ser de 60% residuo ganadero y 40% de residuo vegetal o cultivo energético, pudiendo variar ligeramente, y obteniendo un contenido en metano de entre el 51 y el 55% (PROBIOGAS, 2009).

6 Resumen

La digestión anaerobia se presenta como un método de obtención de energía interesante en zonas rurales por el aprovechamiento que realiza de los residuos generados en la zona, tanto residuos ganaderos en granjas como residuos de poda o de industrias agroalimentarias. La eliminación de estos residuos permite la estabilización de la materia orgánica y la reducción de malos olores, valorizando un residuo medioambientalmente difícil de eliminar.

En este artículo se ha presentado que la digestión conjunta de estos residuos o co-digestión anaerobia puede ser muy ventajosa ya que los rendimientos obtenidos en producción de biogás son superiores a los obtenidos de cada residuo por separado.

7 Bibliografía

7.1 Libros y publicaciones consultadas:

AINIA. Dpto Calidad y Medio Ambiente. **Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales.**

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. **Biogás Handbook.** 2008. University of Southern Denmark Esbjerg.

Elias, X. **Tratamiento y valorización energética de residuos.** (2005). Ed. Diaz de Santos.

Flotats, X., Sarquella, L. **Producció de biogás per codigestió anaeròbia.** Col·lecció Quadern Pràctic. Número 1. 2008. Institut Català d'Energia (ICAEN).

IDAE. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). **Biomasa: Digestores anaerobios** (2007).

Probiogas. **Manual del estado del arte de Co-digestión anaerobia de los residuos ganaderos y agroindustriales.** (2009) PS-120000-2007-6. Diversas instituciones y autores.



7.2 Páginas web de interés y referencias de fuentes electrónicas:

Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE):

<http://www.idae.es>

Institut Català de l'Energia (ICAEN):

<http://www.icaen.net>

Àmbit d'Energia del Departament d'Economia i Finances
de la Generalitat de Catalunya:

http://www.gencat.cat/economia/ambits/energia_mines/index.html

Gestió Integral de Residus Orgànics, Centre Tecnològic (GIROCT):

<http://www.giroct.net>

<http://gidr.gesfer.cat/tractaments/elsprincipals-tractaments/probiogas-manual-de-estado-del-arte.pdf>

8 Cuestiones

Una vez leído el documento, el alumno puede responder a las siguientes cuestiones que contribuirán a asimilar su contenido:

1. Busca información sobre algunas de las especies de bacterias que intervienen en el proceso de digestión anaerobia.
2. ¿Cuáles son las fases principales del proceso de digestión anaerobia? Enuméralas.
3. ¿Cuáles son los parámetros del proceso sobre los que puede actuar el técnico? Indica dos ejemplos.
4. ¿Qué es la codigestión anaerobia? ¿qué ventajas tiene?.