



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Estudio básico del biogás y nuevas tecnologías para producirlo en la actualidad

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL QUÍMICA



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor: Juan Manuel Carrillo Erdozain
Director: Joaquín Serrano Aniorte

Cartagena, 24 de Julio de 2019

Índice

1	INTRODUCCIÓN.....	4
2	COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS	19
3	ETAPAS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	20
3.1	Etapa I: Hidrólisis.....	20
3.2	Etapa II: Acidogénesis o etapa fermentativa.....	22
3.3	Etapa III: Acetogénesis	23
3.4	Etapa IV: Metanogénesis.....	23
4	BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	26
5	BIODIGESTOR.....	27
5.1	Componentes de un digestor anaeróbico.....	28
5.1.1	Reactor (Biodigestor)	29
5.1.2	Entrada del efluente.....	30
5.1.3	Salida del efluente.....	30
5.1.4	Extracción de lodos	30
5.1.5	Sistema de gas.....	31
5.1.6	Muestreador.....	41
5.1.7	Sistema de calentamiento del digestor.....	41
5.2	Clases de biodigestores.....	42
5.2.1	Biodigestores de flujo discontinuo.....	42
5.2.2	Biodigestores de flujo semicontinuo.....	43
5.2.3	Biodigestores de flujo continuo	43
5.3	Adaptación de los biodigestores	47
5.4	Diseño de los biodigestores	51
6	EL BIODIGESTOR COMO ALTERNATIVA EN MEDIO RURAL.....	53
7	USOS DEL BIOGÁS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA PRODUCIRLO.....	58
7.1	Ácido sulfhídrico (H ₂ S).....	60
7.2	Dióxido de carbono (CO ₂).....	61
7.3	Agua.....	61
7.4	Siloxanos.....	61

8 ESTUDIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE CARTAGENA	68
9 Conclusiones	84
10 Referencias y Bibliografía	86



1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el biogás está ganando gran importancia como energía renovable, aunque su conocimiento y las diferentes formas de generarlo y emplearlo provienen de hace 5000 años. Y es que, según escritos antiguos, podemos afirmar que la utilización de los desechos orgánicos para producir energía se originó mucho antes del nacimiento de Cristo, ya que los sumerios, (civilización situada en la zona sur de la antigua Mesopotamia, entre los ríos Éufrates y Tigris) realizaban la “limpieza” de residuos orgánicos de forma anaeróbica allá por el año 3000 antes de Cristo. (Deublein y Steinhauser, 2008).

Además existen documentos, (los cuales se creen que proceden del libro “Divisament du monde” más conocido como “El libro de las maravillas del mundo”,) relacionados con el viaje de Marco Polo a China, donde se nombran unos contenedores que recogían las aguas residuales de la antigua China, sin embargo, no se sabe con exactitud si esos recipientes era solamente para la obtención del agua o si se hacía lo mismo con el gas procedente de éstos desechos ni tampoco si posteriormente se le daba algún uso concreto a ese gas. También hay distintas referencias que hablan de este hecho en la literatura china procedente del tercer milenio antes de Cristo.

Por otra parte, hay antecedentes que recogen que la primera vez que se utilizó el biogás fue con el fin de calentar las aguas termales situadas en unos baños públicos de la antigua Asiria, (región situada al norte de Mesopotamia que data del año 2600 antes de Cristo y fue originada a orillas del río Tigris). (“BIOGAS Asia Pacific Forum | Events | Asia | Sustainable Business,” n.d.)

Muchos años después, (año 50 después de Cristo) el erudito Plinio (Figura 1) narra cómo se podía apreciar una especie de brillo procedente de la zona baja de los pantanos. Sin embargo, no es hasta el siglo XVI cuando se recogen por primera vez escritos de la antigua Persia, dónde se emplea el biogás para un fin más “parecido” a lo que conocemos actualmente. (Brakel, 1980; Lusk, 1998).



Figura 1. Gayo Plinio Segundo conocido como Plinio el Viejo

Gayo Plinio fue el primer autor que documentó por escrito observaciones realizadas en pantanos o embalsamientos de líquidos.

(Geoffrey - Cesare Cantù. Grande Illustrazione del Lombardo Veneto ossia storia delle città, dei borghi etc. Milano 1859. Vol. III [Figura 1]. Recuperado de <https://www.alamy.es>)

A pesar de saber de primera mano información más o menos detallada de que efectivamente se trataban los residuos orgánicos, hay cierta incertidumbre cuando intentamos establecer dónde y cuándo se creó el primer biodigestor como tal. Pues infinidad de autores atribuyen que el digestor anaeróbico surgió en la India, en el año 1859, con el fin de producir biogás a partir de las aguas residuales producidas en el asilo-hospital de leproso de Matunga, situado cerca de Mumbai, (lo que conocemos actualmente como Bombay). (Sathianathan, 1975; Deublein y Steinhauser, 2008)

De esta manera se conseguía sanear las aguas residuales del lugar, además de abastecer de energía y luz al hospital en caso de que hubiese alguna emergencia. Sin embargo, muchas personas dudan de que este fue el primer biodigestor, pues existen datos que confirman la fabricación de un digestor anaeróbico por el año 1840 en la ciudad de Otago, situada en la parte sureste de Nueva Zelanda.

Y es que, con toda la información recogida a lo largo de los años, se puede afirmar con creces de que la generación de biogás ha sido una técnica realmente utilizada en el pasado. Recapitulando la gran cantidad de estudios realizados sobre el biogás, los primeros datos de rigor científico que se conocen son de Jan Baptista Van Helmont, alrededor de la primera mitad del siglo XVII. Este físico, químico y médico, procedente de Bruselas, determinó que tras la degradación de la materia orgánica se generaban una serie de gases que eran inflamables.

Sin embargo, otros escritos aseguran que fue Shirley quien verdaderamente descubrió el origen del biogás o también conocido como el gas de los pantanos por el año 1667, Shirley afirmó que el autor de los denominados “fuegos fatuos” era este gas, pero más adelante se reveló que Shirley simplemente se había basado en su investigación mediante los estudios previos realizados por Jan Baptista Van Helmont, (Santhianathan, 1975).

Con el paso de los años se fue estudiando con mayor profundidad este proceso, pues en el año 1682 R. Boyle y su ayudante Denis Papin, pronosticaron la gran facilidad de poder obtener un gas gracias a la descomposición de desechos animales y vegetales (Pine, 1971). Por último, cabe destacar que el clérigo inglés Stephen Hales en su obra, “Vegetable Staticks” publicada en el siglo XVIII, trata sobre el tema de la degradación de la materia orgánica.

Años después, en 1764, Benjamín Franklin (Figura 2) detalló que uno de los factores determinantes en el incendio que afectó a un lago de poca profundidad en New Jersey fue el biogás. Este acontecimiento fue redactado por Joseph Priestly en Inglaterra por el año 1790. En este artículo, el científico y teólogo del siglo XVIII, recoge sus experiencias vividas con este gas el cual él denominó, “aire inflamable” (Titjen, 1975).



Figura 2. Estatua de Benjamín Franklin en Boston

Benjamín Franklin determinó (a causa de un incendio) la combustibilidad del biogás (conocido por aquel entonces como aire inflamable)

(Wildcat Dunny. Benjamin Franklin statue at Old City Hall on the Freedom Trail. 23 October 2004. [Figura 2]. Recuperado de <https://www.freepik.es>)

Siguiendo el orden cronológico de los acontecimientos, el 14 de noviembre de 1776, se lleva a cabo un gran descubrimiento, pues Alejandro Volta (químico y físico italiano) promulga en un escrito, “Aria infiammabile native delle Paludi”, donde explica un suceso que ocurría en el lago de Como. Alejandro Volta afirmaba que en dicho lago se generaba un gas de carácter explosivo en cuanto se producía una agitación de los sólidos del interior del lago, aparte de esto, el científico determinó que existía relación totalmente directa entre la materia orgánica que se degradaba en la parte baja de la superficie del lago y la cantidad de gas inflamable que se originaba, además sus estudios revelaron que el compuesto principal de este gas de los pantanos (posteriormente conocido como gas natural) era el metano. (Stafford y Hawkes, 1980). Este hallazgo fue contemplado por todos los científicos de esa época, por lo que

en los años posteriores se empezó a traducir en diversos idiomas estos escritos con el fin de dar a conocer tal innovación.

Con la llegada del siglo XIX los avances tecnológicos y las investigaciones sobre este tema fueron aumentando en gran medida, pues en el año 1804, el químico, matemático y meteorólogo británico John Dalton, realizó un gran avance en este campo, pues fue capaz de definir la estructura química del metano y ver su relación con el biogás.

Dos años después, William Henry analizó concretamente el origen del gas de los pantanos mediante análisis más exhaustivos.

Ya en 1808 se lleva a cabo un acontecimiento que está considerado como el inicio de la investigación del biogás a como se conoce en la actualidad, pues fue el químico de nacionalidad inglesa, Humphry Davy, quien fue capaz de generar metano en un laboratorio utilizando como materia prima heces de ganado. Tras la muerte de Humphry, es su alumno Faraday (el cual nació en Surrey) el que continúa con sus investigaciones, desarrollando varios experimentos con el gas de los pantanos y los hidrocarburos que genera dicho gas.

Finalmente es en 1821 cuando Amedeo Avogadro esclarece la estructura química del metano como se conoce en la actualidad, (CH_4). ([“Biogas Upgradation | Sustainable Solutions,” n.d.](#)) Francia se convierte en el país donde se inicia una gran investigación más analítica y científica con el fin de entender mejor la fermentación anaeróbica allá por la segunda mitad del siglo XIX. El propósito fundamental por el que se empezó a utilizar la fermentación fue para eliminar el mal olor que producían las aguas residuales. Y es que, durante el proceso de investigación, se hallaron muchísimos de los microorganismos que se conocen actualmente en esta transformación.

Jules de Reiset (químico agrícola francés) halló un avance sobre el metano, pues descubrió que este compuesto se genera cuando se degrada la materia orgánica, además planteó que conocer sobre el metano ayudaría a entender mejor la fermentación anaeróbica.

Sin embargo, no es hasta el año 1860 en el que se lleva a cabo el primer manejo de la digestión anaeróbica con el fin de realizar un tratamiento de las aguas de alcantarillado, las cuales se introducían en una cámara de aire hermética simple. Esta labor fue elaborada por Mouras en Francia. ([McCarty, 2001](#))

A principios del año 1866 se evidenció rotundamente, que la generación de metano en la obtención de biogás era un proceso biológico. Este hallazgo fue realizado por Antoine Béchamp (Figura 3), el cual fue un químico y biólogo francés muy reconocido, fue escritos de ese tiempo nos muestra que tenía cierta rivalidad con Louis Pasteur. Sin embargo, otros documentos aseguran que este descubrimiento fue obra de Franz Tappeiner.

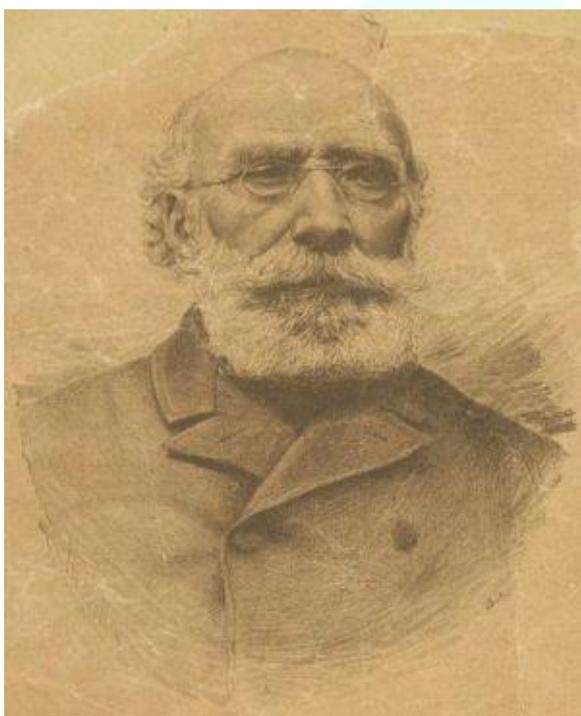


Figura 3. Antoine Béchamp

Antoine Béchamp fue un químico y biólogo francés que establece las bases para posteriores estudios sobre la fermentación anaeróbica.

(Ethel Douglas Hume. ¿Béchamp o Pasteur? (Un Capítulo Perdido en la Historia de la Biología). 1923. [Figura 3]. Recuperado de <https://www.academia.edu>)

Seguidamente, en el 1868, las investigaciones de Antoine Béchamp continuaron hasta tal punto que él pudo apreciar distintas asociaciones de microorganismos capaces de transformar el etanol en metano, además de descubrir que los productos generados durante el desarrollo de la fermentación anaeróbica necesitaban de los sustratos.

Años posteriores a este hallazgo, **Propoff** utilizó elementos celulósicos para el estudio de los lodos fluviales (lo que se conoce actualmente como fangos) mientras el proceso de la fermentación anaeróbica se estaba produciendo, obteniendo hidrógeno y metano. De esta forma **descubrió que el gas originado** tras esta fase **sólo se llevaba a cabo con ausencia de oxígeno**. Una vez analizó ese apartado, Propoff **estudió la influencia de la temperatura en la fermentación**.

Tras una serie de experimentos pudo estimar que se generaba biogás desde valores de temperaturas de 6°C hasta 50°C.

Además de todo esto, Propoff afirmó que **la diferencia de temperaturas no provocaba cambio alguno en la estructura del gas.** (“Tema 7 metabolismo celular anabolismo,” n.d.)

La comunidad de científicos comenzó a interesarse cada vez más por este tema, así fue que Herter, por el año 1876, destacó que el acetato situado en aguas residuales era capaz de generar metano y dióxido de carbono en proporciones totalmente similares.

Y es que hasta Louis Pasteur (Figura 4) se informó por el tema del biogás, pues en 1884 probó a generar este gas utilizando heces de caballo encontradas por las calles de París. Tal fue el afán del químico y bacteriólogo francés y su aprendiz (Ulysse Gayon), que llegó a recolectar nada más y nada menos que 100 litros de biogás por metro cúbico de estiércol, gracias a la mezcla de esta materia orgánica y agua a 35°C en condiciones anaeróbicas. Ese mismo año llegó a la Academia de Ciencias de Francia un estudio sobre la generación de metano empleando los desechos orgánicos de los animales procedentes de las granjas. Este trabajo fue enviado por Pastnier.

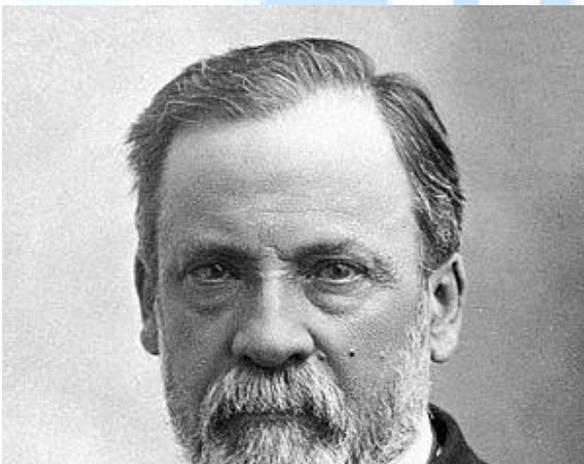


Figura 4. Louis Pasteur

Louis Pasteur junto con Gayon realizó estudios para la generación del metano a partir del acetato, además fue un precursor de los beneficios energéticos sobre la digestión anaeróbica

(Paul Nadar. Portrait of Louis Pasteur [1822 - 1895], French microbiologist and chemist. 1878 (detail). [Figura 4]. Recuperado de <http://lasobrasdelexperimental.blogspot.com>)

Un par de años después fue el científico ruso Omelianski quien realizó un aporte a este tema, verificando si sus antecesores estaban en lo cierto con respecto a la generación de metano mediante materia orgánica en descomposición, llevando a cabo una prueba con heces de vaca.

Un año después, el químico alemán Felix Hoppe-Seyler comprobó que, efectivamente, a partir del acetato se podía originar metano. (Roediger H. 1955 “Die anaerobe alkalische Schalmmfaulung”. Gwf, Schriftenreihe Wasser, Abwasser Bd 1.R. Oldenbourg Verlag.)

Poco a poco los avances sobre este proceso permitían realizar grandes tecnologías para favorecer el nivel de vida de las distintas ciudades de la época, pues **en el año 1890, Donald Cameron creó una gran fosa séptica en la ciudad de Exeter** (capital del condado de Devon, situada en la parte oeste de Inglaterra) **para sanear todas las aguas residuales. Este acontecimiento permitió años más tarde iluminar toda la ciudad empleando el gas obtenido por dicha fosa.**

Cuando el discípulo de Louis Pasteur, Gayon exhibió sus investigaciones sobre la digestión anaeróbica, **Pasteur insistió de que la fermentación anaeróbica debía estudiarse más a fondo, pues de ella se podían obtener grandes mejoras en el ámbito energético.** Incluso declaró que todo el estiércol que había recogido durante sus años de investigación en París, era más que suficiente para dotar de iluminación la capital francesa. Sin embargo, esta noticia no fue tomada en serio y el proyecto nunca se llevó a cabo, (información recogida por el periódico “Le Figaro” de esa época). Aun así, podemos afirmar que, tras este entusiasmo por los eruditos de este año, los usos de las energías renovables comenzaron a ganar importancia.

Gracias a Donald Cameron y sus investigaciones, se consiguió perfeccionar la forma de abastecer de luz la ciudad de Exeter mediante el metano procedente del gas recolectado en la fermentación anaeróbica entre los años 1895 y 1896. Siendo este experimento catalogado como la primera aplicación empleando el metano (Figura 5). (Mc Cabe y Eckenfelder, 1957).

Por otra parte, Omelianski, basándose en los apuntes de Propoff, realizó un experimento juntando limo de río (tipo de sedimentos de pequeña forma que es conducido o bien por los ríos o por el viento. El tamaño puede oscilar entre los 0,0039 mm y los 0,0625 mm) en una solución inorgánica utilizando celulosa como fuente de energía, lo que provocó la formación de ácido y gas. Además, comprobó que, efectivamente, en este proceso se llevaba a cabo la fermentación en un plazo relativamente corto de tiempo. (Waskman y Skinner, 1925).

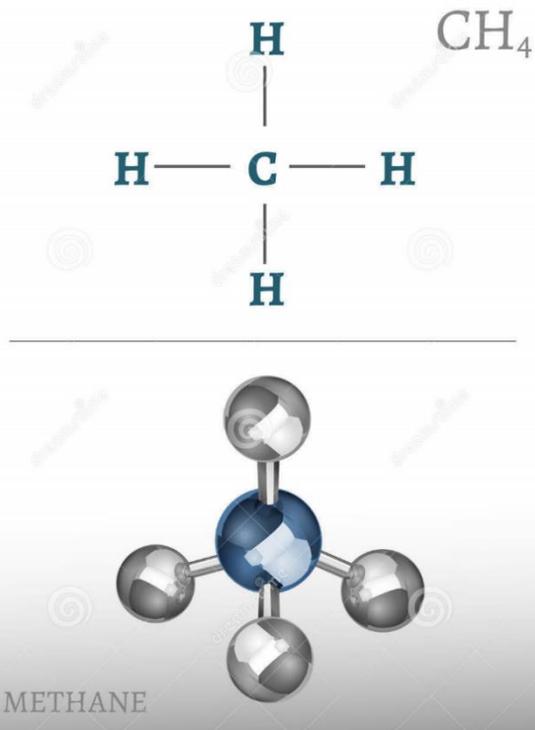


Figura 5. Estructura química y tridimensional del metano

(Anna Bocharova. Imagen de la molécula del metano. [Figura 5]. Recuperado de <https://es.dreamstime.com.>)

morfológicas de las bacterias del metano, surgiendo así, de las manos de Schengon, una forma más sencilla de entender la transformación del metano.

Con el paso de los años, se fue perfeccionando este proceso, así fue que Travis separó esta fase en dos etapas, una se centraba más en el saneamiento del agua mientras que la otra abarcaba la producción de metano.

Otro investigador alemán, llamado Söhngen, hizo un caso parecido a Travis, pero con el acetato, es decir, separó su proceso de obtención en dos etapas. Ese mismo año, Karl Imhoff (ingeniero civil de Alemania) diseñó y ayudó a edificar varias unidades que realizaban la digestión anaeróbica para el tratamiento de las aguas residuales del río Ruhr. Además, este ingeniero creó el llamado “tanque Imhoff” (Figura 6), el cual poseía zonas separadas dentro de él, con el fin de almacenar en una parte los sedimentos y en la otra, generarse la fermentación anaeróbica. Se calcula que el tiempo medio que podía estar

Más adelante, en concreto a finales del siglo XIX se confirmó algo que ya se venía investigando de hace tiempo, pues existían microorganismos que participaban en la fase de la fermentación. (Barker, 1956). En este mismo periodo de tiempo, se diseñan las primeras plantas de producción de biogás por la zona sur de China. Estas industrias utilizan el mismo método de descomposición de la materia orgánica y la recolección del biogás posterior, aplicando las mismas bases que se emplean actualmente.

En el año 1900 se evidenció en la India que los desechos humanos también servían para realizar la fermentación anaeróbica y obtener metano.

Un año después, se consiguió analizar con más profundidad las propiedades

funcionando este tanque era de 60 días, pues pasado ese tiempo toda la materia orgánica se eliminaba completamente.

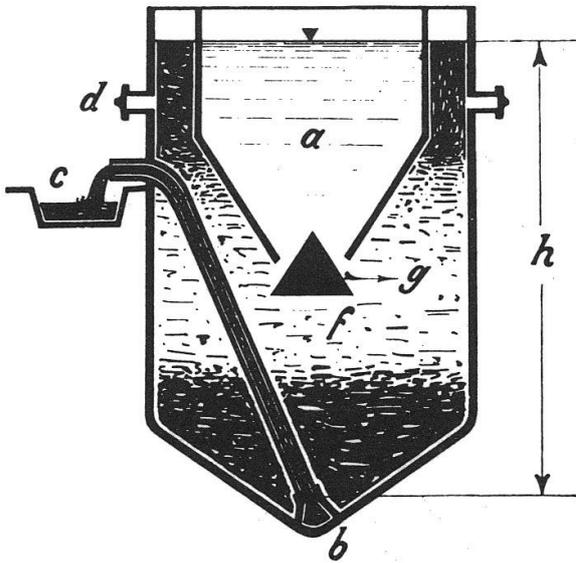


Figura 6. Corte lateral de un tanque Imhoff

Diseción de un tanque Imhoff, utilizado para almacenar sedimentos procedentes de la fermentación anaeróbica. Usado en 1907 en un hospital de leproso en Bombay.

(Emscherbrunnen, erfunden 1907 von Karl Imhoff. [Figura 6]. Recuperado de <https://slideplayer.es>)

cabo por Karl Imhoff y Blunk durante los años 1914 y 1921, los cuales realizaron numerosos inventos como por ejemplo los intercambiadores de calor de doble membrana, añadir agua caliente al lodo que se encontraba a una temperatura más fría, calentar el interior del digestor durante el proceso de la descomposición con el fin de facilitar este proceso, etc.

Entre los años anteriores, también hubo distintos acontecimientos que destacar sobre el biogás, y es que Omelianski consiguió excluir una pequeña muestra de bacterias de metano durante la fermentación anaeróbica para poder estudiarlas mejor.

Por parte de Europa, los investigadores ingleses se empiezan a inquietar sobre cómo obtener metano mediante la materia orgánica obtenida en las granjas.

Al año siguiente, en el 1907, se empleó una especie de motor en el hospital de leproso situado en Bombay (India) el cual utilizaba como combustible el gas de los lodos del lugar. Lógicamente este sistema fue algo provisional que no dio pie a ningún tipo de avance posterior. (Greeley y Velzy, 1936).

Gran Bretaña fue el primer lugar de Europa donde se asentaron los digestores anaeróbicos con el fin de producir biogás a partir de residuos orgánicos en el año 1911.

Tres años después en Indonesia se intentó generar biogás utilizando desechos de un tablero de paja.

Sin embargo, uno de los mayores avances sobre este tema fue llevado a

En las épocas venideras, (entre los años 1920 y 1930) aumentaron considerablemente los estudios y las investigaciones sobre este tema tanto en laboratorio como diseñando plantas modelo que, con el paso del tiempo, se convirtieron en las fábricas (Figura 7) que tenemos actualmente. Ya en la India se empleaba residuos de las aguas del lugar para dotar de materia prima al digestor anaeróbico.



Figura 7. Planta de biogás y de energías renovables en Schleswig-Holstein, Alemania

(Florian Gerlach (Nawaro). Renewable Energies: Biogas (fermenter), wind power and photovoltaics on a farm in Horstedt (Schleswig-Holstein/ Germany). 11 January 2007. [Figura 7]. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org>)

Analizando más detenidamente estas innovaciones destacamos que en China, en el año 1920, se creó un reactor en el cual se llevaba a cabo la fermentación anaeróbica, de 8 metros cúbicos de volumen, esta labor fue obra de Guorui, que además inauguró la compañía “Guorui Biogas Lamp”.

Ya en Inglaterra, (en concreto en Birmingham) se diseñó el primer motor de 25 HP de potencia con el fin de utilizar el biogás producido por los lodos residuales. Esto provocó tal auge que en el año 1927 se instaló otro motor de mayor potencia (150 HP), el año

siguiente se volvió a repetir lo mismo, y en 1930 ya se empleaban dos motores de 400 HP ambos para realizar el proceso anterior. (Greeley y Velzy, 1936).

Mientras tanto en Alemania también existieron grandes avances, pues en el año 1923 se empezó a usar el metano para abastecer la red pública (Deublein y Steinhauser, 2008). Por este mismo año, el científico Khouvine consiguió separar un bacilo anaeróbico procedente de los desechos humanos el cual podía degradar la celulosa. Sin embargo, aún era demasiado pronto para descubrir como afectaba esto al suelo. (Waksman y Skinner, 1925).

Estaba claro que el tanque Imhoff marcó un antes y un después sobre el biogás, los datos que recogía dicho tanque eran bastante buenos a temperatura ambiente, pero se comprobó que si se calentaba el reactor durante la digestión anaeróbica se mejoraba aún más el proceso, por lo que no tardaron en aparecer los primeros biodigestores que se calentaban ininterrumpidamente en el año 1926 en la ciudad de Essen (situada al oeste de Alemania) (Roediger, 1955). De esta forma surgió la digestión anaeróbica a temperaturas elevadas (llamadas mesofílica o termofílica).

No tardaron en llegar las primeras publicaciones en relación al biogás en los Estados Unidos, en concreto en el estado de Illinois donde Boruff y Buswell investigaron la generación de metano utilizando distintos residuos en el año 1930. En otro estado de Estados Unidos, (Iowa) Jacobs y Levine hicieron avances para obtener un combustible de tipo gaseoso tomando como materia prima los numerosos desechos celulósicos procedentes de las granjas.

Al inicio de la II Guerra Mundial, una gran cantidad de plantas de digestión anaeróbica surgieron para ampliar las maneras de obtener energía de forma rápida y fiable. Esta tecnología creció ampliándose por los demás países de Europa Occidental, sin embargo, por la situación actual, comenzó a existir una insuficiencia de materiales combustibles, disminuyéndose en gran medida la producción de biogás. (Titjen C. 1975 “From Biodung to Biogas: Historical review of European experience”. En: Energy, agriculture and waste management” W.J. Jewell ed. Ann Arbor Science 347-59).

Cerca de los años 40 del siglo XX, comenzó en los Estados Unidos, a llamarse “digestión anaeróbica” a una parte en concreto del proceso de la fermentación producida en las aguas residuales. Además, se comenzó a utilizar el metano con el fin de generar electricidad abasteciendo así las distintas industrias de depuración del agua residual.

Una vez que la II Guerra Mundial terminó, aumentó el auge en Europa con la fabricación de biodigestores, llegando a construirse alrededor de 40 digestores anaeróbicos, sin embargo, la escasez de materia prima como por ejemplo los combustibles fósiles era notable, por lo que se frenó la creación de más reactores para obtener el biogás. En este periodo de tiempo, muchos lugares del mundo empezaron a utilizar el biogás, entre estas zonas destacamos: Israel, Corea, Kenia, Taiwán, Australia e Italia, entre otros muchos.

Seguidamente, en la zona norte de África, (cuando esa región pertenecía a Francia por los años 1940-1951) intentaron crear biodigestores de metano, pero estos nuevos reactores supusieron un trabajo arduo y laborioso durante estos años. Esta investigación fue llevada a cabo por G. Ducey y por M. Isman, desde el año 1937. (Waksman S.A. y Skinner C.E. 1925 “Microorganisms concerned in the decomposition of celluloses in the soil” En: The Journal Series, New Jersey Agricultural Experiment Stations, Department of Soil Chemistry and Bacteriology, Paper No 250.pp: 57-84)

En la mitad del siglo XX surge un gran avance en este campo en Alemania, afirma Tietjen en sus estudios (1975).

Por el año 1954, el científico Ross reportó un avance que estaba llevándose a cabo en Chicago (USA) (Figura 8), en esta ciudad se implantó un sistema cerrado donde se recirculaba los desechos orgánicos que eran posteriormente tratados, de esta forma se agiliza en gran medida el proceso de la digestión anaeróbica.



Figura 8. Chicago (USA). Imagen realizada de forma panorámica

(Daniel Schwen. Chicago skyline at sunrise. 18 April 2009- [Figura 8]. Recuperado de <https://marcoassociates.com>)

Fueron muchas las innovaciones que surgieron durante esta época, pero **en 1957**, se originó, de manos de Bates, **un avance** que marcaría un antes y un después en la historia. Bates realizó cambios en su automóvil con el fin de **emplear el biogás como combustible**.

Este invento no solo fue un éxito, sino que permitió que su vehículo desempeñó su función durante 17 años.

En la década de los 60 aumentó de forma muy elevada la obtención de biogás empleando abono de bovinos en la India con el propósito tanto de obtener energía de forma limpia, además de generar un tipo de abono capaz de ser usado como fertilizante. (Campos, 2001).

Varios años después en Taiwán, el investigador Chung Po, realizó unos modelos de biodigestores de tamaño familiar (es decir, el volumen de materia orgánica que podía almacenar el reactor y la cantidad de energía generada, fue prediseñada para un tipo de modelo familiar estándar.) También utilizó el lodo de las aguas residuales para la labranza de la *Chlorella* (género de algas verdes de tipo unicelular.)

En la década de los 70, China sufre un gran aumento de esta tecnología, pues con ayuda del gobierno se potencia la creación de biodigestores (Campos, 2001). Se estima que en el año 1977 China poseía nada menos que 5 millones de reactores capaces de realizar la digestión anaeróbica, y es que, gracias a la ayuda económica antes nombrada y las mejoras a nivel de los materiales, los costes de construcción se abarataron permitiendo este aumento de biodigestores en el continente asiático. (Pfeffer, 1974; Smill, 1974).

Sin embargo, en los países más desarrollados, el proceso de obtener metano, (metanización) se ha visto condicionado por los factores medioambientales, viéndose obligados en cierta manera a realizar un método clásico de purificación y adaptación de las aguas residuales.

En las grandes industrias de los países más evolucionados, la digestión anaeróbica siempre ha buscado reducir las cantidades de desechos que se han originado, pero no se había aprovechado en gran medida el gas generado de este proceso para combustible, o los residuos orgánicos como fertilizantes, pero esto cambió cuando surgió la “Crisis del Petróleo” y gran parte de Europa e Inglaterra se vio en la necesidad de buscar otros tipos de energías.

Esta crisis provocó que los costes de las grandes instalaciones se dispararan hasta tal punto que se tuvo que parar la creación de nuevas fábricas, este problema se agravó a finales de los 80. (Deublein D. y Steinhauser A. 2008 « Biogas from Waste and Renewable Resources: An introduction » Wiley-VCH editors Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 447 págs.)

4 años después, se llevó a cabo la elaboración de una instalación centralizada de biogás en Dinamarca.

Y de esta forma, se llegó a un acuerdo entre el Ministerio de Agricultura y de Medioambiente de Dinamarca con el fin de obtener el máximo rendimiento del proceso de la digestión anaeróbica aprovechando el gas generado y produciendo energía eléctrica, (esta forma de obtener energía eléctrica a partir del biogás generado en la descomposición de materia orgánica es la empleada en la planta de tratamiento de residuos orgánicos El Gorguel, en Cartagena).

En los años 90 aparece una nueva legislación en Alemania relacionada con la electricidad y que actualmente se mantiene. En dicha ley se recompensa a las empresas que produzcan electricidad de manera limpia, (es decir, se paga por cada kWh producido) provocando un nuevo auge en la instalación de biodigestores. Además, a finales del siglo pasado, se mejoraron infinidad de plantas donde se trataban los residuos tanto de manera mecánica como biológica. De esta forma se afirmó, una vez más, de los grandes beneficios que generaba la digestión anaeróbica para la propia planta.

Por último, cabe destacar que a día de hoy Nepal (Figura 9) es el país del mundo que ostenta el mayor número de instalaciones de biogás por habitante.



Figura 9. Proporción geográfica de Nepal (naranja) con respecto a China (verde)

(Mangostar. Locator map showing China and Nepal. 28 May 2008. [Figura 9]. Recuperado de <https://www.wikiwand.com>)

Una vez visto toda la evolución del biogás a lo largo de los tiempos, en este trabajo vamos a estudiar más a fondo el biogás, explicando su composición, las etapas que se llevan a cabo dentro del biodigestor, las partes que componen el biodigestor y finalmente, un análisis más exhaustivo de la planta de tratamientos de residuos orgánicos de Cartagena de cómo tratan la materia orgánica en descomposición y el posterior uso que realizan con el biogás generado en dicho proceso.

Podemos definir el biogás como un gas combustible producido en ambientes naturales o bien en mecanismos concretos (como el biodigestor), donde se llevan a cabo las distintas reacciones que biodegradan la materia orgánica, gracias a la actuación de microorganismos y otros aspectos, en carencia de oxígeno (es decir, en un entorno anaeróbico).

Está comprobado que la obtención de biogás mediante la disgregación anaeróbica es un factor muy empleado cuando se busca examinar los residuos biodegradables, esto genera un combustible de gran calidad además de producir un efluente altamente utilizado para adaptar el suelo o emplearse como abono.

El biogás generado es un conjunto de gases en distinta proporción, estos gases son: metano (cuya relación varía entre un 50% y un 70% en volumen), dióxido de carbono y otros gases como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y ácido sulfhídrico, estando este último en pequeñas proporciones. (“Biogás - El Gas Combustible Alternativo - ElBlogVerde.com,” n.d.) El biogás posee normalmente un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 mega julios por metro cúbico ($\frac{MJ}{m^3}$). (“¿Que es el biogás? – Ecogal,” n.d.)

Por las características mencionadas anteriormente este gas se emplea para originar energía eléctrica a través de turbinas o plantas generadoras de gas, así como hornos, calderas u otras técnicas que requieran del proceso de combustión de dicho gas. (“Biogás - Plantas de Biomasa,” n.d.)

Una de las propiedades que posee el metano de este gas es su gran capacidad para comprimirse de la misma forma que sucede con el gas natural y así poder emplearse como combustible para los motores de los coches. En países como Suecia, Suiza y Alemania,

es muy utilizado en el transporte público, hasta tal punto que muchas marcas de coches están investigando para introducir dichas mejoras en vehículos privados. (Borrás Brucart, E. Gas natural, Características, distribución y aplicaciones industriales. Editores Técnicos Asociados,S.A., Barcelona 1987.)

2 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS

Existen dos aspectos fundamentales de los cuales depende la composición química del biogás, éstos son: los materiales utilizados mientras se están produciendo la digestión anaeróbica y la técnica empleada para dicho proceso. Teniendo en claro esto, podemos afirmar que el biogás abarca entre 55 y 70 % de metano, 30 – 45% de dióxido de carbono y el por ciento restantes, (el cual es inferior al 5%) de otros gases (estimados como impurezas). (“Biogás: basura orgánica convertida en energía | Biogeomundo,” n.d.)

El biogás posee un poder calorífico entre 6 – 6,5 kWh/Nm³, su correspondiente valor en combustible es de 0,6 – 0,65 L de petróleo por metro cúbico de biogás. Su temperatura de combustión es de 650 a 750 °C. La presión crítica de dicho gas es de 74 a 88 atmósferas. Temperatura crítica de -82,5°C. Su medida de densidad es de 1,2 kg/m³ y su masa molar es de 16,043 g/mol. (“Biogás: basura orgánica convertida en energía | Biogeomundo,” n.d.)

3 ETAPAS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Es importante destacar que la digestión anaeróbica es un procedimiento nada sencillo pues intervienen muchas reacciones bioquímicas en el interior del biodigestor, además existen un elevado exceso de microorganismos íntimamente ligados a dichas reacciones. Asimismo, se da el caso de que inmensas reacciones transcurren a la vez. Sin embargo, es posible dividir este proceso de obtención de biogás en cuatro etapas: (Gene P. y Owen W. 1986. *Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges*. *Journal of Environmental Engineering* 112:867-916.)

3.1 Etapa I: Hidrólisis

El primer paso a tener en cuenta en la transformación de la descomposición anaeróbica está relacionado con los compuestos orgánicos, pues es necesario que ellos traspasen la pared celular y de esta forma obtener la materia orgánica. (“¿Que es el biogás? – Ecogal,” n.d.) Esta fase comentada anteriormente se le conoce con el nombre de hidrólisis, donde en ella se produce la degradación anaeróbica de los sustratos orgánicos complejos. Los microorganismos hidrolíticos generan enzimas extracelulares modificando la materia orgánica polimérica en compuestos orgánicos solubles. Este periodo es fundamental si queremos conocer la velocidad global del proceso de generación de biogás (más si se está trabajando con residuos formados por gran cantidad de sólidos) además, existen muchos aspectos que pueden afectar al proceso de la hidrólisis, entre ellos destacamos: la temperatura, el ph, el tamaño de las partículas, la composición bioquímica del sustrato, entre otros. (Hansen M.N., Birkmose T., Mortensen B. y Skaaning K. 2004. *Environmental effects of anaerobic digestion and separation of slurry - odour, ammonia emission and nitrogen utilisation*. Correll, A. (Ed.) Grøn Viden, Markbrug, no. 296. Danish Institute of Agricultural Sciences, Dep. of Agricultural Engineering.)

Todo sustrato se caracteriza por poseer tres ejemplos principales de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Analizando las distintas moléculas comentadas anteriormente, podemos afirmar que las proteínas juegan un papel fundamental en el desarrollo de la digestión anaeróbica pues aparte de poseer una elevada cantidad de carbono y energía, sus aminoácidos originados en la hidrólisis destacan por su gran valor nutricional. Gracias a la actuación de las enzimas proteolíticas, (conocidas como proteasas) las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos. Posteriormente, una porción de esos aminoácidos son empleados para generar la actual materia celular y los restantes aminoácidos son transformados a ácidos volátiles.

Por parte de los lípidos, su función empieza con la separación de las grasas por la actividad de las enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol. Este proceso se genera cuando comienza la descomposición de los lípidos en la digestión anaeróbica. (Insam H., Franke-Wittle I. y Goberna M. 2009. *Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment*. En: *Microbes at work. From wastes to resources*. Insam H., Franke-Wittle I. y Goberna M. (Eds). Pp. 1-34. Springer. Heidelberg, Dordrecht, London, New York)

Es decir, podemos afirmar que la hidrólisis consiste en parte en transformar los distintos polímeros que componen la materia orgánica en descomposición, a monómeros algo más sencillos a la hora de disgregarse. Además, es importante destacar que en esta fase del proceso de la digestión anaeróbica se genera CO₂.

Si se quiere obtener un gran rendimiento en el proceso de la fermentación dentro del biodigestor, es aconsejable que el valor de pH se encuentre entre 5,3 y 6,7. Sin embargo, según la materia orgánica que se quiera degradar y el tiempo que esta a permanecido en otras condiciones, o incluso si estos residuos han sufrido algún tipo de tratamiento anterior antes de introducirse en el reactor, el pH puede disminuir hasta situarse alrededor de 4,5. (“Fases de la digestión anaeróbica - Biodigestores - plantas de biogas - generadores - energía,” n.d.)

3.2 Etapa II: Acidogénesis o etapa fermentativa

Tras la hidrólisis surge una nueva etapa donde se lleva a cabo la conversión de las moléculas orgánicas solubles en elementos que pueden ser empleados por las bacterias metanogénicas. Estos compuestos son acético, fórmico e hidrógeno, otros componentes no tan comunes como los anteriores como valérico, propanoico, láctico y otros muchos que no sirven de utilidad para estas bacterias como por ejemplo el etanol, ácidos grasos y compuestos aromáticos. Es fundamental destacar la existencia de este conjunto de bacterias pues aparte de generar alimento a los diferentes grupos de microorganismos que actúan en la acidogénesis, también se encargan de suprimir toda molécula de oxígeno que se encuentre en el biodigestor. (Steffen, R., Szolar, O., Braun, R. 1998. *Feedstocks for Anaerobic Digestion*. Technical paper 199809-30, Institute for Agro biotechnology, Tulln University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria.)

En esta fase se produce una evolución rápida de las distintas bacterias y microorganismos que intervienen, además de surgir nuevos gases como, el H_2S , y el amoníaco (NH_3). Por parte del pH debería situarse entre 6 y 7,5, sin embargo, como hemos visto anteriormente, este valor puede verse afectado por el tipo de residuos a tratar y el tiempo de retención de éstos.

3.3 Etapa III: Acetogénesis

En esta fase se busca que los compuestos que no son capaces de ser metabolizados por las bacterias metanogénicas como son, por ejemplo, el etanol, ácidos grasos y compuestos aromáticos, se conviertan en elementos más fáciles de realizar esta función como el acetato e hidrógeno gracias a la labor de las bacterias acetogénicas. Los homoacetogénicos (microorganismos acetogénicos muy especiales) poseen una gran capacidad para desarrollarse heterotróficamente en disposición de azúcares o conjuntos monocarbonados generando solo acetato. Estas bacterias adquieren el hidrógeno como sustrato, produciendo así unas bajas presiones como consecuencia del proceso metabólico de los distintos homoacetogénicos que intervienen en él.

En este punto del proceso es cuando surgen por primera vez elementos principales (ácidos volátiles) que serán empleados por las bacterias metanogénicas en la siguiente etapa. En esta fase se ha conseguido captar todo el alimento necesario para las bacterias anaeróbicas, además de desecharse por completo ciertos compuestos perjudiciales. (Angelidaki, I., Ahring, B. K. 1994. Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. *Water Res.* 28(3):727–731.)

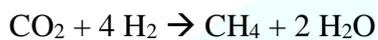
Por lo comentado anteriormente, el grupo acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$) juega un papel fundamental en esta etapa, pues da el paso a la generación de compuestos que serán utilizados por los microorganismos posteriores. La reacción producida en esta fase es endotérmica, pues requiere de energía para poder llevarse a cabo (energía que es producida por las mismas bacterias que intervienen en el proceso).

3.4 Etapa IV: Metanogénesis

En esta última etapa intervienen las bacterias metanogénicas que juegan un papel fundamental, pues estas bacterias se encargan de sintetizar y descomponer todos los productos obtenidos en las fases anteriores. También es importante destacar que en

esta parte del proceso se origina el metano, (componente primordial del biogás) gracias a los microorganismos metanogénicos. (Kepler, F. et al. (2006). *Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions*. Nature 439)

El proceso de digestión anaeróbica llega a su fin cuando los microorganismos metanogénicos realizan la generación de metano mediante los sustratos monocarbonados. La reacción química es la siguiente:

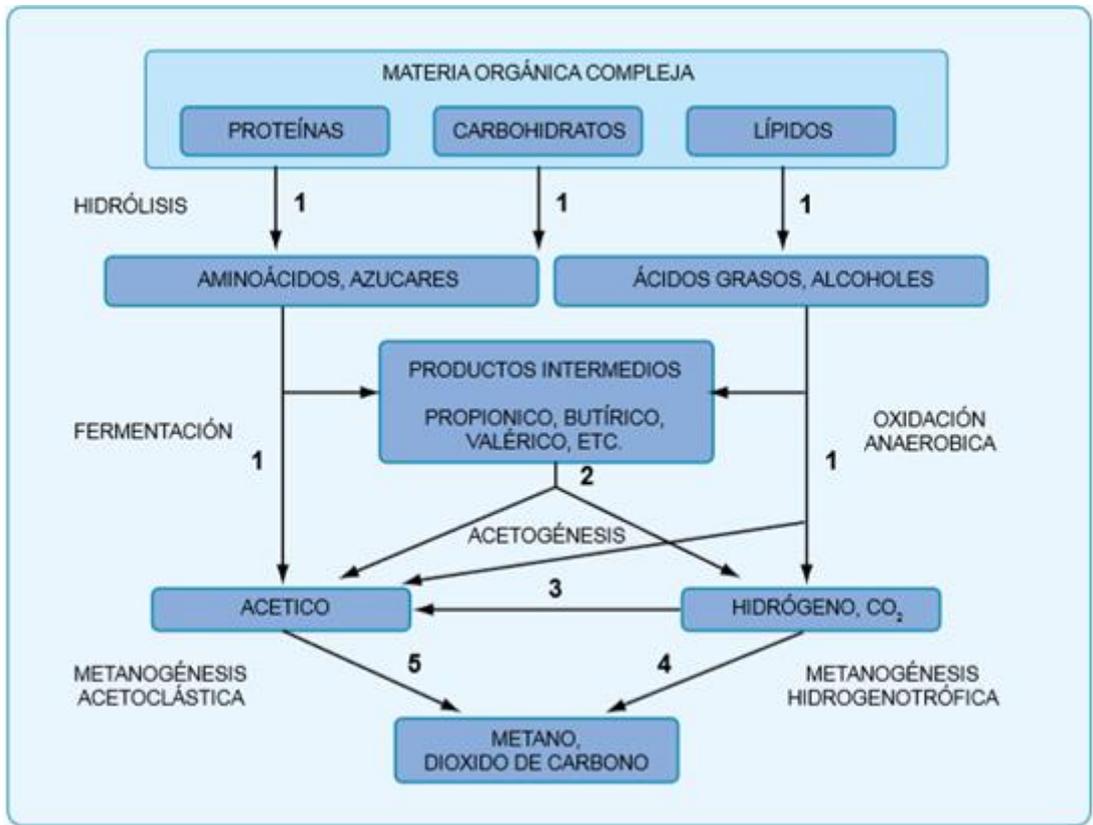


Por último, se puede afirmar que en esta etapa se obtiene el 90% del metano, del que el 70% de éste es producto de la descarboxilación del ácido acético, este acontecimiento se origina gracias a los microorganismos metanogénicos que emplean el H₂ como captador de electrones. (Archer, D. B., Harris, J. E. 1986. *Methanogenic bacteria and methane production in various habitats*. In: *Anaerobic Bacteria in Habitats Other Than Man*, E. M. Barnes & C. Mead (Eds), pp. 185– 223. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK)

La metanogénesis es muy importante en todo el proceso de la digestión anaeróbica, pues sin ella se almacenaría carbono en grandes proporciones. En este periodo del proceso, destacamos también que la evolución de las bacterias metanogénicas es realmente pequeña comparada con las de la fase acetogénica, (en concreto la velocidad de crecimiento es cinco veces menor). Por lo tanto, este ciclo determinará el tiempo que la materia orgánica estará en descomposición.

Finalmente, la variación de pH en esta reacción oscila entre 6,8 y 7,5, pudiéndose alcanzar medidas de pH de 8.

En la Figura 10 se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.



(Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 10. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos

4 BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA

El gran abanico de usos que tiene el biogás es tan variado que posee una alta similitud con el gas natural, sin embargo, una de las características fundamentales del biogás es que procede de la biomasa y por tanto está considerado como un tipo de energía renovable. Además, hay infinidad de beneficios procedentes de la conversión de los residuos orgánicos y posterior transformación en biogás.

Tal es la concienciación sobre las energías renovables que en un elevado número de países la elaboración del biogás se encuentra financiada o presenta un gran apoyo económico, facilitando a los agricultores un ingreso extra con el que afrontar diferentes gastos. (Hansen M.N., Birkmose T., Mortensen B. y Skaaning K. 2004. *Environmental effects of anaerobic digestion and separation of slurry - odour, ammonia emission and nitrogen utilisation*. Correll, A. (Ed.) Grøn Viden, Markbrug, no. 296. Danish Institute of Agricultural Sciences, Dep. of Agricultural Engineering.) De esta forma, el ambiente agrícola consigue una gran evolución, pues estos plus económicos generan la posibilidad de surgir novedosas innovaciones tecnológicas dentro de este sector y así, a la larga, obtener elevados beneficios.

En el proceso de descomposición aeróbica, los residuos orgánicos producen elementos con un poder energético despreciable, lo que provoca que un porcentaje de esa energía se disipe a la atmósfera. En cambio, si comparamos este proceso con la degradación anaeróbica, podemos afirmar que en la descomposición anaeróbica si se generan compuestos con un elevado poder energético, los cuales serán empleados como nutrientes de otros microorganismos, o bien son aprovechados con un objetivo más energético para la sociedad (labor llevada a cabo por el biogás). Se ha comprobado que la diferencia de energía de la digestión aeróbica con respecto a la digestión anaeróbica está alrededor de veinte veces. Por lo que es mucho más eficiente el proceso anaeróbico cuando se busca un aprovechamiento de energía. (Grundey, K. 1982. *El tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos*. Ediciones. GEA. 340pp)

Es muy importante tener en cuenta como la digestión anaeróbica afecta al medio ambiente positivamente, pues el método de descomposición de los distintos residuos orgánicos favorece el mantenimiento de las aguas subterráneas, disminuyendo en gran

medida la aparición de lixiviación de nitratos. Además, las emisiones de gases contaminantes u olores desagradables, son anulados por completo gracias a dicha digestión, evitando así el problema de aglomeración de excrementos y desechos sin procesar.

Como se ha comentado anteriormente, en muchos países existe una gran concienciación sobre este tipo de energía renovable, facilitando económicamente su tratamiento y producción, sin embargo, cabe destacar que la promoción y promulgación de sistemas de generación de biogás colectivos y de co-digestión, donde se consigue una mayor gestión de los residuos orgánicos en las distintas zonas geográficas, mejorando tanto el ambiente, la sociedad y la economía de ese país.

5 BIODIGESTOR



Figura 11. Sistema de biodigestores en México

(Biodigestor en Engormix. (Ref. 34639. [Figura 11]. Recuperado de www.engormix.com)

Un digestor biológico o biodigestor (Figura 11) es un depósito totalmente cerrado, hermético e impermeable (en donde se llevan a cabo las etapas anteriormente mencionadas), dentro del cual se almacena la materia orgánica que se quiera tratar, como pueden ser, restos vegetales y frutales (excluyendo toda la familia de cítricos) y desechos producidos tanto por rumiantes o humanos. Esta materia orgánica se puede diluir en ciertas cantidades con agua facilitando así la fermentación anaeróbica de los distintos microorganismos, y, de esta forma, originar el gas metano (componente fundamental del biogás) y un subproducto en forma líquida (conocido como biol), el cual es empleado como un tipo de abono pues se caracteriza por tener un elevado porcentaje en nitrógeno, fósforo y potasio.

Está claro que esta técnica es altamente favorable con el medio ambiente, pues reduce en gran medida los residuos derramados en el ecosistema, además se genera un tipo de energía renovable. (“¿Qué es y cómo funciona un biodigestor?,” n.d.)

Uno de los factores más determinantes en el proceso de la biodigestión es la gran eliminación de contaminantes procedentes tanto de animales como humanos, y es que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) se reduce hasta un 90 % (este porcentaje puede variar dependiendo de las condiciones de diseño del biodigestor y de la forma de tratar la materia orgánica del reactor). (“LOS BIODIGESTORES, IMPORTANCIA Y BENEFICIOS,” n.d.)

Por último, también es importante destacar que el ph, la presión y la temperatura son elementos a tener en cuenta si se quiere mejorar en gran medida el rendimiento del proceso de descomposición de la materia orgánica dentro del biodigestor.

5.1 Componentes de un digestor anaeróbico

Cada digestor anaeróbico posee unas características determinadas, (según el tipo de materia orgánica que se quiere eliminar) sin embargo, la mayoría de digestores empleados están constituidos por un reactor, en el cual se realiza todas las etapas

contempladas anteriormente, las entradas y salidas del efluente, un sistema de gas, con el fin de eliminar los humos, los muestreadores que nos permiten recoger medidas del proceso y por último, un sistema de calentamiento del digestor, que permite en cierta manera regular la temperatura a la que se quiere llegar para favorecer el proceso de descomposición de la materia orgánica. (Lorenzo Acosta, Yaniris, Obaya Abreu, Ma Cristina, La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar 2005, [Fecha de consulta: 29 de mayo de 2019])

En los siguientes apartados posteriores se explicará con más detalle cada parte del digestor anaeróbico y qué función realiza en él.

5.1.1 Reactor (Biodigestor)



Figura 12. Biodigestores industriales en Estados Unidos.

(Biodigestor. 3.8 Instalaciones Industriales. [Figura 12]. Recuperado de <https://ecocosas.com>)

El reactor es el corazón del biodigestor (Figura 12), pues es el componente fundamental donde ocurre la transformación bioquímica de la descomposición de la materia orgánica para originar metano y dióxido de carbono. Es importante tener en cuenta que los distintos microorganismos que realizan este proceso

requieren de tiempo para degradar los residuos orgánicos y, por tanto, no se empezará a generar biogás hasta aproximadamente 15 días, (el tiempo dependerá de las condiciones de temperatura, pH, etc se encuentre el interior del biodigestor) (“Biodigestor - EcuRed,” n.d.). La forma de estos reactores puede ser muy variada, cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, sin embargo, la más utilizada por las industrias a día de hoy es la cilíndrica. La parte baja del reactor posee cierta inclinación con el fin de que los sedimentos y los

fragmentos de mayor peso se extraigan con más facilidad. Cabe destacar que, gracias al avance tecnológico de estos años, hay ciertos tipos de digestores que tienen cubiertas, las cuales pueden ser fijas o flotantes. De esta forma se prevé la fuga de olores, se conserva mejor la temperatura interior del biodigestor, se evita la entrada de oxígeno al digestor impidiendo así que el proceso pueda verse afectado y, por último, facilita en gran medida la obtención del gas producido en el digestor anaeróbico. (Steffen, R., Szolar, O., Braun, R. 1998. Feedstocks for Anaerobic Digestion. Technical paper 199809-30, Institute for Agro biotechnology, Tulln University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria.)

5.1.2 Entrada del efluente

Se considera efluente a todo aquello que es incluido por la zona superior del digestor, mientras que el sobrenadante es obtenido por el lado contrario.

5.1.3 Salida del efluente

Existe la posibilidad que en un digestor de cubierta fija haya de 3 a 5 tubos de sobrenadante situados a distintos niveles, o bien puede haber un único tubo con válvulas colocadas a diferentes niveles para mejorar la extracción de este efluente. En la mayoría de los casos se escoge el nivel que recoja un efluente de mejor calidad, es decir, aquel efluente que presente bajo porcentaje de sólidos.

5.1.4 Extracción de lodos

Los conductos que permiten la extracción de lodos normalmente se sitúan en bloques en la zona baja de cierta inclinación del biodigestor. El lodo generado de la descomposición de la materia orgánica se recoge por la parte central del digestor. Estas tuberías se caracterizan por tener un diámetro de 15 cm e ir equipadas con válvulas de tipo tapón para prevenir obstrucciones dentro de éstas, así se lleva el lodo procedente del reactor hacia un sistema de evacuación posterior.

5.1.5 Sistema de gas

Es importante que todo biodigestor tenga un sistema que permita recoger los distintos humos que se producen en el proceso de degradación de la materia orgánica, por ejemplo, en el caso de digestores de tamaño elevado o en su defecto, los litros de gas por cada kilogramo de materia orgánica eliminados sean muy abundantes, (alrededor de 400 a 700 litros) seguramente será necesario emplear un sistema de gas más sofisticado. (Varnero, M.T.; Faúndez, P.; Santibáñez, C. 2004. Evaluación de lodo fresco y compostado como materia prima para la elaboración de sustrato, Actas del Simposio de las Ciencias del Suelo “Residuos Orgánicos y su Uso en Sistemas Agroforestales”, 361- 365, Temuco – Chile, 5 a 6 de agosto 2004.)

El sistema de gas permite trasladar el biogás hasta los lugares de consumo o bien al quemador de gases con el fin de eliminar el gas procedente de la descomposición de la materia orgánica. Podemos decir que las partes de las que consta el sistema de gas son las siguientes:

5.1.5.1 Cúpula de gas

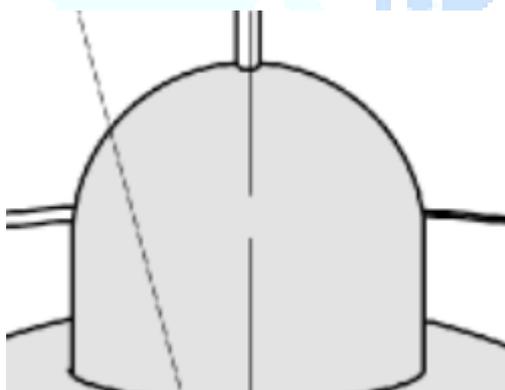


Figura 13. Cúpula de gas de un biodigestor

(José Antonio Guardado Chacón. Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. Selección, diseño y ejecución de plantas del tipo GBV. Pág 58. [Figura 13])

En la parte superior del reactor se encuentra la cúpula de gas (Figura 13), también es llamada domo o campana de gas, en ella se deposita el biogás que se genera. Según las prestaciones del biodigestor, la cúpula de gas puede ser rígida o flotante. Además, en casos puntuales, si la campana de gas se encuentra separada del biodigestor se le conoce con el nombre de gasómetro. En los reactores de cubierta fija, es posible que exista un cierre de agua incorporado, para conservar la estructura del tanque en caso de que se produzca una variación de la presión originada por la obtención del lodo o del gas con

gran rapidez. (Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile, 98p..)

Existen biodigestores de gran tamaño donde el sistema de gas y en concreto este cierre de agua actúa ante un acontecimiento de gravedad, por ejemplo, si se produce un gran aumento de la presión del gas (por encima de los 30 cm de columna de agua), este cierre permitirá que el gas se expulse hacia la atmósfera sin que la cubierta de la cúpula sufra daño alguno. De forma parecida sucede si la extracción de lodo o se emplea el biogás almacenado con mucha rapidez, se puede generar vacío y deteriorar el reactor, sin embargo, con el cierre de agua se prevé esto, pues antes se rompería el cierre. Por lo tanto, siempre que sea posible es aconsejable instalar un cierre de agua en el biodigestor para solventar los posibles problemas que puedan surgir de este tipo.

5.1.5.2 Válvula de seguridad y rompedora de vacío



Figura 14. Válvula de seguridad convencional Figura 15. Válvulas rompedoras de vacío

(Qué es una válvula de seguridad y para qué sirve. [Figura 14]. Recuperado de <https://www.tuandco.com>)

(Válvula de seguridad rompedora de vacío. [Figura 15]. Recuperado de <https://vycindustrial.com>)

La válvula de seguridad (Figura 14) y la rompedora de vacío (Figura 15) van situadas sobre la misma tubería, aunque cada una tenga una función diferente.

La válvula de seguridad está formada por un plato lleno de distintas arandelas de peso calibrado. El peso de las arandelas junto con la carga del plato debe ser similar a la presión del gas dentro del reactor. En caso de que la presión del biogás sea superior al valor de la combinación de los pesos anteriores, la válvula se abrirá permitiendo la fuga de gas durante unos minutos. (Estudio de viabilidad de una instalación de cogeneración. Estudio viabilidad técnica. Válvulas de seguridad y rompedora de vacío. Págs 45-46.)

Por último, la válvula rompedora de vacío actúa de manera similar, la única diferencia reside en que ella se encarga de paliar el aumento de las presiones negativas con el fin de prevenir posibles daños que pueda sufrir el reactor.

5.1.5.3 Apagallamas



Figura 16. Apagallamas

(Apagallamas a prueba de deflagraciones: diseño excéntrico, bidireccional. [Figura 16]. Recuperado de <https://www.interempresas.net>)

El apagallamas (Figura 16) es una especie de caja de forma rectangular que posee aproximadamente de 50 a 100 placas de aluminio corrugado, dichas placas se caracterizan por tener diferentes agujeros taladrados. De esta forma si se origina alguna llama en el interior de la tubería por donde circula el biogás, automáticamente el conducto se enfriará por debajo del punto de combustión del gas una vez que éste haya atravesado los distintos deflectores. (Montes, 2012)

Se recomienda que el apagallamas se sitúe entre las válvulas de seguridad y la rompedora de vacío y la cúpula de gas, o bien delante de cada caldera u horno con el fin de evitar posibles accidentes e incendios que se puedan originar por algún fallo.

5.1.5.4 Válvulas térmicas



Figura 17. Válvula de seguridad térmica

(Válvula térmica 3/8" ML610. [Figura 17]. Recuperado de <http://mpmequipos.mx>)

Estas válvulas térmicas, (Figura 17) se caracterizan por tener cierto aspecto redondeado, con un plato de cierre junto al accionamiento, por un muelle vástago. El vástago se coloca sobre un disco fusible que mantiene el plato unido. Si se produce una llama generando el calor suficiente, el elemento fusible se funde y el muelle permite que el vástago llegue hasta el plato, para así cortar el paso del gas.

5.1.5.5 Separadores de sedimentos



Figura 18. Separador de sedimentos

(Bell & Gossett a xylem brand. Separador de eliminación de sedimentos. [Figura 18]. Recuperado de <http://bellgossett.com>)

Podemos definir al separador de sedimentos (Figura 18) como un recipiente de 30 a 40 cm de diámetro y 60 a 90 cm de longitud. Qué se encuentra, normalmente, en la parte superior del reactor, cerca de la cúpula de gas, además posee también un deflector interior, el cual se encuentra perforado, y un drenaje de condensados cerca del fondo del separador. El gas entra por la parte superior de un lateral del reactor, desciende, atraviesa el deflector, y vuelve a subir saliendo por la parte superior. De esta forma se garantiza que la humedad y todos los componentes grandes considerados desechos, quedan retenidos en el separador antes de entrar en el sistema de gas.

Este separador es proporcionado por la compañía Bell & Gossett. El diseño y las medidas de este separador

facilita que el gas arrastrado se desprenda de la solución, además la forma de la boquilla permite que la velocidad del fluido sea menor, la forma de las boquillas de entrada y de salida generan un movimiento centrífugo dentro del separador que, gracias a este, se produce una diferencia de presiones dentro del separador, lo que provoca que el aire ascienda por la parte superior mientras que los sedimentos se sitúan en la parte inferior. Además, en el fondo de este dispositivo existe una zona de almacenamiento de residuos sólidos captando estos componentes y evitando así el problema de que puedan ascender junto al gas.

Este tipo de separador de sedimentos consta con la mejora anteriormente nombrada, pues si no se consigue dividir de forma clara los fragmentos sólidos del gas puede acarrear diversos problemas en los equipos posteriores y aumentar en gran medida los costes de mantenimiento de la instalación. (“Xylem Applied

5.1.5.6 Purgadores de condensado



Figura 19. Purgador de condensado

(Valsteam. Productos. Purgadores de condensado. [Figura 19]. Recuperado de www.valsteam.com)

(Figura 19) tienen generalmente una capacidad de recogida de un cuarto o medio litro de agua.

Hay que tener en cuenta que el gas que sale del digestor se encuentra con una elevada proporción de humedad, y es en su recorrido, (es decir, desde el reactor hasta las zonas que se mantienen a temperaturas más bajas) el agua cambia de estado condensándose. Por lo tanto, esta agua debe recolectarse en los puntos bajos del sistema, ya que de lo contrario se entorpecerá la buena circulación del gas, posibilitando el deterioro de ciertos equipos, como, por ejemplo, los compresores, y perjudicando en la posterior utilización del gas. Estos purgadores

5.1.5.7 Medidores de gas



Existen medidores de gas (Figura 20) de diferentes tipos, como fuelles, diagramas de flujo en paralelo, molinetes y placas de orificios o presión diferencial.

Figura 20. Medidor de gas

(Metrex S.A. Medidor para Gas. G4. Tipo Diafragma. [Figura 20]. Recuperado de <https://www.metrex.com.co>)



Por ejemplo, los medidores de gas de fuelles (Figura 21) son muy empleados cuando se quiere tomar medidas del volumen de los gases inertes y secos, además de ser realmente eficaces cuando se quieren evaluar flujos altos de gas, (siempre y cuando no sean superiores a 500 mbar de presión). (“Medidores de volumen de gas - MK Energía,” n.d.)

Figura 21. Medidor de gas tipo fuelle

(Medidores de volumen de gas. Medidor de fuelle Ritter. [Figura 21]. Recuperado de <https://mk-energia.com>)

5.1.5.8 Manómetros



Figura 22. Distintos tipos de manómetros

(Instrutek. Manómetros RLC. [Figura 22]. Recuperado de <http://www.instrutek.com.mx>)

Los manómetros (Figura 22) se pueden instalar en distintos puntos del sistema, con el fin de conocer la presión que lleva el gas al pasar por los diferentes componentes. Normalmente la unidad de medida que se utilizan son los metros de columna de agua. (O cuando se habla de pequeños valores de presión, centímetros de columna de agua)

5.1.5.9 Reguladores de presión



Figura 23. Regulador de presión tipo diafragma

(Direct Industry. Regulador de presión para gas. Monoetapa. De diafragma. De muelle. 912N Series. Fisher Regulators. [Figura 23]. Recuperado de <http://www.directindustry.es>)

Los reguladores de presión se colocan antes y después del quemador de gases en exceso. Estos reguladores (Figura 23) son del tipo diafragma y posibilitan el control de la presión en todo el sistema de gas del digestor. Es destacar que, si el valor de la presión es menor de 20 cm de columna de agua, el gas no será capaz de llegar al quemador, en cambio, si la presión es superior a los 20 cm de columna de agua, el regulador se abrirá levemente, permitiendo el paso del gas al quemador. En caso de que la presión siga incrementándose, el regulador se abrirá en mayor medida para equilibrar esta diferencia de presiones.

Los reguladores de presión pueden estar situados en otros puntos del sistema, para regular la presión en calderas, calentadores y motores.

5.1.5.10 Almacenamiento de gas



El gas que se produce de las reacciones del biodigestor se puede almacenar en un gasómetro que puede estar situado en la parte superior del reactor, o bien, puede estar separado del biodigestor (Figura 24).

Figura 24. Gasómetro

(MSP Environnement Systems & Projects. Gasómetro para biogás de Doble Membrana. [Figura 24]. Recuperado de <http://www.mspsp.com>)

Existen dos tipos de gasómetros:

5.1.5.10.1 Gasómetros a presión o gasómetros cerrados.

El gas producido es enviado por medio de compresores a depósitos donde queda almacenado. Posteriormente se extrae de estos depósitos y se envía a las instalaciones de utilización o de quemado. El gas almacenado normalmente se encuentra a una presión de 3,4 atm, por lo tanto, se puede disminuir el volumen de gas a una tercera parte de lo que ocupa en el digestor.

5.1.5.10.2 Gasómetros de cubierta flotante.

En estos gasómetros los gases se encuentran a una presión baja aproximadamente de 200 mm de columna de agua. Este tipo de gasómetros

está formado por una campana flotante, similar a la cubierta flotante de un digestor primario. Una serie de ruedas permiten que la cubierta pueda desplazarse libremente hacia arriba o hacia abajo, según la cantidad de gas almacenado. Estas ruedas deslizan sobre unos perfiles de acero que actúan como guías de campana.

5.1.5.11 Quemador de los gases sobrantes

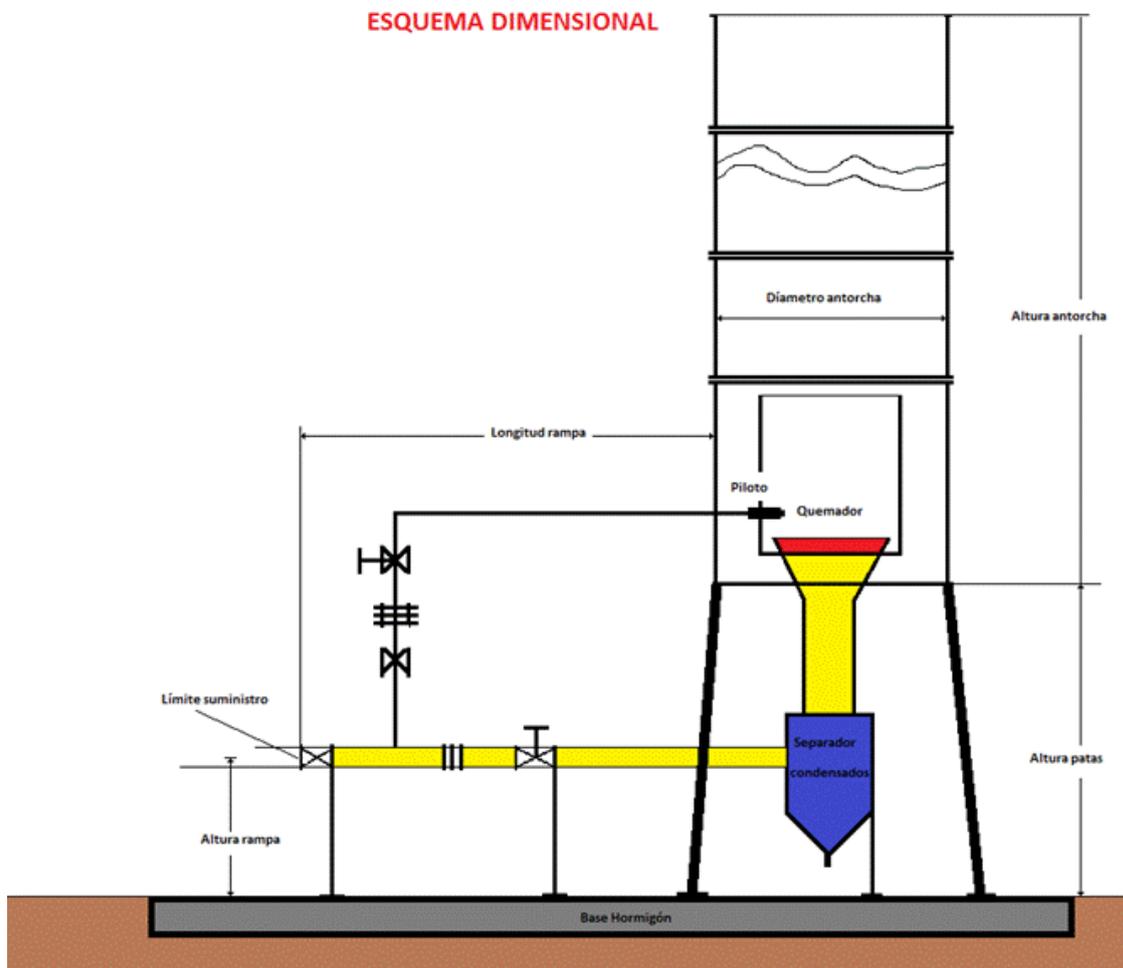


Figura 25. Esquema dimensional de un quemador de gases

(Emison. Antorchas para quemado de GLP. Esquema del quemador y su funcionamiento. [Figura 25]. Recuperado de <https://www.emison.com>)

La antorcha o quemador de gases (Figura 25) se utiliza para eliminar los gases sobrantes de la digestión. Va provisto de una llama piloto de quemado continuo, para que cualquier exceso de gas que pase por el regulador se quemé.

5.1.6 Muestreador



El muestreador (Figura 26) consiste en una tubería de 8 ó 10 cm de diámetro con una tapa de cierre con bisagras que penetra en el tanque de digestión, a través de la zona de gas, y que está siempre sumergida unos 30 cm en el lodo del digestor. Esto permite tomar muestras del lodo del digestor, sin pérdidas de presión de gas, y sin crear condiciones peligrosas causadas por la mezcla de aire y gas del digestor.

Figura 26. Muestreador

(Surechem. Sludge Judge. Ultra Sampler, 15'L. [Figura 26]. Recuperado de <https://www.coleparmer.com>)

5.1.7 Sistema de calentamiento del digestor

Un digestor puede funcionar a cualquier temperatura, sin embargo, el tiempo que puede tardar en completar la digestión varía y depende de ella. Si aumenta la temperatura disminuirá el tiempo necesario para que el lodo se estabilice. En general, los biodigestores modernos actúan entre 35 y 37 °C.

Existen varias formas de calentar los digestores, aunque las instalaciones actuales están dotadas de un sistema de recirculación de lodos del digestor a través de un intercambiador exterior de agua caliente.

5.2 Clases de biodigestores

Existen muchos tipos de biodigestores muy variados, y cada uno de ellos poseen unas características determinadas, por lo tanto, según vaya a ser nuestra función emplearemos un tipo de digestor u otro.

Podemos realizar la clasificación de los biodigestores según la forma en la que funciona dicho reactor, es decir, si el flujo es en discontinuo (entra materia orgánica al biodigestor, pero no sale a la misma vez), flujo semicontinuo o flujo continuo.

5.2.1 Biodigestores de flujo discontinuo

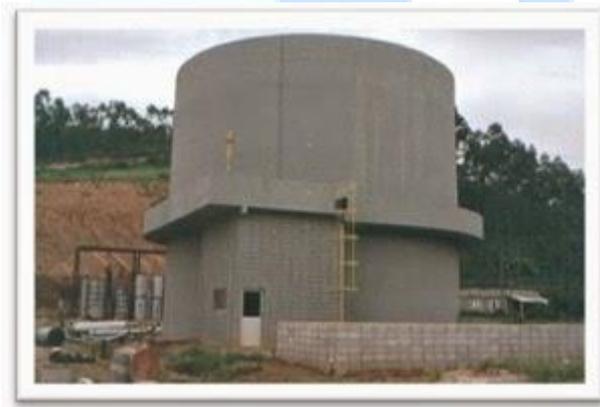


Figura 27. Biodigestor de flujo discontinuo

Figura 28. Esquema del flujo discontinuo

(Biodigestor. Flujo discontinuo. [Figura 27 y 28]. Recuperado de Biodigestor33.blogspot.com.)

La carga de la totalidad del material se hace al inicio del proceso y la descarga del efluente se hace al finalizar el proceso (Figura 28). En este tipo de biodigestores (Figura 27) se requiere de una mayor mano de obra y de un espacio para almacenar la materia prima si esta se produce de forma continuada y de un depósito de gas o fuentes alternativas para suplirlo.

5.2.2 Biodigestores de flujo semicontinuo

La carga del material y la descarga del efluente se realiza de manera continua o por pequeños baches durante el proceso, que se extiende indefinidamente a través del tiempo. Requieren de menos mano de obra, pero es necesario que la mezcla esté más fluida o movilizarla de manera mecánica y de un depósito de gas.

5.2.3 Biodigestores de flujo continuo

Se usan generalmente para el tratamiento de aguas residuales, tienden a ser de gran coste industrial, con sistemas comerciales para el control y gestión del proceso. Existen tres clases de biodigestores de flujo continuo:

5.2.3.1 De cúpula fija (chino).

Este tipo de biodigestor (Figura 29) se caracteriza por poseer una cúpula fija o techo fijo para almacenar el biogás. Tienen una forma más redondeada que los demás, siendo su parte superior e inferior similar a la de un domo. De esta forma, cuando se produce un incremento de la presión provoca que los líquidos de dentro del reactor asciendan por los tubos de salida, generándose así presiones cercanas a los 10 mm de columna de agua. (“BIODIGESTORES: Biodigestor chino,,” n.d.)

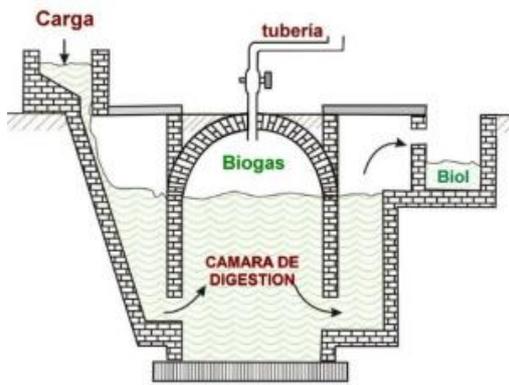


Figura 29. Biodigestor en continuo modelo chino

(Energía casera. Clasificación de Biodigestores. Biodigestores de mezcla completa. Modelo Chino. [Figura 29]. Recuperado de <https://energiacasa.wordpress.com>)

5.2.3.2 De cúpula móvil o flotante (hindú)

El tipo hindú (Figura 30) consta de un reactor de tipo vertical el cual posee una campana o cúpula flotante encargada de recoger el biogás procedente de la digestión anaeróbica. Normalmente la presión en este tipo de biodigestores suele ser mucho menor que los anteriores, (alrededor de 300 mm de columna de agua). Este modelo de campana permite obtener una presión prácticamente constante dentro del reactor, originando así una mayor eficiencia en los equipos que participan de este proceso.

(“BIODIGESTORES: Biodigestor hindú.” n.d.)

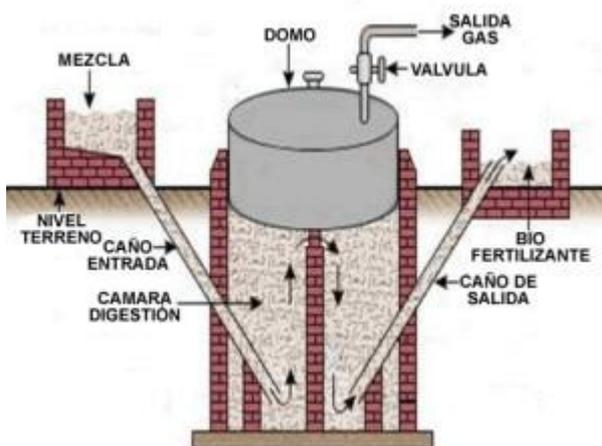


Figura 30. Biodigestor en continuo modelo hindú

(Energía casera. Clasificación de Biodigestores. Biodigestores de mezcla completa. Modelo Indio. [Figura 30]. Recuperado de <https://energiacasera.wordpress.com>)

5.2.3.3 De salchicha, tubular, Taiwán, CIPAV o biodigestores familiares de bajo coste.

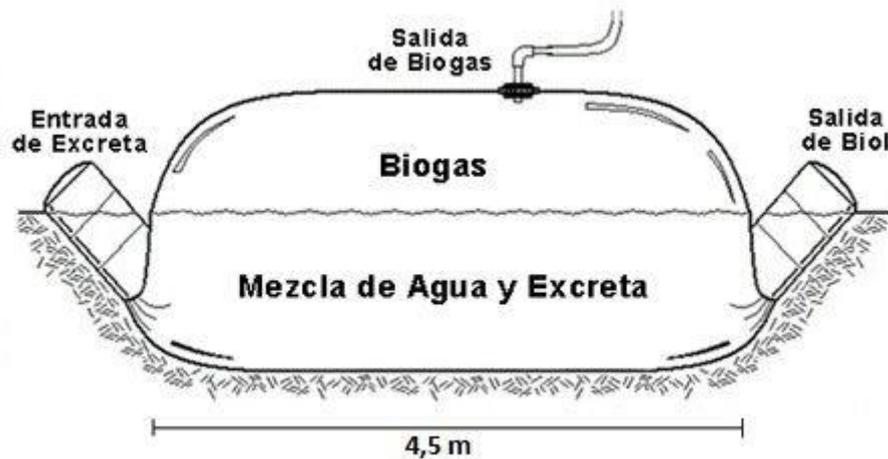


Figura 31. Biodigestor en continuo modelo Taiwán

(Recolectores de la vida. Feria de la ciencia. Biodigestor. [Figura 31]. Recuperado de <http://recolectoresdelavida.blogspot.com>.)

Este tipo de biodigestores (Figura 31) han sido desarrollados y están ampliamente implementados en países del sureste asiático, pero en América del Sur, sólo países como Argentina, Cuba, Colombia y Brasil tienen desarrollada esta tecnología. Estos modelos están contruidos a partir de mangas de polietileno tubular, se caracterizan por su bajo coste, fácil instalación y mantenimiento, así como por requerir sólo de materiales locales para su construcción.

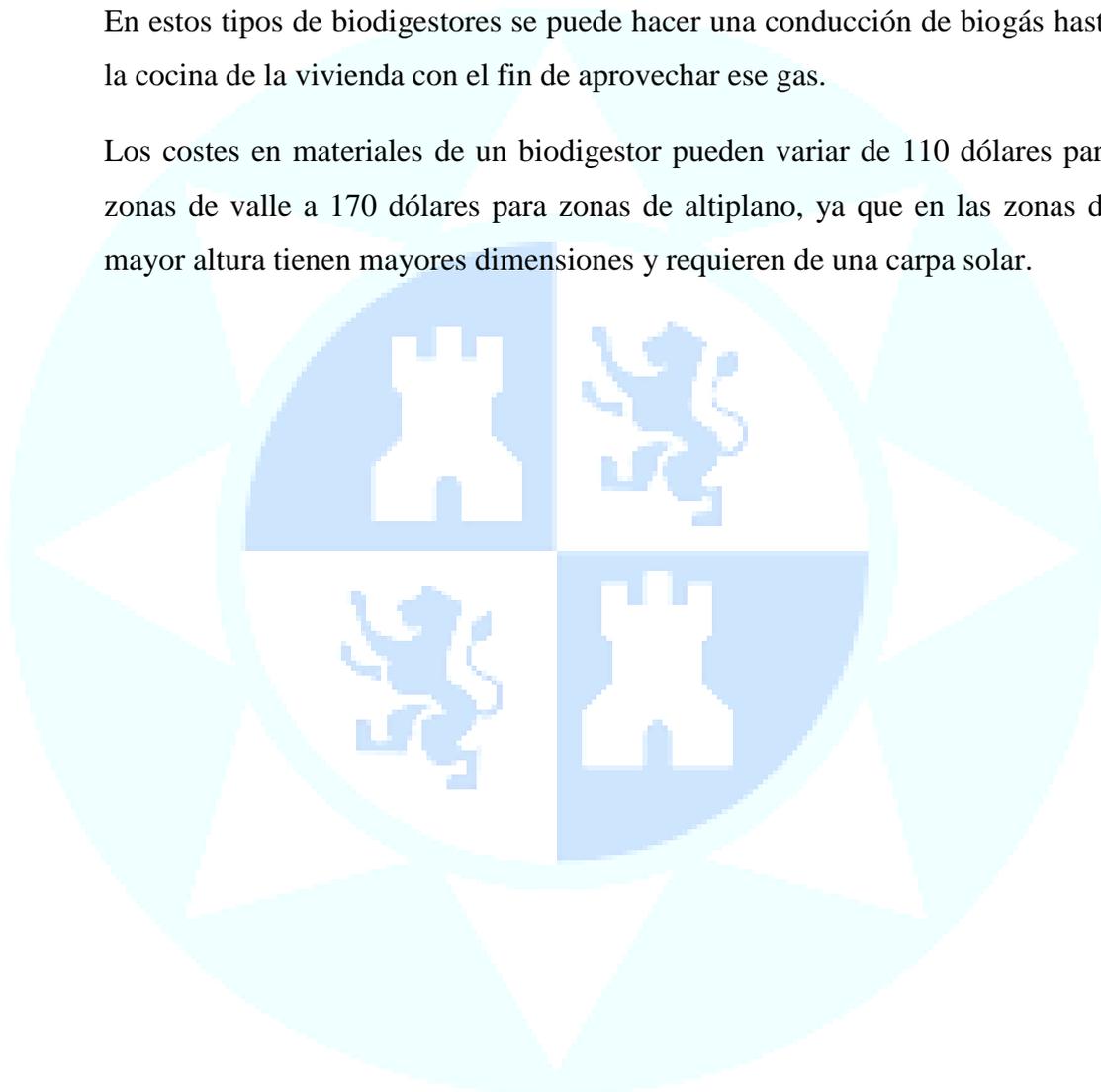
La película de polietileno tubular se amarra por sus extremos a tuberías de conducción, de unas seis pulgadas de diámetro. De esta forma, calculando convenientemente la inclinación de dichas tuberías, se obtiene un tanque hermético. Al ser flexible el polietileno tubular, es necesario construir una “cuna” que lo albergue, ya sea cavando una zanja o levantando dos paredes paralelas. Una de las tuberías servirá como entrada de materia prima (la mezcla de estiércol con agua debe estar en proporción 1:4). Finalmente, en el biodigestor se alcanza un equilibrio a nivel hidráulico, donde una cantidad de estiércol mezclado con

agua es agregada y otra cantidad de fertilizante sale por la tubería del otro extremo.

Debido a la ausencia de oxígeno en el interior de la cámara hermética, las bacterias anaerobias contenidas en el propio estiércol comienzan a digerirlo, produciéndose así una primera fase de hidrólisis y fermentación, posteriormente una acetogénesis y finalmente la metanogénesis, por la cual se produce metano.

En estos tipos de biodigestores se puede hacer una conducción de biogás hasta la cocina de la vivienda con el fin de aprovechar ese gas.

Los costes en materiales de un biodigestor pueden variar de 110 dólares para zonas de valle a 170 dólares para zonas de altiplano, ya que en las zonas de mayor altura tienen mayores dimensiones y requieren de una carpa solar.



5.3 Adaptación de los biodigestores

Los biodigestores deben ser diseñados de acuerdo con su finalidad, la disposición de ganado y tipo, y la temperatura a la que van a trabajar. Un biodigestor puede ser diseñado tanto para eliminar todo el estiércol producido en una granja de cerdos, o bien como herramienta de saneamiento básico en un colegio. Otro fin sería el de abastecer durante 5 horas de combustible una cocina familiar.

La temperatura ambiente en que va a trabajar el biodigestor indica el tiempo de retención necesario para que las bacterias puedan digerir la materia. En ambientes de 30°C se requieren unos 10 días, a 20°C unos 25 días y en altiplano, con invernadero, la temperatura de trabajo es de unos 10°C de media, y se requieren 55 días de tiempo de retención. Es por esto que para una misma cantidad de materia prima entrante se requiere un volumen cinco veces mayor para la cámara hermética en la zona del altiplano que para la zona de valle.

Si profundizamos más sobre este problema, podemos afirmar que, en el Altiplano Andino, (es una zona de América del Sur que abarca una parte del norte de Argentina, el oeste de Bolivia, norte de Chile y el sur de Perú) necesitan un mayor número de instalaciones que promuevan la digestión anaeróbica, pues hay abundancia de residuos orgánicos sin tratar, además, en esas zonas carecen de combustibles generados con energías renovables y abonos de carácter agrícolas. El tipo de clima en estas zonas rurales también provoca que haya esta escasez de biodigestores.

Es por este motivo que el Grupo de Investigación en Cooperación y Desarrollo Humano (GRECDH) procedente de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), colaborando junto con el Instituto para una Alternativa Agraria de Perú (IAA) comenzaron una investigación en el año 2006 para solventar este problema.

Tal es el afán por solucionar este contratiempo que, mediante experimentos llevados a cabo en estas zonas se está consiguiendo observar la punta del iceberg a este problema. (Martí 2007; Ferrer et al 2009).

Se comprobó que la velocidad con la que se ejecuta la digestión anaeróbica y la proporción de materia orgánica que se transforma en metano, está íntimamente

relacionada con la temperatura, ya que los microorganismos que intervienen en el proceso aumentan en número con la variación de la temperatura. Se estima que la temperatura donde se consigue un máximo rendimiento en el proceso de la digestión anaeróbica oscila entre los 32°C y 38°C (Kashyap et al 2003). De igual forma que la fermentación anaeróbica requiere de los distintos factores mencionados anteriormente, la formación de metano también necesita que se den ciertas condiciones como, por ejemplo, la composición y las propiedades del sustrato deben ser adecuadas, los microorganismos correspondientes al metano deben ser capaces de realizar su función, tampoco deben existir cambios bruscos de temperatura, entre otros factores.

No se puede afirmar con exactitud cual será la generación de metano en relación con la temperatura, pero si es posible realizar una pequeña estimación, pues se conoce que la velocidad con la que se origina el biogás, se duplica por cada 10°C que se incrementa la temperatura en el reactor, (esto solamente se cumple para valores de temperatura que varían entre 15°C y 35°C) (Fulford 1988). Sin embargo, en el año 1999, Wellinger observó la notable diferencia de velocidad a la que se producía biogás a las diferentes temperaturas, y es que a 35°C la velocidad es exactamente el doble que un digester trabajando a 22°C.

Además de esto, es necesario tener en cuenta que la degradación de la materia orgánica también se ve modificada con la temperatura, de hecho, en zonas donde los climas son más fríos, la transformación de la materia orgánica en biogás se reduce de tal manera que puede llegar a ser un 30% menor a la producida en climas más cálidos. (Wellinger 1999).

Tras una serie de experimentos realizados utilizando modelos matemáticos, se comprobó que esta variación de temperaturas es muy significativa, pues en China durante la época de invierno (entre 6 a 10°C) se anotaron unos valores medios de 0,05 a 0,1 m³ biogás/m³·día, (Daxiong et al 1990) mientras que en los meses de verano (normalmente a 26°C) se alcanzaban unos datos de 1,7 m³ biogás/m³·día (Kalia y Singh 1996).

Sin embargo, en la zona del Altiplano Andino la temperatura rara vez supera los 10°C durante el año (SENAMHI sin fecha). Por lo que si se quiere fabricar un biodigestor para poder procesar la materia orgánica en estas condiciones climáticas tan adversas

se tendría que construir un reactor con un volumen que resultaría impensable económicamente.

Una medida para solventar este problema y poder realizar un aumento de temperatura del digestor es mediante la instalación de colectores solares. (Axaopoulos et al 2001; El-Mashad et al 2004), pero el coste necesario para implantar esta tecnología podría ser excesivo. Otra alternativa puede ser introducir los biodigestores bajo tierra, (caso similar a los invernaderos) (Usmani 1996), es decir, cubrir los reactores para así aumentar en gran medida la captación de la energía solar (Anand y Singh 1993), o bien realizando un calentamiento previo al efluente que entra en el biodigestor (Tiwari 1986; Kishore 1989). A pesar de todas estas alternativas, en casos donde la temperatura sea próxima a los 0°C, tal vez no sean suficientes estas posibles soluciones pues se puede conseguir el efecto contrario, (en vez de aislar el biodigestor para que aumente calor, se desprenda dicha energía al ambiente) (Kishor et al 1988).

Debido a esto, se llevaron a cabo distintos ensayos en Nepal con modelos de reactores cubiertos empleando la tecnología de los invernaderos en lugares montañosos de dicha región, (a 2500 m de altura con una temperatura media al año de 5 °C) (BSP 2003a; BSP 2003b) recogiendo unos valores realmente buenos incluso en las épocas más frías de invierno. Sin embargo, el coste de construcción y de materiales era muy superior (tres veces más) que los demás digestores instalados en climas más áridos (Bajgain y Shakya 2005), esto provoca que volvamos al punto de retorno, pues no es rentable en el ámbito económico.

Por parte de Perú, las investigaciones sobre la adaptación de biodigestores en zonas de elevado relieve durante los años 80 no tuvieron mucha fortuna. Y es que, en la actualidad, todos los biodigestores instalados en estas zonas son inutilizables por el problema comentado anteriormente (Spagnoletta 2007).

Si se analiza con más detalle la evolución de Perú en este ámbito, es necesario comentar que, tras la Reforma Agraria del año 1969, Perú es un país que siempre ha estado marcado por la producción de carne, leche, fibras y cultivos a nivel familiar (Altieri 1999).

Por lo tanto, el abono procedente de animales es abundante en zonas andinas. Una proporción de este residuo orgánico se almacena con el fin de utilizarse para siembra. Sin embargo, no se está aprovechando al máximo esta materia orgánica, pues esta

recolección de abono sin un tanque con las condiciones necesarias para su conserva, provoca que se pierda una gran cantidad de nitrógeno tanto por volatilidad como por lixiviación (Rufino et al 2006). La otra parte del abono generado, una vez este se seca, se emplea como combustible para calentar alimentos, pues en dichas zonas por los climas tan fríos, la falta de leña supone otro problema adicional.

Y es que, en prácticamente todas las zonas rurales de Perú, se ven obligados a utilizar la biomasa como fuente de combustible, (Bruce et al 2006). Además, las condiciones en las que esta materia orgánica son tratadas suponen un gran riesgo para la población, pues pueden aumentar las enfermedades pulmonares y oculares, aparte de trastornos de embarazo. Y es que la Organización Mundial de la Salud (WHO 2007) afirmó que en estas zonas rurales de Perú la tasa de muertes prematuras al año es de 1500 fallecimientos debido a la contaminación del aire.

Es por eso que la digestión anaeróbica supone una solución a estos problemas, pues por una parte se solventaría el problema de la recolección de los desechos orgánicos que no son tratados.

Además, la transformación de esos desechos permite la obtención de un fertilizante de mayor calidad para evitar así que gases perjudiciales como el nitrógeno o el amoníaco (NH_3) (Ortenblad 2000).

Sin embargo, es importante destacar que la combustión incompleta del biogás genera gases malignos para los seres vivos, pero, este impacto es mínimo comparado con una combustión completa de biogás de forma incontrolada. (Smith et al 2000).

Tras una serie de experimentos y años de investigación sobre este tema, se llegó a la conclusión que las soluciones más factibles para satisfacer este problema situado en el Altiplano Andino, es sustituir las distintas fuentes de energía actuales (combustibles fósiles, leña, etc.) por biogás, pues esto provocaría mejoras tanto en la sanidad de los usuarios como en el ambiente de la región.

Además, instalar biodigestores que permitan la obtención del biogás también origina la forma de tratar la materia orgánica de forma más limpia, aunque es necesario que existan programas apoyados por el gobierno peruano que promuevan la financiación de esta tecnología.

5.4 Diseño de los biodigestores

Como se ha comentado anteriormente, el diseño de los biodigestores depende mucho de su finalidad, por esa razón una empresa de fabricación de biodigestores (Figura 32) ofrece una forma gratuita (vía internet) de calcular el tipo de biodigestor más adecuado enfocado a la porcicultura.



Figura 32. Página oficial de Biodigestores Duramax

(JoinTech It. Biodigestores Duramax. Rentabilidad y Resistencia respetando el medio ambiente. [Figura 32]. Recuperado de <http://www.jointech-it.com>)

www.jointech-it.com/calcularbiodigestores.php

JOINTECH IT

Calle 90 No. 11A-34 Oficina 206 Bogotá, Colombia
 Telefonos Bogotá (571) 6100374 - 6100385
 New York (1) 6467274672 - Hong Kong (852) 58080514
 email: jointech@jointech-it.com

CALCULE SU BIODIGESTOR PARA PORCICULTURA

Digite los datos solicitados en el formulario

CLIMA PREDOMINANTE

FRIO MEDIO CALIDO

Tipo de animal	No. animales	Peso promedio
Hembras Vacias	0	0
Hembras Gestantes	0	0
Hembras Lactantes	0	0
Lechones Lactantes	0	0
Precebos	0	0
Machos reproductores	0	0
Porcinos ceba	0	0

Calcular Biodigestor

Figura 33. Tabla de datos para calcular el biodigestor

(JoinTech It. Biodigestores Duramax. Rentabilidad y Resistencia respetando el medio ambiente [Figura 33]. Recuperado de <http://www.jointech-it.com>)

En la Figura 33 podemos observar una ventana externa con una tabla donde meteríamos los datos correspondientes al clima en el cual trabajaría nuestro biodigestor, el número de animales y el peso promedio de dichos animales.

Posteriormente nos calcularía el tipo de biodigestor más necesario para los valores introducidos en la tabla.

6 EL BIODIGESTOR COMO ALTERNATIVA EN MEDIO RURAL

Con el desarrollo del comercio internacional de alimentos, la demanda de productos alimentarios de origen animal está creciendo cada vez más, lo que provoca el gran desarrollo de amplias granjas de cría intensiva (Kerssen, 2015). De esta forma, se producen enormes cantidades de residuos animales. Por lo tanto, es primordial encontrar nuevas formas tecnológicas y económicas viables para tratar grandes cantidades de estiércol y aguas residuales. La digestión anaeróbica está considerada una de las tecnologías más adecuadas en el tratamiento de estiércol y aguas residuales debido a las cantidades de biogás producido y su relevancia económica, además de permitir resolver los problemas de la utilización de residuos de estiércol y la contaminación del medio ambiente simultáneamente (Gyuseong et al., 2018). Dentro del proceso de la digestión anaeróbica, el más utilizado es el reactor de flujo pistón (PFR), un tipo de reactor de proceso de digestión anaeróbica, el cual es eficiente para diversos tipos de sustratos, especialmente en el tratamiento de estiércol (Batstone et al., 2015).

La producción de biogás a gran escala es una tecnología utilizada en países desarrollados como Suecia, Dinamarca y los Estados Unidos (Lönqvist, 2017). No obstante, en los países en desarrollo aún no existe este tipo de producción a gran escala, pues hay una escasa investigación sobre este ámbito. Normalmente, los tipos de reactores más empleados en las plantas son los CSTR. Con el gran crecimiento del número de instalaciones de biogás a gran escala, aparecen nuevos problemas en cuanto a eficiencia, rendimiento y construcción. Comparándolo con otros tipos de reactores anaeróbicos, el PFR es el que posee un funcionamiento más simple debido a la disminución de las partes móviles internas. Su puesta en marcha es más sencilla que otros tipos de reactores, además es barato y fácil de construir, convirtiéndolo así en una tecnología adecuada para facilitar la vida de los agricultores.

Otro método alternativo para la producción de biogás que resulta beneficioso con el medio ambiente es el uso de la planta acuática llamada *Eichhornia crassipes*, (conocida comúnmente como jacinto de agua, y perteneciente a la familia de las Pontederiaceae.) En los últimos años, se ha demostrado que la digestión anaeróbica del jacinto de agua genera cierta producción de biogás. (Malik A, Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth. Environ Int 33:122–138 (2007).) (Wang Z and Calderon MM, Environmental and economic analysis of application of water hyacinth for

eutrophic water treatment coupled with biogas production. *J Environ Manag* 110:246–253 (2012).) (Patil JH, Antonyraj M and Gavimath CC, Study on effect of pretreatment method on biomethanation of water hyacinth. *Int J Adv Biotechnol Res* 2:143–147 (2011).) (Kivaisi AK and Mtila M, Production of biogas from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) (mart) (solms) in a two - stage bioreactor. *World J Microbiol Biotechnol* 14:125–131 (1998).)

Para que el proceso de la digestión anaeróbica sea adecuado, éste dependerá en gran medida de la actividad metabólica llevada a cabo por las distintas uniones microbianas del jacinto de agua. (Weiland P, *Biogas production: current state and perspectives. Appl Microbiol Biotechnol* 85:849–860 (2010).) (Chen Y, Rößler B, Zielonka S, Wonneberger AM and Lemmer A, Effects of organic loading rate on the performance of a pressurized anaerobic filter in two - phase anaerobic digestion. *Energies* 7:736–750 (2014).) Sin embargo, la eficiencia de conversión de biogás utilizando jacinto de agua como materia prima es pequeña si se compara con otras formas de producción de biogás, por lo que es necesario mejorar el proceso de la digestión anaeróbica con el fin de favorecer la actividad microbiana. (Malik A, *Environmental challenge vis a vis opportunity: the case of water hyacinth. Environ Int* 33:122–138 (2007).) Empleando métodos de pretratamiento que modifiquen la estructura lignocelulósica del jacinto de agua, se obtiene una mayor optimización del proceso facilitando así la conversión de la materia orgánica de los diferentes microorganismos. (Patil JH, Antonyraj M and Gavimath CC, Study on effect of pretreatment method on biomethanation of water hyacinth. *Int J Adv Biotechnol Res* 2:143–147 (2011).) (Ofoefule AU, Uzodinma EO and Onukwuli OD, Comparative study of the effect of different pretreatment methods on biogas yield from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Int J Phys Sc* 4:535–539 (2009).) (Alvira P, Tomás - Pejó E, Ballesteros M and Negro MJ, Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresour Technol* 101:4851–4861 (2010).) (Kurniawan T, Putra Y and Murni D, Study of biogas production rate from water hyacinth by hydrothermal pretreatment with Buffalo Dung as a starter. *Waste Technol* 2:26–30 (2014).)

Para que el proceso de la digestión anaeróbica sea óptimo, es primordial que los distintos microorganismos se encuentren en condiciones adecuadas en el digestor. (Weiland P,

Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol* 85:849–860 (2010).) Sin embargo, son muchos los distintos factores que pueden afectar o modificar negativamente a la actividad microbiana reduciendo así la efectividad de la digestión anaeróbica, siendo necesarias numerosas condiciones operativas para la estabilidad de este proceso. Gracias al avance tecnológico y la importancia que este genera en nuestra sociedad actual, son muchos los estudios que se han realizado para simplificar y mejorar este proceso. (Leung *DYC* and Wang *J*, An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste. *Int J Green Energy* 13:119–131 (2016).) (Brown *D* and Li *Y*, Solid state anaerobic co - digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresour Technol* 127:275–280 (2013).

En todo este proceso de desarrollo, divulgación y difusión de esta tecnología en Bolivia, es destacable que la introducción de los biodigestores en una familia significa que ya no se requiere buscar leña diariamente para cocinar ya que se utilizaría el biogás como combustible, por otra parte, el fertilizante obtenido del biodigestor es ecológico y natural pudiéndose usar para el abono de cultivos.

Cuando un biodigestor se instala se realiza su primer llenado con gran cantidad de estiércol y agua, hasta que el lodo interior tape las bocas de las tuberías de entrada y salida para asegurar una atmósfera anaeróbica.

También es importante destacar que cada año se generan unos 140 mil millones de toneladas métricas de residuos agrícolas en todo el mundo (Oladeji and Oyetunji, 2013, Wang et al., 2017). Si no se tratan estos residuos, a la larga existirán grandes problemas para los ecosistemas naturales, además de producir riesgos ambientales y toxicológicos, como, por ejemplo, el calentamiento global originado por las emisiones de gases, futura contaminación de ecosistemas y degradación de los suelos acuáticos. (Parajuli et al., 2018, Siles et al., 2013).

Una forma de paliar este conflicto es mediante la digestión anaeróbica a modo de tratamiento para los distintos residuos agrícolas como pueden ser, la paja de arroz, los residuos de girasoles o la hierba (Monlau et al., 2012, Rodríguez et al., 2017, Wyman et al., 2018, Zhou et al., 2016). Sin embargo, se ha demostrado que la biodegradación de estos residuos es un proceso complejo y tardío, pues la gran presencia de compuestos lignocelulósicos, (es decir, celulosa, hemicelulosa y lignina) no permiten fácilmente la

digestión anaeróbica de los distintos microorganismos, acotando así su metabolismo. (Gandi et al., 1997, Ghasimi et al., 2016, Serrano et al., 2017). Indagando más a fondo en este problema, se ha estudiado que los factores más perjudiciales y que impiden el proceso de la digestión anaeróbica son el contenido de lignina, la cristalinidad de la celulosa y el tamaño de las partículas de los residuos agrícolas. (Hendriks and Zeeman, 2009). Estos componentes dañan fundamentalmente a la hidrólisis, que es la primera etapa de la digestión anaeróbica, paso primordial en el proceso de biodegradación de sólidos orgánicos. (Ortega et al., 2008, Appels et al., 2008).

Una posible solución consiste en añadir oligoelementos como forma de generar metano, siendo este mecanismo bastante eficiente, pues apenas existe consumo de energía y el coste de su realización es bastante bajo. (Shen et al., 1993, Zhang et al., 2015). La labor de los oligoelementos es fundamental en la digestión anaeróbica, pues actúan como cofactores de las distintas enzimas que intervienen en este proceso. (Pobeheim et al., 2010, Fermoso et al., 2015). Por ejemplo, el cobalto se comporta como un cofactor en diferentes compuestos incluidos en la metanogénesis del acetato (Fermoso et al., 2008, Ferry, 1999). Además, se ha comprobado del efecto que provocan otros oligoelementos (cómo pueden ser Fe, Se, Ni, Zn, Mo o W) en fases como la acetogénesis y la metanogénesis. (Choong et al., 2016). Sin embargo, la sabiduría actual sobre la labor de los oligoelementos en la hidrólisis es más escasa. De hecho, las distintas concentraciones adecuadas de oligoelementos para optimizar el proceso de la hidrólisis son incoherentes. Por ejemplo, se apreció una mayor producción de metano, (de hasta un 32%) en la digestión anaeróbica de la paja de maíz si se añadía 1000 mg/l de Fe (Khatri et al., 2015). Sin embargo, Cai et al. (2017) puntualizó que añadiendo solamente un 5 mg de Fe/l era más que necesario para favorecer la digestión anaeróbica de la paja de arroz hasta un 176%. Cada enzima involucrada en la hidrólisis que conforma los distintos compuestos lignocelulósicos y los diferentes factores que afectan a los oligoelementos de estas enzimas, pueden servir de estudio para conocer las dosis necesarias de estos elementos para llevar a cabo la digestión anaeróbica. Sin embargo, aún no se ha profundizado en este ámbito, existiendo así vacíos sobre algunos conocimientos de los requisitos de los oligoelementos necesarios para la degradación de los distintos residuos orgánicos nombrados anteriormente.

En varios países en desarrollo, como puede ser Etiopía, la bio-energía juega un papel fundamental, pues administra un 80% de la demanda energética que existe en ese país. (S. Geissler, D. Hagauer, A. Horst, M. Krause, P. Sutcliffe. Biomass Energy Strategy:

Ethiopia (2013)) A día de hoy se está investigando como optimizar la generación y el manejo de la bioenergía. Una de estas formas de optimización es el biogás, ya que diferentes estudios afirman que el biogás en los hogares rurales de Etiopía permitiría obtener una energía más sostenible que los actuales medios para producir energía. (D. Styles, J. Gibbons, A.P. Williams Cattle feed or bioenergy? Consequential life cycle assessment of biogas feedstock options on dairy farms. *GCB Bioenergy*, 7 (2015), pp. 1034-1049) Debido a esto, desde 2007, el programa nacional de biogás se decretó en las distintas regiones del país con el fin de potenciar este tipo de energía. (G. Eshete, C. Stoop. *National Biogas Programme, Ethiopia: Biogas for Better Life. Brief Programme Profile.* (2007))

El estado de Amhara (una de las regiones de Etiopía) está considerado uno de los nueve lugares donde se lleva a cabo la producción de biogás en las zonas rurales. En esta región se ha comenzado ya con la puesta en marcha, pues hay suficiente materia prima que permite la generación de biogás en los hogares. Estos factores que son capaces de producir una gran cantidad de recursos para el biogás son principalmente, la abundancia de ganado y agua existentes. Sin duda alguna el tipo de biodigestor más empleado en esta zona (por las condiciones del terreno y los distintos factores ambientales que afectan) es el de cúpula fija, pues resulta económicamente viable y, además, requiere de poca área. Este biodigestor se puede adaptar para distintos tamaños que varían entre los 4 m³ y los 10 m³. Normalmente el 75% de los biodigestores poseen una capacidad de 8 m³, mientras que el 25% restante oscila entre los tamaños nombrados anteriormente. La forma de elegir el tamaño del biodigestor es mediante la cantidad de ganado que posee el hogar, de esta manera, el número de abono necesario permite el funcionamiento del biodigestor de manera adecuada. A pesar de los grandes beneficios que genera la utilización de los desechos procedentes de los animales, la combustión de biomasa y los residuos de cultivos en la producción de biogás, se ha comprobado que las emisiones de gases a la atmósfera por estos procesos son realmente altas. Con el fin de solucionar este problema, se ha empleado fertilizantes de tipo orgánico para apaliar las grandes emisiones a la atmósfera. (D. Naimah. *Sustainability Assessment of Small-Scale Biogas Production Using Livestock Manures in Yogyakarta Province, Indonesia (Master Thesis) (2017)*) (A. Shane, S.H. Gheewala. *Missed environmental benefits of biogas production in Zambia. J. Clean. Prod.*, 142 (2017), pp. 1200-1209)

7 USOS DEL BIOGÁS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA PRODUCIRLO

Dentro del ámbito de las energías renovables, la digestión anaeróbica está ganando fuerza, convirtiéndose en una opción más popular a los fósiles de carbono en cuanto a tratamiento de residuos de las aguas residuales [Kelessidis and Stasinakis \(2012\)](#). El proceso de la digestión anaeróbica es el determinante para la producción de biogás, sin embargo, uno de los principales problemas de éste, es su gran variación ante ciertos factores que pueden modificar negativamente los resultados de procedimiento. Debido a esto, es probable que existan inestabilidades y pequeñas disminuciones de flujo de biogás producido [Kim et al. \(2002\)](#). Por eso se han desarrollado modelos matemáticos mecanizados con el fin de monitorear y crear estrategias de control que permitan una mayor mejora del funcionamiento de este proceso, [Donoso-Bravo et al. \(2011\)](#).

En los últimos treinta años se han fomentado modelos complejos de digestión anaeróbica, que, mediante datos experimentales permiten predecir que valores de biogás producido se obtendrán. Este es el caso del Modelo de Digestión Anaeróbica 1 (ADM1), [Batstone et al. \(2002\)](#), el modelo anterior nombrado, posee 29 variables dinámicas de estado, lo que dificulta elaborar análisis cualitativos. También se han planteado más modelos simples centrados en procesos más específicos del ADM1, como por ejemplo el modelo de [Bernard et al. \(2001\)](#), (donde intervienen fases consideradas: acidogénesis y metanogénesis), o el modelo de [Weedermann et al. \(2015\)](#) (considerando tres etapas: acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis).

El biogás es una fuente de energía renovable utilizada para producir energía eléctrica y térmica mediante motores de cogestión o microturbinas, acondicionarse para su uso en las pilas de combustible e incluso purificarse para posteriormente utilizarse como combustible para vehículos o para su inyección en la red de gas natural.

En la actualidad el medio ambiente juega un papel fundamental, y es que los efectos dañinos generados por ciertos combustibles utilizados a día de hoy, ha provocado nuevas investigaciones para el empleo de las energías renovables. ([A. Demirbas. Biofuels](#)

securing the planet's future energy needs. *Energy Convers Manage*, 50 (2009), pp. 2239-2249) F. Cherubini. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Convers Manage*, 51 (2010), pp. 1412-1421,) Podemos destacar dos tipos de combustibles que solventan el problema de emisiones de gases perjudiciales para el medio ambiente, estos combustibles son el biohidrógeno y el biometano. Ambos poseen una densidad energética alta (H_2 122 MJ/kg, CH_4 55 MJ/kg) si los comparamos con los hidrocarburos. (E. Kırtay. Recent advances in production of hydrogen from biomass. *Energy Convers Manage*, 52 (2011), pp. 1778-1789,) (S.H. Kim, S.K. Bhatia, J.J. Yoon, Y.H. Yang. Current status and strategies for second generation biofuel production using microbial systems. *Energy Convers Manage*, 148 (2017), pp. 1142-1156,) (E. Billig, D. Thraen. Renewable methane—a technology evaluation by multi-criteria decision making from a european perspective. *Energy*, 139 (2017), pp. 468-484) (G. Sołowski. Bioprocessing and biotechniques biohydrogen production - sources and methods: a review. *Int J Bioprocess Biotech*, 2018 (2018), pp. 1-22) En el proceso de la digestión anaeróbica, (en concreto en la etapa de acidogénica) para obtener biohidrógeno y biometano, se genera menos energía comparado con otras formas físicas o químicas de obtenerla, sin embargo, este método es más económico. (K. Chandrasekhar, Y.J. Lee, D.W. Lee. Biohydrogen production: Strategies to improve process efficiency through microbial routes. *Int J Mol Sci*, 16 (2015), pp. 8266-8293,) A pesar de la utilización del biometano y el biohidrógeno para la obtención de energía renovable, es importante destacar pequeños detalles necesarios con el fin de optimizar el proceso. El hidrógeno tiene un rendimiento bajo provocado por la oxidación incompleta del sustrato, (sólo se consigue un 33% de conversión) en ácidos volátiles. Por lo tanto, experimentalmente sólo 2 o 3 moles de hidrógeno se transformarán en ácidos volátiles. Esto genera que la producción de hidrógeno se limite además de una disminución del pH en el proceso. (S. Srikanth, S.V. Mohan. Regulating feedback inhibition caused by the accumulated acid intermediates during acidogenic hydrogen production through feed replacement. *Int J Hydrogen Energy*, 39 (19) (2014), pp. 10028-10040)

La utilización del biogás para la obtención de energía se debe a su elevado contenido en metano. En ocasiones, según el origen de este biogás, puede contener elevadas concentraciones de contaminantes impidiendo así su aprovechamiento si no son eliminados previamente. Estos contaminantes, principalmente, son el ácido sulfhídrico, (el cual se produce por una reducción biológica de los sulfatos en condiciones

anaerobias,) y los siloxanos, (compuestos que contienen silicio y que proceden de las siliconas.) En función del uso del biogás que queramos realizar, se deberán eliminar algunos de los contaminantes de este. En la siguiente tabla (Figura 34) aparecen los distintos contaminantes que deben ser eliminados del biogás según la aplicación que realizaremos.

	H ₂ S	CO ₂	Agua	Siloxanos	Compuestos halogenados
Caldera de vapor	✓	✗	✗	✓✓	✗
Motores de cogeneración	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
Microturbinas	✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
Producción de H ₂ /Metanol	✓✓	✗	✓✓	✓✓	✓✓
Combustible para vehículos	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Inyección en la red de gas natural	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓

✗ Eliminación no necesaria ✓ Eliminación recomendable ✓✓ Eliminación necesaria

Figura 34. Tabla de contaminantes que deben ser eliminados del biogás

(Condorchem Envitech. Tratamiento del biogás. Valoración energética del biogás [Figura 34]. Recuperado de <https://blog.condorchem.com>)

En los apartados siguientes se describirá cada tipo de contaminante mencionado en la tabla anterior, con el fin de ver cuándo se debe eliminar y qué técnica es la más conveniente para ello:

7.1 Ácido sulfhídrico (H₂S)

Es un compuesto muy oloroso, tóxico y corrosivo. Debe ser eliminado antes de que el biogás entre en contacto con los motores de cogeneración, las microturbinas o las pilas de combustible, ya que su combustión genera SO₂, compuesto causante del fenómeno de la lluvia ácida.

Para disminuir la formación de este contaminante, se dosifican sales férricas en el digestor, produciendo la precipitación del sulfuro y reduciendo así la formación de ácido sulfhídrico. Sin embargo, la técnica más competitiva para la eliminación de este ácido es la desulfuración biológica, por su elevada eficiencia y sus bajos costes de explotación. (“Tratamiento del biogás - Ingeniería ambiental para el sector industrial,” n.d.)

7.2 Dióxido de carbono (CO₂)

En sí no se trata de un contaminante del biogás, ya que es inocuo para la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, éste debe ser eliminado cuando se quiere obtener de metano concentrado, bien para su uso como combustible para automóviles o bien para su inyección en la red de gas natural. Una de las formas más fáciles para conseguir la separación del CO₂ consiste en su absorción en agua. Las moléculas de CO₂ quedan retenidas en el agua debido a las diferencias de polaridad entre ellas, mientras el metano no se ve afectado pues es bastante apolar. Es importante destacar que la solubilidad del CO₂ en agua depende de la presión, de la temperatura y del pH.

7.3 Agua

Cuando el biogás sale del digestor éste se encuentra saturado de vapor de agua y será necesario secarlo. Un método para lograrlo puede ser refrigerar la tubería y el agua que circula por ella se recoge condensada. Si lo que queremos es una eliminación total del vapor de agua, podríamos usar un agente desecante que absorbería toda esta agua, estos agentes desecantes pueden ser la sílica gel o el Al₂O₃. (“Tratamiento del biogás - Ingeniería ambiental para el sector industrial,” n.d.)

7.4 Siloxanos

Son una familia de compuestos de silicio que se encuentran en forma de vapor en el biogás. Se cristalizan formando sílice, causante de una gran abrasión en los equipos

mecánicos. Los siloxanos se pueden separar del biogás mediante adsorción con carbón activo, obteniéndose así una elevada eficiencia.

Gracias a los filtros de carbón activo también quedarán adsorbidos los BTEX, hidrocarburos y compuestos halogenados que pueda contener el biogás.

Si se desea obtener metano con un poder calorífico (PCI) similar al del gas natural, una forma de purificación alternativa es mediante la filtración por membrana. El gas que se quiere purificar circula a través de una membrana selectiva y dependiendo de la diferente permeabilidad de la membrana a los distintos compuestos, éstos van permeando y el metano se va enriqueciendo. La purificación de este método es efectiva, aunque existe cierta pérdida de metano junto al CO₂ separado, además de que son sistemas caros.

Actualmente se están desarrollando nuevas formas para obtener biogás mediante la aplicación de nanotecnología para optimizar la producción de gas, introduciendo de forma controlada nanopartículas de óxido de hierro en el proceso de tratamiento de materia orgánica, generando así nuevas oportunidades de empleo.

En esta nueva tecnología las nanopartículas de óxido de hierro actúan como un aditivo que “alimenta” las bacterias que degradan la materia orgánica. Este aditivo produce un aumento de la producción de biogás y al mismo tiempo transforma las nanopartículas de hierro en sales inocuas. (“El uso de biometano en el sector del transporte - ¿una opción viable? - SUTP,” n.d.)

Hoy en día la producción de biogás es poco eficiente pues sólo se convierte un 30 o 40% si la comparamos con otras fuentes de energía, en cambio con esta nueva tecnología los estudios realizados demuestran que se produce un gran aumento de este gas combustible, lo que significa una solución rentable y sostenible al procesamiento de residuos orgánicos, favoreciendo así el uso de esta fuente de energía renovable.

De momento, (BiogásPlus) esta tecnología se ha aplicado satisfactoriamente en celulosa y barros de depuradoras urbanas, aunque también puede ser utilizada en diferentes

aplicaciones de la digestión anaerobia, como residuos agrícolas, residuos industriales y urbanos.

El siguiente objetivo es extrapolar esta tecnología a digestores con capacidad de centenares de metros cúbicos, permitiendo entonces poder utilizarla en procesos de digestión anaerobia con residuos de gran nivel de producción en todo el mundo.

Actualmente sabemos que la producción de biogás está creciendo especialmente en países en desarrollo. El uso industrial de biogás, a través de co-generación (producción de electricidad, calor o frío) o depuración de biometano (sustituto renovable del gas natural) tiene muchas ventajas:

- Un impacto positivo en la mitigación del cambio climático.
- Se reemplazan los combustibles fósiles.
- Se produce energía renovable descentralizada, almacenada, flexible y limpia.
- Se produce fertilizante natural.
- Se reducen las emisiones de olores.
- Se crea empleo y desarrollo rural.

Es importante destacar que las plantas de biogás son muy variadas en cuanto a su tamaño, pues existen plantas que trabajan con pocos m³ de biogás por día o plantas que mueven miles de m³ por hora. El tamaño promedio de las plantas de biogás en Alemania es alrededor de 400 kW, lo que genera una producción de biogás equivalente de 200 m³/h (para alcanzar estas cifras son necesarios 11.000 toneladas de cultivo energético, 16.000 toneladas de la fracción orgánica de residuos domésticos o 110.000 toneladas de estiércol por año).

También existe la posibilidad de inyectar biometano en la red de gas natural, haciendo del biogás una fuente de energía renovable muy flexible, de esta forma la red de gas natural ofrece altas capacidades de almacenamiento y permite generar electricidad cuando se necesita.

Alrededor del mundo hay unas 500 plantas de biogás que están actualmente depurando biogás a calidad de biometano. Más de 450 de ellas están ubicadas en Europa. ([Biogas-Journal, Environmental compatibility with biogas as transport fuel, Thomas Gaul,](#)

October 2015) La mayoría de ellas trabajan inyectando el biometano en la red de gas natural, distribuyéndolo junto el gas natural hacia las plantas de co-generación o a estaciones de llenado para posteriormente ser usado como combustible para vehículos. Esta utilización directa en estaciones de llenado es muy importante sobre todo en áreas rurales en países en desarrollo, donde existe una gran cantidad de biomasa disponible y los productos agrícolas requieren de un medio de transporte que podría funcionar con gas natural comprimido (GNC).

En el siguiente gráfico (Figura 35) podemos apreciar el número de plantas de depuración del biogás que existen en Europa (Fuente: Asociación Europea de Biogás)

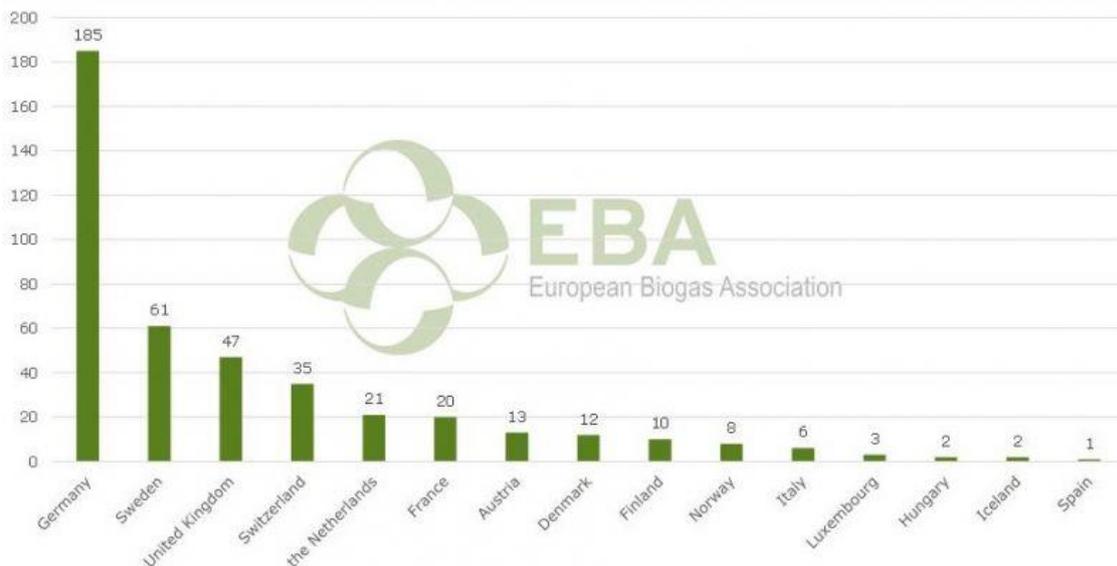


Figura 35. Número de plantas para depurar el biogás en Europa

(Asociación Europea de Biogás. [Figura 35]. Recuperado de <https://sutp.org>)

El biometano tiene características similares al gas natural en cuanto a energía calorífica se refiere, sin embargo, el biometano y el GNC son diferentes al gas licuado de petróleo (GLP), que contiene propano y butano. Normalmente los vehículos usan GNC o GLP, pero no pueden cambiar entre GNC o GLP pues el motor se ajusta para uno de los dos tipos de combustibles.

El gas natural licuado (GNL), empleado principalmente en el transporte pesado (usualmente barcos), está ganando importancia. Varios países están desarrollando planes

para la creación de nuevas infraestructuras de GNL (puertos, estaciones de combustible, vehículos, etc.). En un futuro el biometano podría unirse con el GNL mediante una mezcla física de biometano y gas natural.

Está claro que los vehículos que utilizan GNC como combustible realizan una política energética amigable con el medio ambiente, (sus emisiones de CO₂ son menores que un vehículo cuyo combustible es de petróleo) sin embargo la producción de CO₂ es aún menor cuando se emplea biometano como combustible en lugar del gas natural. Un vehículo utilizando biometano reduce sus emisiones de CO₂ hasta un 90% si lo comparamos con otro vehículo operando con combustible de petróleo.

Por lo que hemos visto el biogás podría utilizarse como combustible para vehículos, pero posee ciertas desventajas si éste no se depura a calidad de gas natural. Varios países (como Alemania, Austria, Suiza y Suecia) ya han establecido un registro de biometano. [\(Biogas-Journal, A technical masterpiece: Ferry operates on biogas, Martina Bräsel, November 2016\)](#) Si el biometano no es inyectado a la red de gas natural éste se comprime en cilindros de gas con el fin de facilitar su almacenaje y transporte. Existen ejemplos donde el mismo biometano que se produce en zonas rurales, son comprimidos en cilindros de gas y posteriormente transportado a estaciones de combustible en donde se realiza la venta de éstos.

El biometano sirve como combustible en todos los motores que normalmente funcionan con gas natural, de hecho, el biometano posee mejores características de quemado que las del gas natural, pues el biometano solo tiene un componente inflamable (metano), mientras que el gas natural posee metano en mayor proporción, pero ciertas cantidades de etano, propano, butano e incluso hidrógeno. Estas sustancias químicas se queman en condiciones diferentes al metano (temperatura, presión).

La gran ventaja de que el biometano se pueda usar como equivalente del gas natural es su uso como combustible en los distintos motores que existen en el mercado actual. Hoy en día ya se usa biometano en automóviles, vehículos pesados, barcos y trenes. Algunos modelos de vehículos que incorporan motores alimentados con biometano son:

- Audi AR Sportback g-tron.
- Opel Combo.
- Skoda Octavia G-TEC.
- Mercedes-Benz B200 NGD / Econic NGT

- Renault D Wide CNG
- SCANIA P/G 280/340 CNG
- VOLVO FE CNG
- Volkswagen ecoup / Caddy TGI
- IVECO Bus Urbanway CNG

En Alemania existen actualmente alrededor de 1000 estaciones de llenado de gas natural, y cerca de 100.000 vehículos funcionando con gas natural. La mayoría de estas estaciones de llenado de gas natural venden una mezcla de gas natural y biogás depurado. (“NGVA Europe | NGVA Europe,” n.d.)

El biometano como combustible, además de proteger el medio ambiente destaca también su aspecto financiero, pues su uso permite un ahorro de dinero, y es más barato el uso de biometano/GNC en comparación con el petróleo o diésel. Sin embargo, los diseñadores de políticas tienen que trabajar para lograr que esta ventaja financiera sea vista cara al consumidor, ya que el gas natural como combustible se vende por kilogramo y no por litro, dificultando la comparación de precios.

Este 2018 se realizará un proyecto pionero en Konstanz, Alemania, donde un ferry entre Konstanz y Meersburg funcionará con GNC o GNL. Este biogás utilizado para el ferry se producirá en plantas de biogás y licuefacción cercanas y empleará residuos industriales y agrícolas como sustrato.

Otro ejemplo es la planta de biogás de BSR (Berliner Stadtreinigung) en Berlín donde 60.000 toneladas de fracciones orgánicas de residuos domésticos son tratadas en un reactor de flujo taponado. El biogás que se produce de este tratamiento es depurado a biometano y seguidamente se inyecta en la red de gas natural. BSR llena 150 camiones de residuos de biometano en tres estaciones de llenado propias, evitando así 2,5 millones de litro de diésel y 12.000 toneladas de CO₂.

Por lo tanto, podemos afirmar que la utilización de biometano y de gas natural en el sector del transporte ofrece varias ventajas para alcanzar una baja economía en carbono y una gran reducción de las emisiones de CO₂.

Teniendo en cuenta el actual precio del petróleo, desarrollar un sector de biometano dependerá mucho de los sistemas de incentivo público. Por ejemplo: En Suecia el empleo

de biometano en el transporte está apoyado por ventajas financieras, pero también por bonos adicionales como estacionamiento gratis u otros beneficios para vehículos renovables. En Alemania, el biometano que producen normalmente es empleado para generar electricidad, así la mayoría de este biometano se inyecta en la red y se usa en plantas de calefacción y energía combinadas (CHP).

Existen zonas del mundo donde la producción de biometano es más barata que los combustibles fósiles. Normalmente los combustibles fósiles, a menudo combustibles basados en el petróleo, son importados, lo que provoca que el precio de éstos sea mucho más alto. (Con el biometano no se da este problema, pues en las áreas rurales en países emergentes y en desarrollo el biometano que se produce es consumido por éstas mismas zonas.)

Los países en desarrollo poseen un gran potencial de biomasa, biogás y/o biometano, empleando el GNC como combustible para el transporte. También es importante destacar que en algunos países emergentes el tamaño de las plantas de biogás es mucho más grande que las plantas existentes en Europa, lo que favorece que haya una mayor depuración de biogás. ([“European Biogas Association - Website of European Biogas Association \(EBA\)European Biogas Association,”](#) n.d.)

Como conclusión podemos decir que el biometano ayuda a establecer una energía sostenible y renovable en el sector transporte, con su uso permite un gran ahorro de CO₂ y los vehículos que funcionan con GNC promueven un gran avance en el sistema de transporte con el fin de reducir y evitar cualquier emisión nociva para el medio ambiente.

8 ESTUDIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE CARTAGENA

Uno de los ejemplos en los que el biogás juega un papel muy importante, es en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos de El Gorguel (situada en Cartagena, Murcia).

El procedimiento que se realiza en dicha planta es el siguiente: Primero observan el terreno y lo preparan para posteriormente realizar la cuna, una vez hecho esto colocan la materia orgánica y acto seguido se introduce una primera capa de compost y finalmente una capa de piedras y grava donde se colocan las tuberías para la captación del biogás.



Figura 36. Planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 36]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))



Figura 37. Colocación de la materia orgánica para su posterior tratamiento, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

((Figura 37). Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

En la figura 37 podemos observar la primera etapa del proceso, tras la realización de la cuna la materia orgánica es colocada en ella para posteriormente introducir encima de ésta, la primera capa de compost y a continuación, situar la capa de piedras y grava.



Figura 38. Distintos pozos para la extracción del biogás, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 38]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

Los pozos de donde se extrae el biogás (Figura 38) pueden ser horizontales o verticales, en caso de que la extracción sea de forma horizontal, los tubos poseen una serie de ranuras lo que facilita la extracción de biogás.

Todo el biogás recogido en la extracción de los pozos va a parar a una gran tubería central conectada a un sistema eléctrico (formado por depósitos y motores) que transforman dicho gas en energía eléctrica abasteciendo así de electricidad a las distintas instalaciones que conforman el lugar.



Figura 39. Pozo vertical, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 39]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

La Figura 39 nos muestra una extracción de tipo vertical del biogás, el gas sube por la tubería más ancha de color negro y es transportado hasta llegar a una válvula de retención situada metros antes de otro conducto de mayor diámetro conectado ya con la tubería principal. La función de la válvula de retención es la de regular la cantidad de biogás que

será enviado a la tubería principal, y así conseguir una mayor calidad de éste en el posterior tratamiento. Centímetros antes de la válvula de retención, se encuentra una válvula de medición, en la que se recogen valores de la calidad del biogás y de esta forma, regular manualmente si se quiere obtener mayor o menor proporción de metano en el biogás que va a ser tratado.



Figura 40. Válvula de retención y válvula de medición, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 40]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

En la Figura 40 se puede apreciar con mayor claridad la válvula de retención y la válvula de medición comentadas anteriormente.

Una vez que el biogás es extraído de los pozos y recirculado, éste llega a la planta de tratamiento para poder convertirlo en energía eléctrica y abastecer de electricidad las demás instalaciones del lugar. En la planta de tratamiento el gas entra a un depósito cíclico para posteriormente ser enviado a una turbina. Durante este proceso, el biogás es

conducido a través de una serie de separadores donde se retienen los componentes perjudiciales para que éstos no dañen la turbina.



Figura 41. Planta de tratamiento del biogás, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 41]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

En la anterior imagen (Figura 41) se puede observar claramente el depósito cíclico y como está conectado a la turbina.

Una vez que el biogás llega al depósito cíclico es importante mirar la proporción de metano que se obtiene con el fin de observar si los pozos de donde se recoge el biogás están extrayendo adecuadamente o por el contrario hay pozos en los cuales apenas se aprecia nivel de metano suficientemente alto como para merecer la pena dicha extracción.

Las distintas medidas de metano recogidas en el depósito cíclico son tomadas con un medidor especial, el cual se conecta a una salida superior que posee el depósito y así recoger los valores pertinentes.



Figura 42. Medidor de biogás, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 42]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

Observando la imagen anterior del medidor de biogás, (Figura 42) apreciamos los valores recogidos en una medición, 85.8% de CO₂, 2.3% de O₂ y 48.3% de Metano. Además, este medidor nos permite conocer la ppm del ácido sulfhídrico.

Aparte de controlar los datos de CO₂, O₂ y Metano es importante tener en cuenta la ppm de ácido sulfhídrico además de controlar la humedad, pues estos factores pueden producir daños a la larga tanto en el depósito cíclico como en la turbina generadora de electricidad.

Para evitar estos problemas se recurre al carbón activado, cuya función es la de captar los silanos o el ácido sulfhídrico, (depende del tipo de carbón activo que se esté utilizando) y así evitar el deterioro de los distintos materiales y componentes que forman la turbina y el depósito cíclico.



Figura 43. Carbón activado, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 43]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

En la imagen anterior (Figura 43) podemos observar el tamaño del carbón activo y la forma cilíndrica que tiene. Si analizamos de forma más pausada un carbón activo, podemos apreciar una gran porosidad, (los cuales son menores a 2 nanómetros de radio). Gracias a esta propiedad, el carbón activo recoge tan bien el componente químico para el que esté diseñado captar. De esta forma, el carbón activado juega un papel fundamental

en el proceso de transformación del biogás a energía eléctrica, pues reduce en gran medida el costo de mantenimiento por el deterioro de la turbina y el depósito cíclico.

Si profundizamos más en los distintos problemas que puede acarrear en la maquinaria que conforman la turbina y el depósito cíclico, en las Figuras 44 y 45 se puede observar con facilidad como la sílice se deposita en las hélices de la turbina y el depósito cíclico impidiendo su adecuado funcionamiento y el posterior deterioro.



Figura 44. Hélice deteriorada por la sílice, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

((Figura 44). Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))



Figura 45. Deterioro provocado por la sílice, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 45]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

Si ampliamos la Figura 44 podemos observar lo siguiente:



Figura 46. Hélice deteriorada por la sílice, ampliación de la Figura 34, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 46]. Imagen realizada en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

En esta imagen (Figura 46) se observa con más precisión como la sílice se adhiere a las aletas de la hélice en este caso provocando el mal funcionamiento de ellas y posteriormente el deterioro final.

Si volvemos a las medidas recogidas de los distintos componentes que forman el biogás podemos realizar la siguiente tabla:

Componentes	Unidades	Valores
Metano	%	48.3
Dióxido de Carbono	%	85.8
Oxígeno	%	2.3
Ácido Sulfhídrico	ppm	40

Tabla 1. Valores recogidos por el medidor de biogás en abril del año 2019, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Tabla 1]. Tabla realizada mediante distintos valores tomados en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

Analizando un poco los valores obtenidos y sabiendo que el porcentaje de metano en el biogás ronda entre un 55% y un 70%, se puede asegurar que está entrando biogás de muy baja calidad al depósito cíclico, esto es debido tal vez al que el pozo de dónde se está extrayendo el biogás ya no se encuentra en las condiciones óptimas y por tanto será necesario buscar otro pozo.

Normalmente, cuando se realiza el procedimiento anteriormente mencionado de elaboración de una nueva cuna, colocación de la materia orgánica y las posteriores capas de compost, para finalmente introducir los conductos y así empezar la recogida del biogás, no es hasta los 3 o 4 días cuando el porcentaje de metano comienza a elevarse lentamente y, dependiendo de las condiciones del terreno, los factores medioambientales del lugar, la temperatura o la humedad entre otros muchos aspectos, es posible que el máximo valor de metano no se alcance hasta los 10 o 15 días de la primera extracción.

Por esto mismo la vida útil de un pozo puede durar perfectamente entre 20 o 30 días. Con estos datos estimatorios y el valor obtenido de la medición del mes de abril de este año

del porcentaje de metano, se puede elaborar una gráfica dónde se muestre la evolución de dicho compuesto a lo largo del tiempo.

Realizando una gráfica tiempo – porcentaje de metano, haciendo una aproximación de cómo evolucionan las medidas y suponiendo que el valor tomado en abril de 2019 correspondería a los días finales de extracción de ese pozo tenemos:

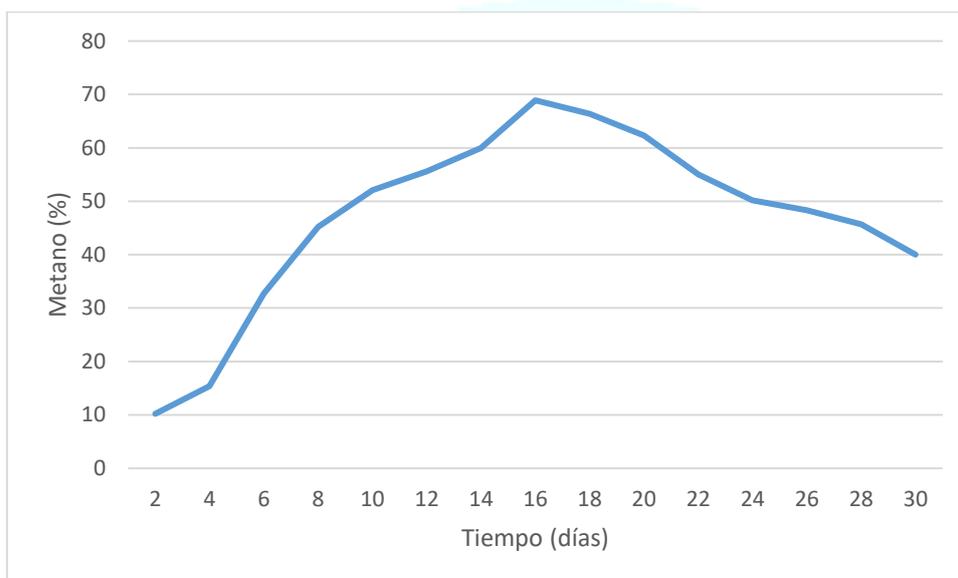


Figura 47. Gráfica tiempo-porcentaje de metano de una serie de extracciones de biogás, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 47]. Gráfica realizada mediante los valores tomados en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

Observando detenidamente la gráfica (Figura 47), podemos destacar que tiene cierta similitud con una especie de campana de Gauss, donde las primeras extracciones de biogás que son recogidas no muestran una gran proporción de metano, pero con el paso de los días va mejorando dicho porcentaje llegando a un máximo (máxima cantidad de metano y por tanto mejor calidad del biogás).

Al cabo de un tiempo se hacen comprobaciones periódicas, (topógrafos y trabajadores especializados en medio ambiente) comprueban el terreno donde se introduce la materia orgánica para evitar daños al ecosistema. Generalmente esto sucede al iniciar una nueva cuna, al terminar de recoger el biogás de una zona en concreto se analiza e investiga donde

se podría realizar la siguiente cuna para volver al mismo procedimiento anterior, sin embargo, este análisis de terreno es llevado a cabo por un topógrafo.

Por último, es importante destacar que las mediciones recogidas este mes de abril, han sufrido pocas variaciones si las comparamos con los años anteriores, en la siguiente imagen (Tabla 2, Figura 48) aparecen los valores recogidos de cada componente que conforma el biogás en un análisis tomado en 2011.

Your Reference		Cartagena
Result(s)	Units	
Methane	%	47.9
Carbon Dioxide	%	31.7
Nitrogen	%	18.9
Oxygen	%	1.5
Hydrogen	ppm	557
Ethylene	ppm	<5
Ethane	ppm	<5
Acetylene	ppm	<5

Figura 48. Análisis del biogás extraído en el año 2011, El Gorguel (Cartagena, Murcia)

([Figura 48]. Tabla realizada de medidas tomadas en el año 2011 en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos del El Gorguel, (Cartagena, Murcia))

Observando el porcentaje de metano de esta tabla y lo comparamos con el valor obtenido en la medida del mes de abril, podemos asegurar que existe cierta similitud en cuanto a los resultados recogidos, por lo que en cuanto a calidad de biogás no se aprecia mucha variación. Sin embargo, el valor del dióxido de carbono si es bastante más superior a día de hoy que hace ocho años, esto es debido tal vez a la forma de tratar la materia orgánica, es muy probable que la instrumentación utilizada sea muy diferente a la actual. También la manera en la que se realiza la cuna y como se añade la posterior capa de tierra haya provocado esa gran variación de dióxido de carbono.

Una vez visto todo el proceso de tratamiento de la materia orgánica como del posterior biogás recogido, podemos analizar las distintas ventajas que posee dicha planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

- La extracción de biogás se realiza de forma económica, pues la utilización de tuberías no requiere de una gran instrumentación para el proceso.
- La electricidad generada permite que la planta tenga energía para su uso las 24 horas al año.
- La zona en la cual se encuentra la planta permite la elaboración con cierta comodidad y facilidad de la erosión del terreno para su posterior tratamiento, cumpliendo con las revisiones de calidad y modificando el ecosistema lo menos posible.

Por parte de sus inconvenientes podemos añadir que:

- La calidad del biogás recogida no es regular, es decir, se requiere de un tiempo de espera demasiado elevado para obtener un biogás de muy buena calidad.
- No se consigue la mayor productividad a los demás componentes del biogás, solamente se usa el biogás con el fin de generar energía eléctrica sin importar el porcentaje de metano para un empleo posterior, se anota diariamente el porcentaje de metano, pero con el fin de comprobar la calidad general de él y ver si se encuentra en aumento o en descenso dicho porcentaje.
- Se requiere tener un especial cuidado tanto con las tuberías y conductos que permiten la recogida del biogás, como la maquinaria que conforma la planta de tratamiento de éste, pues debido a los condicionantes atmosféricos, (la temperatura, el terreno, etc) existen ciertos problemas comentados anteriormente que deben ser observados con antelación y tratados con tiempo, pues el posterior deterioro y coste de mantenimiento se elevará notablemente en caso de que estos contratiempos se produzcan.

(Toda la información anteriormente redactada ha sido facilitada por la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos de Cartagena situada en las cercanías de El Gorguel).

Otro ejemplo de planta que utiliza el biogás es la Destiladora de Hidrogea situada cerca de La Aparecida (Murcia). En esta planta la materia orgánica procedente de las aguas

residuales juega un papel fundamental, es decir, se encargan de eliminar el residuo sólido que viene junto con el agua, separando así materia orgánica y agua, la cual es sometida a una recirculación para su posterior tratamiento.

Por parte de la materia orgánica ésta se calienta produciendo biogás que es llevado a dos biodigestores, estos biodigestores tienen forma de globo y actúan como tal. Conforme el biogás va entrando dentro de los biodigestores éstos comienzan a llenarse interiormente hasta alcanzar su máxima capacidad. Cuando se quiere utilizar el biogás, éstos se deshinchaban expulsando así el gas.

Si analizamos la calidad del biogás obtenido podemos representar la siguiente gráfica:

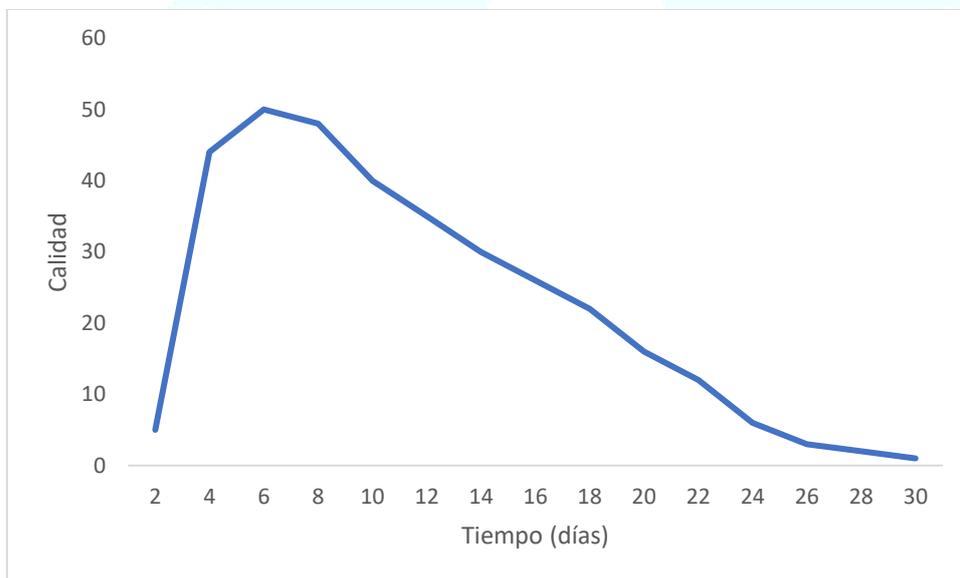


Figura 49. Gráfica tiempo-calidad de cada extracción de biogás en la destiladora

([Figura 49]. Gráfica realizada partiendo de valores estimatorios de la destiladora de Hidrogea situada cerca de La Aparecida (Murcia))

Observando la gráfica (Figura 49) podemos decir que se alcanza una calidad muy alta de biogás en un periodo muy corto de tiempo, pasado ese tiempo el porcentaje de metano del biogás disminuye y por tanto pierde calidad.

Si analizamos las ventajas e inconvenientes de esta planta en relación con el biogás podemos decir:

Ventajas

- La calidad del biogás obtenida es muy buena en los primeros días de su extracción.
- Al almacenarse el biogás en un biodigestor como tal puede adecuarse a ciertas condiciones sin perder calidad.

Inconvenientes

- No se consigue la máxima productividad del biogás, pues éste solo se obtiene como producto secundario en el proceso fundamental de la planta.
- El mantenimiento de los biodigestores es caro y requiere de revisiones periódicas.

Por último, si realizamos una comparación entre la forma de obtención y aprovechamiento del biogás en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos de Cartagena y la Destiladora de Hidrogea podemos destacar que la calidad de biogás obtenida es mejor en la Destiladora que en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos, por parte de la extracción y el almacenaje del biogás es mucho más barato en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos que en la Destiladora, pues el biodigestor es natural.

Sin embargo, hay un punto en común entre en la planta de tratamiento de residuos sólidos y la Destiladora, y es que ninguna de las dos aprovecha la composición del biogás, es decir, en el punto de mejor calidad del biogás siguen empleando el biogás como origen de energía mecánica pero no como combustible.

9 Conclusiones

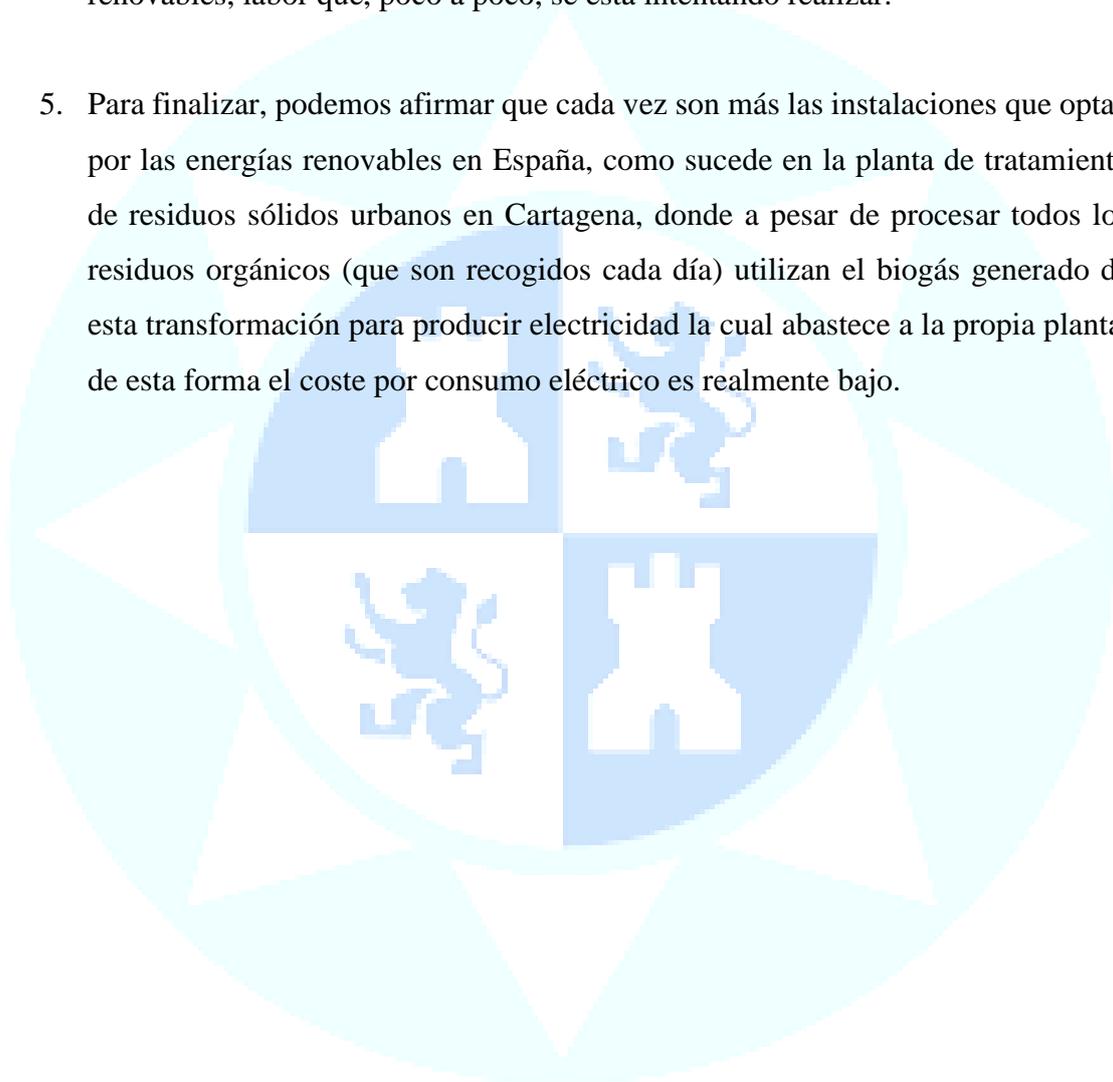
Para finalizar este trabajo en el que se ha podido observar los distintos usos y obtención del biogás a lo largo de los años hasta el día de hoy, es importante destacar los grandes avances en dicha tecnología relacionada con el proceso de la digestión anaeróbica y sobre todo apreciar los distintos problemas y diferentes alternativas que posee este tipo de energía limpia en diferentes zonas del mundo.

1. Puntualizando más en cada parte de las mencionadas anteriormente, con respecto a la composición del biogás es fundamental tener en cuenta las etapas que forman la digestión anaeróbica, además de los distintos factores que pueden modificar el rendimiento del proceso de la degradación de la materia orgánica, como son la temperatura, el pH, las condiciones climáticas del ambiente, entre otros.
2. Por parte de los beneficios que posee el biogás podemos afirmar que en zonas rurales este gas es realmente importante, pues se emplea como medio de calentamiento de alimentos además de que la instalación de biodigestores en estos lugares, permite el tratamiento de abonos y residuos orgánicos generados en granjas de forma adecuada, es decir, sin que se produzca emisiones de gases incontroladamente, evitando así problemas medioambientales y sanitarios que pueda acarrear a los habitantes residentes.
3. También es importante tener en cuenta los tipos de biodigestores (y los componentes que forman cada uno) que existen y saber cual de ellos sería el más adecuado según la materia orgánica que queramos procesar y el uso posterior que se le va a dar a dicho biogás generado.
4. Otro factor a destacar es como en otros países más desarrollados utilizan el biogás como combustible para vehículos, y es que a pesar de que en la sociedad actual el petróleo sigue siendo una forma de energía esencial a nivel automovilístico, con

la gran concienciación sobre el medio ambiente, el uso de las energías renovables está revolucionando un poco este tipo de mercado, fabricándose motores que funcionan con este tipo de energía limpia como hemos observado en este proyecto.

Sin embargo, implementar estos cambios aún es tarea complicada en algunos países, pues a parte de conllevar un gran gasto económico, el gobierno del país debe crear programas de mejoras y promoción del uso de estas energías renovables, labor que, poco a poco, se está intentando realizar.

5. Para finalizar, podemos afirmar que cada vez son más las instalaciones que optan por las energías renovables en España, como sucede en la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos en Cartagena, donde a pesar de procesar todos los residuos orgánicos (que son recogidos cada día) utilizan el biogás generado de esta transformación para producir electricidad la cual abastece a la propia planta, de esta forma el coste por consumo eléctrico es realmente bajo.



10 Referencias y Bibliografía

Deublein D. y Steinhauser A. 2008 « Biogas from Waste and Renewable Resources: An introduction » Wiley-VCH editors Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 447 págs.

BIOGAS Asia Pacific Forum | Events | Asia | Sustainable Business. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://www.eco-business.com/events/biogas-asia-pacific-forum/>

Brakel J. 1980 “Small-scale anaerobic digesters (Biogas Plants): A critical review of the pre-1970 literature” Softbank, Ex-Library Delfy University Press.

Lusk P. 1998 “Methane recovery from animal manures. The current opportunities casebook” En: NREL, Golden. Colorado USA pp:3-7.

Sathianathan M. A. 1975 Biogas Achievement and Challenges Association of Voluntary Agencies and Rural Development, New Delhi: A multidisciplinary Reviewed by Andrew Barnett, Leo Pyle and Subramanian, The Biogas Technology in the third world.

Titjen C. 1975 “From Biodung to Biogas: Historical review of European experience”. En: Energy, agriculture and waste management” W.J. Jewell ed. Ann Arbor Science 347-59.

Stafford A.D. y Hawkes L.D. 1980 “Metane production from waste organic matter” CRC Press, Inc., Boca Raton Fl, USA.p:285

Biogas Upgradation | Sustainable Solutions. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://wteconsult.wordpress.com/2012/03/05/biogas-upgradation/>

McCarty P.L. 2001 “The development of anaerobic treatment and its future”. En: Water Science and Technology 21: 1857-60.

Tema 7 metabolismo celular anabolismo. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://www.slideshare.net/pacozamora1/tema-7-metabolismo-celular-anabolismo>

Roediger H. 1955 “Die anaerobe alkalische Schalmmfaulung”. Gwf, Schriftenreihe Wasser, Abwasser Bd 1.R. Oldenbourg Verlag.

McCabe B.J. y Eckenfelder N.W. 1957 “Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes”. En: Vol. II “Anaerobic Digestion and Solids-Liquid Separation” New York. Reinhold Publishing. 330 pp.

Waksman S.A. y Skinner C.E. 1925 “Microorganisms concerned in the decomposition of celluloses in the soil” En: The Journal Series, New Jersey Agricultural Experiment Stations, Department of Soil Chemistry and Bacteriology, Paper No 250.pp: 57-84

Barker H.A. 1956 “Biological Formation of Methane”. En: Bacterial Fermentations: Chap. I De: John Wiley and Sons (Ed.). New York.pp:1

Greeley S.A, y Velzy C.R. 1936 “Operation of sludge gas engines”. En: Sewage Works Journal 8 (1): 57-63.

Campos A.E. 2001 “Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria” Tesis Doctoral. Laboratorio de Ingeniería Ambiental, Dpto. de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lérida. 394 pp.

Biogás - El Gas Combustible Alternativo - ElBlogVerde.com. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://elblogverde.com/el-biogas/>

¿Que es el biogás? – Ecogal. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <http://ecogal.es/divisiones/ecogal-biogas/que-es-biogas/>

Biogás - Plantas de Biomasa. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <http://www.plantasdebiomasa.net/index.php/la-ingenieria-del-mantenimiento/2-uncategorised/37-biogas>

Borrás Brucart, E. Gas natural, Características, distribución y aplicaciones industriales. Editores Técnicos Asociados,S.A., Barcelona 1987.

Biogás: basura orgánica convertida en energía | Biogeomundo. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <http://biogeomundo.blogspot.com/2017/04/biogas-basura-organica-convertida-en.html>

Gene P. y Owen W. 1986. Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. Journal of Environmental Engineering 112:867-916.

(Hansen M.N., Birkmose T., Mortensen B. y Skaaning K. 2004. Environmental effects of anaerobic digestion and separation of slurry - odour, ammonia emission and nitrogen utilisation. Correll, A. (Ed.) Grøn Viden, Markbrug, no. 296. Danish Institute of Agricultural Sciences, Dep. of Agricultural Engineering.)

(Insam H., Franke-Wittle I. y Goberna M. 2009. Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. En: Microbes at work. From wastes to resources. Insam H., Franke-Wittle I. y Goberna M. (Eds). Pp. 1-34. Springer. Heidelberg, Dordrecht, London, New York)

Fases de la digestión anaeróbica - Biodigestores - plantas de biogás - generadores - energía. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>

Steffen, R., Szolar, O., Braun, R. 1998. Feedstocks for Anaerobic Digestion. Technical paper 199809-30, Institute for Agro biotechnology, Tulln University of Agricultural Sciences, Vienna, Austria.

Angelidaki, I., Ahring, B. K. 1994. Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: Effect of temperature. *Water Res.* 28(3):727–731.

Kepler, F. et al. (2006). Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature* 439

Archer, D. B., Harris, J. E. 1986. Methanogenic bacteria and methane production in various habitats. In: *Anaerobic Bacteria in Habitats Other Than Man*, E. M. Barnes & C. Mead (Eds), pp. 185– 223. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK

Hansen M.N., Birkmose T., Mortensen B. y Skaaning K. 2004. Environmental effects of anaerobic digestion and separation of slurry - odour, ammonia emission and nitrogen utilisation. Correll, A. (Ed.) *Grøn Viden*, Markbrug, no. 296. Danish Institute of Agricultural Sciences, Dep. of Agricultural Engineering.

Grundey, K. 1982. *El tratamiento de los residuos agrícolas y ganaderos*. Ediciones. GEA. 340pp

¿Qué es y cómo funciona un biodigestor? (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://okdiario.com/curiosidades/que-como-funciona-biodigestor-2777614>

LOS BIODIGESTORES, IMPORTANCIA Y BENEFICIOS. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://www.fundesyram.info/biblioteca.php?id=6181>

Lorenzo Acosta, Yaniris, Obaya Abreu, Ma Cristina, *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar 2005*, [Fecha de consulta: 29 de mayo de 2019]

Biodigestor - EcuRed. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://www.ecured.cu/Biodigestor>

Varnero, M.T.; Faúndez, P.; Santibáñez, C. 2004. Evaluación de lodo fresco y compostado como materia prima para la elaboración de sustrato, *Actas del Simposio de*

las Ciencias del Suelo “Residuos Orgánicos y su Uso en Sistemas Agroforestales”, 361-365, Temuco – Chile, 5 a 6 de agosto 2004.

Varnero, M.T. y Arellano, J. 1990. Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago, Chile, 98p..

Estudio de viabilidad de una instalación de cogeneración. Estudio viabilidad técnica. Válvulas de seguridad y rompedora de vacío. Págs 45-46.

Montes, J. (2012). Introducción de mejoras en el proceso de aderezo de aceitunas.

Xylem Applied Water Systems – Mexico Separador de Eliminación de Sedimentos - Xylem Applied Water Systems - Mexico /. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <http://xylemappliedwater.mx/brands/bell-gossett/air-sediment-control-expansion/tangential-air-separators/sediment-removal-separator/>

Medidores de volumen de gas - MK Energía. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://mk-energia.com/equipos/medidores-de-volumen-de-gas/>

BIODIGESTORES: Biodigestor chino. (n.d.). Retrieved June 19, 2019, from <http://biodegestores.blogspot.com/2011/09/biodigestor-chino.html>

BIODIGESTORES: Biodigestor hindu. (n.d.). Retrieved June 19, 2019, from <http://biodegestores.blogspot.com/2011/09/biodigestor-hindu.html>

Poggio, D., Ferrer, I., Batet, L., & Velo, E. (2009). Adaptation of plastic tubular biodigesters to cold climates. Adatación de Biodigestores Tubulares de Plástico a Climas Fríos, 21(9), 1–16. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-70349548743&partnerID=40&md5=25cf9436d0654f9b0c414d964b4db326>

Dong, L., Cao, G., Guo, X., Liu, T., Wu, J., & Ren, N. (2019). Efficient biogas production from cattle manure in a plug flow reactor: A large scale long term study. *Bioresource Technology*, 278(January), 450–455. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.100>

Nkuna, R., Roopnarain, A., & Adeleke, R. (2019). Effects of organic loading rates on microbial communities and biogas production from water hyacinth: a case of mono- and co-digestion. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 94(4), 1294–1304. <https://doi.org/10.1002/jctb.5886>

Wyman, V., Serrano, A., Feroso, F. G., & Villa Gomez, D. K. (2019). Trace elements effect on hydrolytic stage towards biogas production of model lignocellulosic substrates. *Journal of Environmental Management*, 234(July 2018), 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.015>

Gabisa, E. W., & Gheewala, S. H. (2019). Potential, environmental, and socio-economic assessment of biogas production in Ethiopia: The case of Amhara regional state. *Biomass and Bioenergy*, 122(November 2018), 446–456. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.003>

Bayen, T., & Gajardo, P. (2019). On the steady state optimization of the biogas production in a two-stage anaerobic digestion model. *Journal of Mathematical Biology*, 78(4), 1067–1087. <https://doi.org/10.1007/s00285-018-1301-3>

Kaur, M., Srikanth, S., Kumar, M., Sachdeva, S., & Puri, S. K. (2019). An integrated approach for efficient conversion of Lemna minor to biogas. *Energy Conversion and Management*, 180(September 2018), 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.106>

Tratamiento del biogás - Ingeniería ambiental para el sector industrial. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://blog.condorchem.com/tratamiento-del-biogas/>

El uso de biometano en el sector del transporte - ¿una opción viable? - SUTP. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://sutp.org/es/news-reader/el-uso-de-biometano-en-el-sector-del-transporte-una-opcion-viable.html>

Biogas-Journal, Environmental compatibility with biogas as transport fuel, Thomas Gaul, October 2015

Biogas-Journal, A technical masterpiece: Ferry operates on biogas, Martina Bräsel, November 2016

NGVA Europe | NGVA Europe. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <https://www.ngva.eu/>

European Biogas Association - Website of European Biogas Association (EBA)European Biogas Association. (n.d.). Retrieved June 10, 2019, from <http://european-biogas.eu/>

