

TECNOLOGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL GAS PRODUCIDO POR LA DIGESTION ANAEROBICA DE LA MATERIA ORGANICA

Technologies for the utilization of gas derived from anaerobic digestion of organic matter

Luis Alfredo Hernández A.¹

RESUMEN

El aprovechamiento energético del gas metano, compuesto principal del biogás, subproducto gaseoso producido de la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, en forma sólida o soluble, constituye un factor importante que complementa las bondades tecnológicas para la implantación y desarrollo de sistemas de tratamiento de residuos orgánicos mediante la digestión anaeróbica.

El presente artículo muestra las bondades técnicas y operativas en la implementación de tecnologías para el aprovechamiento energético del biogás en motores de combustión, lámparas para alumbrado, quemadores domésticos e industriales y calderas.

Palabras claves: Biogás, energía de residuos orgánicos, digestión anaeróbica, energético.

SUMMARY

Energetic use of methane gas, main component of biogas, by product gas of anaerobic fermentation of organic material both solid or soluble forms. It's a more important factor that helps to implantation of technologies for the development of sistem for trataments of organic wastes from anaerobic digestions.

The present article shows the technical operative advantages in the improvement of technologies for energetics use of biogas for combustion engines, lamps of lightening, domestic and industrial fires and boilers.

Key words: Biogas, energy from organic wastes, anaerobic, digestion, energy.

INTRODUCCION.

El gas producido en el proceso de descomposición anaeróbica, más conocido como biogás, representa la materia orgánica en proporciones que varían entre 10 y 40%, dependiendo de las formas y sistemas de control a los cuales esté sujeta su estabilización, ya sea en condiciones naturales o activadas por el hombre.

Este gas, compuesto principalmente por metano y bióxido de carbono, almacena una considerable cantidad de energía que puede ser aprovechada mediante la combustión en diferentes procesos como motores de combustión, lámparas de iluminación, quemadores domésticos e industriales, calderas y en sistemas de refrigeración, mediante tecnologías apropiadas que, además, aliviarían efectos ambientales adversos que el biogás puede producir cuando es descargado a la atmósfera sin una depuración adecuada.

Aunque el desarrollo investigativo y la transferencia de tecnología no han tenido una alta resonancia a nivel nacional e internacional, se pretende, con el presente trabajo despertar el interés en estos sectores hacia la implementación de sistemas anaeróbicos con recuperación de biogás en la solución de pro-

¹ Profesor Asociado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá.

blemas derivados de altas producciones de materiales orgánicos, principalmente en los sectores de tratamiento de aguas residuales domésticas, agroindustriales, de vertimientos sólidos y líquidos de mataderos o plantas de sacrificio de animales, de las basuras de plazas de mercado y de la descomposición del material orgánico en los rellenos sanitarios.

APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN

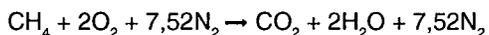
El metano, principal componente del biogás (CH₄, CO₂ y SH₂), producido de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, como cualquier hidrocarburo gaseoso, se puede utilizar eficientemente como combustible en motores de combustión interna.

Un biogás con un contenido de metano entre 55 y 65%, al entrar en combustión, produce una llama azul y puede tener un poder calorífico entre 22.000 a 26.000 KJ.m³.

Para tener idea del comportamiento termodinámico del biogás en el proceso de combustión interna, es conveniente, como punto

de referencia, conocer el comportamiento del metano o gas natural como combustible, tal como se puede apreciar en el cuadro 1.

La estequiometría de la combustión del metano se plantea en la siguiente reacción:



De esta forma, la relación en peso de aire/combustible será:

$$(\text{2O}_2 + 7,52\text{N}_2)/(\text{CH}_4) = (64 + 210,5)/16,04 = 17,1 \text{ Kg de aire por cada kg de metano quemado.}$$

Si se tiene en cuenta que la relación de compresión del metano o gas natural está del orden de 8/1, siendo similar a la de otros combustibles gaseosos y gasolinas y además el óptimo índice de octanos (similar al de una gasolina etílica), su relación aire/combustible en peso (la relación de compresión para la gasolina es de 7,5/1), la posibilidad de compresión por encima de la establecida para motores de combustión del ciclo Otto (130 P.S.I. a c.s.t.p.) permite predecir un buen comportamiento del biogás y, específicamente, el metano como combustible en

CUADRO 1. Características físico-químicas y energéticas del metano.

Características	Valor
Fórmula	CH ₄
Peso molecular	16,042
Punto de ebullición a 760mm Hg	-161,5°C
Punto de congelación a 760mm Hg	-182,5°C
Presión crítica	474 kgcm ²
Volumen especif. a 15,5°C y 760mmHg	1,47L.g ⁻¹
Poder calorífico (stc)	38,130 KJ/kg
Vol. aire/vol. comb. en combustión	9,53
Índice de octanos	130
Kg de O ₂ /kg de CH ₄ en comb.	3,98
Temperatura de ignición	65 °C
Relación CO ₂ /CH ₄ en peso para comb.	2,74

Fuente: elaboración propia.

motores de combustión especialmente para aquellos que trabajan con gas y gasolina, aunque es factible, por la alta compresibilidad, poder utilizarse en motores de combustión tipo Diesel.

Desde el punto de vista físico-mecánico, se hace imperativa la necesidad de eliminar la mayor cantidad de vapor de agua y gas sulfídrico que contiene como impurezas.

Además, se debe tener en cuenta que la presencia de bióxido de carbono en el gas de combustión incrementa las pérdidas en los sistemas de escape del motor, por ser un gas que no contribuye en la combustión.

Cuando se utilizan mezclas de metano y bióxido de carbono comprimidas en motores de traslación, la licuefacción del CO₂ a altas presiones produce deterioro rápido de los compresores que alimentan de gas a los vehículos.

Cuando se necesita disponer de biogás para utilizarse en motores de combustión estacionarios, es recomendable almacenar el gas en recipientes similares a los utilizados para el envase de oxígeno o de gas comercial.

El acondicionamiento de motores a gas radica en los cambios en el sistema de alimentación y dosificación (carburación) del combustible a las cámaras de compresión del motor. El sistema de alimentación de gas para estos motores se realiza a través de válvulas, que, en general, funcionan dentro de los siguientes parámetros (ver esquema de válvula en la figura No 1).

Oscilación de temperatura.....-10 a 50°C

Presión máxima a la entrada..... 8 bar

Presión de salida a las cámaras del motor.....2 bar

La experiencia realizada en Medellín en motores para vehículos de transporte muestra la necesidad de disponer de dos válvulas para la alimentación de combustible: una para reducir la alta presión de almacenamiento del gas (134 bar) al nivel que se usa en las cámaras de combustión del motor (2 a 3 bar), y otra para bajar la presión en la tubería de conducción por debajo de la presión atmosférica, cuando el motor no está funcionando.

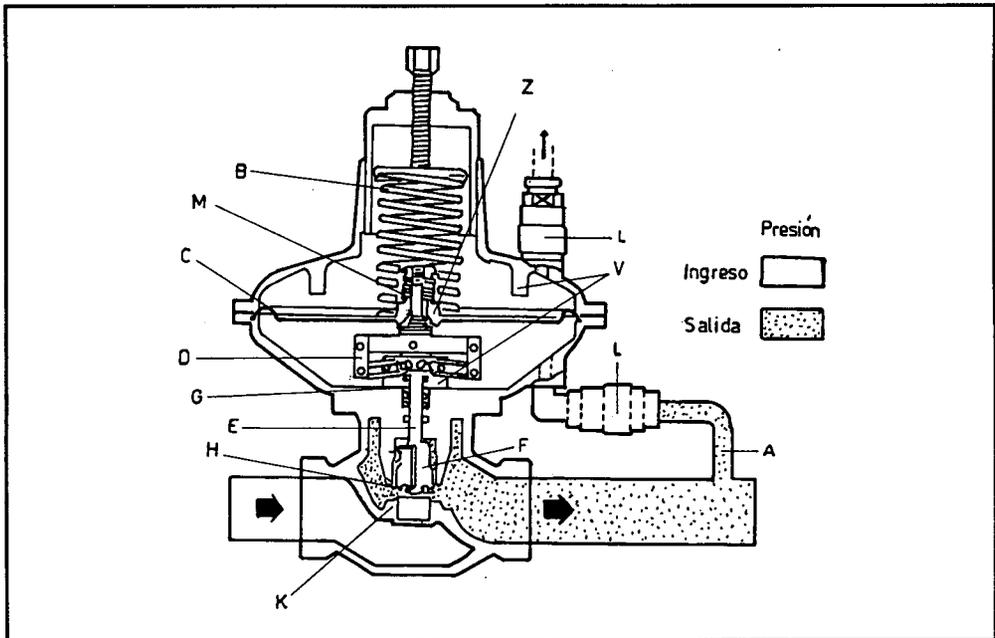


FIGURA 1. Corte de una válvula de diafragma reguladora de presión.

Experiencias importantes son las citadas por Hernández-1989, en el aprovechamiento de biogás producido en un reactor anaeróbico tipo chino procesando los residuos del matadero del municipio de Yopal (Casanare); esta experiencia mostró el funcionamiento de un motor de combustión de 20 Kw alimentado con biogás y accionando una planta eléctrica de 18 Kw. La operación de ésta máquina se mantuvo por períodos de 1 hora con variaciones de presión en el gas dentro del reactor anaeróbico entre 450 a 1550 mm C.A., consumiendo en promedio 4,7 m³ de biogás a un ritmo de 78,3 LPM y un consumo específico de 261 Litros por Kwh.

Al asignarle al biogás un poder calorífico medio de 700 B.T.U. por pie cúbico (6186 Kcal/m³) y, si se tiene en cuenta que para la generación de un Kwh, son necesarias 860 Kcal, el sistema mecánico funcionó con una eficiencia del 53%.

En la actualidad, éste no está operando, debido a que la demanda de carne superó la capacidad del sacrificio del matadero y, por ende, la capacidad de diseño del reactor anaeróbico, el cual operó eficientemente para 16 vacunos sacrificados (actualmente, la demanda de carne para el municipio es de aprox. 30 reses).

Ensayos hechos por Cárdenas, (1994) aprovechando el biogás producido en la planta U.A.S.B (Proyecto del río Frío) para el tratamiento anaeróbico de las aguas residuales de Bucaramanga, operando un motor de combustión interna tipo Otto de 18 Hp a 3600 r.p.m., encontró una eficiencia térmica del 40,3%, utilizando un biogás con las siguientes características:

- CH₄ : 76,05% en volumen
- H₂S : 0,10% en volumen
- CO₂ : 9,01% en volumen
- H₂O : 5,80% en vol. como vapor
- N₂ : 8,01% en volumen

Luego de un proceso de purificación, se obtuvo un biogás con las siguientes concentraciones (en volumen):

- CH₄ : 87,87%
- H₂S : 0,05%
- CO₂ : 3,50%
- H₂O : 0,85%
- N₂ : 7,01%,

encontrándose un incremento de la eficiencia térmica del orden del 20%.

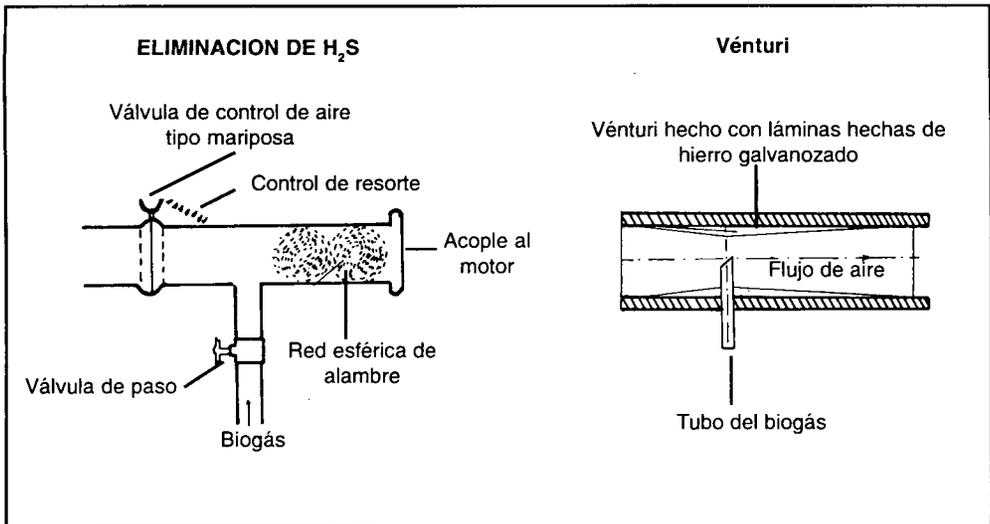


FIGURA 2. Sistema de alimentación de biogás - Motores Otto y Diesel.

A pesar de encontrar altas concentraciones de metano en el biogás producido, pre-ocupa la presencia de nitrógeno gaseoso, el cual no debe aparecer cuando el proceso es anaeróbico; esta situación se puede originar por la contaminación de la muestra antes de ser analizadas en el cromatógrafo.

Cabe mencionar que el motor no presentó señales de corrosión, ni presencia de azufre en el lubricante.

En Italia, motores de ciclo Otto operando con biogás han demostrado un consumo específico entre 600 a 800 litros de biogás por cada Kwh generado. La anterior oscilación de variación es debida a los cambios permanentes que se encuentran en el suministro de gas.

Experiencias con motores tipo Diesel en China, India y Nepal señalan la necesidad de utilizar mezclas de un 20% de ACPM con un 80% de biogás para producir una eficiente combustión. Para este fin, se han utilizado adaptaciones y cambios en el sistema de alimentación y dosificación como las observadas en la figura 2.

La razón para que el solo biogás no opere en forma eficiente en motores Diesel radica en la alta relación de compresión de éstos (aproximadamente el doble a la de los motores de ciclo Otto).

UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS EN LÁMPARAS DE ILUMINACIÓN

Un gas en combustión, al pasar a través de un filamento le produce incandescencia y es éste el principio para la utilización del biogás en lámparas específicas, siendo su forma de empleo menos complicada que para el caso de motores de combustión.

En cuanto a la remoción de vapor de agua y gas sulfídrico, los requerimientos de calidad del gas son iguales y más exigentes a los planteados en el caso de motores.

Para la operación de una lámpara de gas, es necesario una mezcla controlada de aire y biogás, con el fin de ajustar la iluminación a las necesidades y exigencias, ya sean de carácter doméstico o industrial.

El consumo de una lámpara de biogás está en función de la presión de suministro (600 a 1.500 mm C.A.) y de la potencia de iluminación. Es lógico, suponer que, al aumentar la presión de suministro y mejorar la calidad del biogás, se tiene un incremento en la intensidad de iluminación.

Una lámpara de gas, como algunas de gasolina, para producir iluminación utiliza una caperuza, preferiblemente impregnada de algún material radiactivo el cual incrementa la intensidad lumínica por incandescencia. Como el material de fabricación de la caperuza es bastante frágil, se hace necesaria la protección de ésta de las corrientes de aire, insectos y manipuleo por medio de un globo de vidrio esférico, sobre el cual se coloca un reflector para su protección y cubrimiento, además de fijar un radio de iluminación.

Una lámpara de gasolina o de gas de tipo comercial se puede adaptar a biogás haciendo una ampliación o sustitución de la tobera de descarga del gas a aproximadamente 1.5mm de diámetro.

La intensidad luminosa de una lámpara de biogás puede estar entre 100 a 200 candelas (bujías), dependiendo de la calidad y presión de biogás utilizado. El consumo de gas en función de la intensidad luminosa y el número de bujías se presenta de la siguiente forma:

Lámparas con potencia de 100 candelas y 1 caperuza : 0,1 a 0,15 m³/hora.

Lámparas con potencia de 100 candelas y dos caperuzas: 0,12 a 0,16 m³/hora.

Lámparas con potencia de 100 candelas y tres caperuzas: 0,15 a 0,20 m³/hora.

Un diseño de Lara (1987), citado por G.T.Z. para el estudio de la difusión de la tecnología del biogás en Colombia, se muestra en la figura 3.

El funcionamiento de esta lámpara es de la siguiente forma: la válvula (1) regula el flujo de gas y enroscada a ésta se encuentra la tobera (4), provista de un inyector (5), por donde fluye el biogás arrastrado para que entre a las ranuras de admisión (6) y cuyo flujo

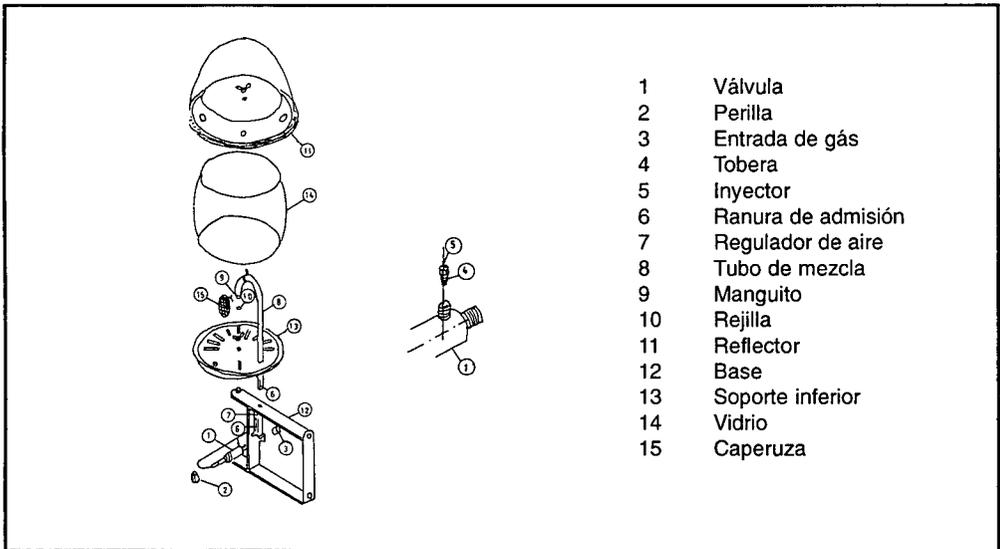


FIGURA 3. Lámpara de biogás -Modelo G. T. Z.

es controlado por medio de un regulador (7). La mezcla de aire se hace en el tubo (8) hasta llegar al manguito (9), donde se encuentra la caperuza (15) en la cual se produce la combustión.

La experiencia del matadero de Yopal (Hernández, 1989) muestra la operación de 12 lámparas de 200 candelas cada una trabajando ocho horas diarias (durante la jornada nocturna de sacrificio), a una presión de suministro de gas entre 600 a 1.200 mm C.A. (ver figura No.4). Esta lámpara de gas consta de una válvula en T (1) que regula la entrada de gas; inmediatamente debajo de ésta y haciendo parte de un sistema integral, se encuentra un anillo enroscado (2), que regula la entrada de aire mediante 5 orificios circulares sobre el perímetro del tubo de conducción. Aquí, se realiza y reacciona la mezcla sobre el soporte de caperuza (3) de cerámica con perforaciones circulares de 1 mm de diámetro para la salida de la mezcla de aire y biogás.

Encima del soporte de la caperuza se ubica el soporte del globo de vidrio (4), el cual dispone de un tornillo para fijar éste al soporte. El biogás llega a la lámpara a través de un tubo de alimentación fabricado en aluminio de 1/4" de diámetro y 40 cm de longitud.

La presión de entrada de biogás se mide por medio de un manómetro en «U», fabricado con manguera transparente de 1/4" de diámetro, donde se marca la presión en mm CA en agua teñida con naranja de metilo sobre una lámina vertical calibrada en mm.

Un esquema para la instalación de lámparas de biogás se puede presentar en el siguiente diagrama.

- 1: reactor anaeróbico
- 2: manómetro en «U»
- 3: Expansión para la reducción de humedad
- 4: Reducción del contenido de H_2S con Fe_2O_3 o ZnO
- 5: Válvula de paso
- 6: Lámpara de iluminación.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para la operación y mantenimiento de lámparas de biogás:

a.) Abrir lentamente la válvula que controla el paso de biogás.

b.) Iniciar la combustión utilizando una vela o cerilla sin tocar la caperuza. Una caperuza nueva debe ser previamente quemada a fin de que adquiera una configuración rígida y aproximadamente cilíndrica.

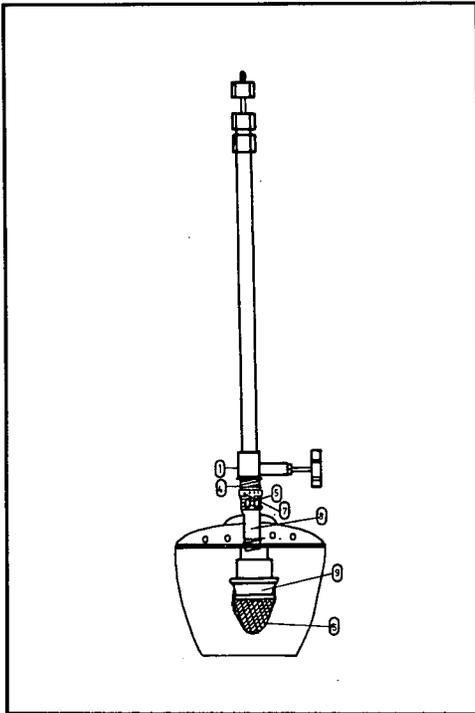


FIGURA 4. Sistema de Alumbrado adaptado para Yopal - Lámpara de gas.

c.) Después de calentar la caperuza, regular las válvulas de paso de aire y biogás, hasta obtener la iluminación deseada.

d.) Hacer la limpieza de la tobera de gas semanalmente, a fin de eliminar la formación de material carbonoso.

e.) Hacer mantenimiento general de la lámpara una vez al mes.

f.) Utilizar una bolsita de plástico para introducir la caperuza dañada en el momento de la reposición y evitar su contacto o inhalar sus cenizas.

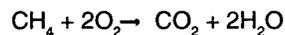
APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN QUEMADORES Y CALDERAS

1. Bases termoquímicas

Antes de hacer referencia a los aspectos tecnológicos del aprovechamiento energético del biogás en quemadores y calderas,

es necesario conocer la dinámica de la combustión del metano como principal constituyente del biogás.

Teniendo en cuenta que la unión química de los átomos de la molécula del CH_4 se hace en forma covalente, las energías de unión para éstas formas de enlace tienen el carácter exotérmico con valores negativos, en razón a que se libera energía cuando se forma un enlace químico de la combinación de dos radicales y éste actúa como una fuerza estabilizadora por naturaleza. Por lo tanto, la energía de unión puede usarse para el cálculo de los calores de formación de las sustancias químicas y, a su vez, de los calores de reacción, gracias al principio de aditividad de las energías de unión. Luego, la energía total de unión de un gas, como el metano, será la suma de todas las energías de unión de los enlaces que lo forman:



Los enlaces rotos serán:

$$4 \text{ C-H con } \Delta H = 4(87,3)\text{Kcal} = 349,2 \text{ Kcal}$$

$$2 \text{ O=O con } \Delta H = 2(139,6)\text{Kcal} = 279,2 \text{ Kcal}$$

La energía total absorbida es de 488,8 Kcal y a partir de los enlaces formados :

$$2 \text{ C=O : } \Delta H = 2(-149)\text{Kcal} = -298,0 \text{ kcal}$$

$$4 \text{ H-O : } \Delta H = 4(-110,2)\text{Kcal} = -440,8 \text{ Kcal}$$

La energía (H) total liberada será de -440,8Kcal; luego, la energía neta total (H_n) producida, al quemar una mol de metano, será de 250 Kcal.

El anterior valor de H_n para el CH_4 concuerda con el calor de reacción y de formación (H_f), basado en el principio de conservación de la energía.

A partir de las leyes de Lavoisier y Hess, se obtiene un valor de 212 Kcal/mol al reaccionar una mol de metano con dos moles de oxígeno (la diferencia radica en la aproximación que se hace al tomar la energía de un tipo de enlace como el promedio de la misma en distintos compuestos).

En la eficiente combustión del metano, deben controlarse tres aspectos para un alto aprovechamiento energético, como son la temperatura, la presión y la composición del gas, la cual se relaciona con la cantidad de aire necesaria para una perfecta combustión.

También, se debe considerar que la reacción podría generar estados de hidroxilación que, generalmente, conducen problemas de contaminación del aire; cuando se quema metano, inicialmente se presenta una adición o asociación de oxígeno con la molécula de metano, produciendo compuestos hidroxilados inestables, que, a su vez, forman aldehídos, disociándose y oxidándose para producir finalmente bióxido de carbono y agua, como se observa en los siguientes pasos:

- I. $\text{CH}_4 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
- II. $\text{CH}_3\text{OH} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{HCOH} + \text{H}_2\text{O}$
- III. $\text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$
- IV. $\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 \text{ y } \text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

En el interior, la llama de combustión de un gas se forma un cono azul con espesor de aproximadamente 0,2mm, seguido de una segunda zona en forma de penacho, que contiene los gases producidos de la reacción de la zona interior. Si se efectúa una medición de temperatura en la cima de la región azul de la llama, tal registro estaría cercano a aquel estimado a partir de los calores específicos de los productos de combustión y de los valores de las disociaciones.

Para el biogás y específicamente para el metano, existen factores que alterarían la temperatura de combustión, como las continuas variaciones de la relación aire/combustible, la baja temperatura de la mezcla y el contenido de materiales inertes que, como el bióxido de carbono y el N_2 del aire, pueden reducirla entre un 30 % a 40%, respectivamente.

Por lo tanto, la coloración de la llama se puede constituir en un indicador de la calidad de la reacción del gas en función de la proporción de combustible utilizado. Cuando la concentración de metano presente en la mezcla de biogás es inferior a un 30% en vo-

lumen, la zona interior de la llama tenderá a una coloración amarillenta, mientras que, si la concentración sube a más del 55%, ésta adquiere una tonalidad azul. Esta situación es necesario conocerla en la calibración y operación de sistemas de quemadores y calderas que utilizan total o parcialmente el biogás.

2. Tecnología de los quemadores de biogás

Un quemador se define como un dispositivo encargado de poner en contacto el gas combustible (biogás) con el comburente. Bajo esta situación, el gas actúa como inductor, arrastrando parte del aire necesario para la combustión (aire primario), mientras que se utiliza otro aire en el punto o encima del punto de combustión (aire secundario); por lo tanto, desde el punto de vista del uso de quemadores domésticos e industriales que puedan operar con biogás, éstos deben estar expuestos a las condiciones atmosféricas.

Un buen diseño de los sistemas de suministro y conducción de gases promueve una llama estable, bien estructurada por zonas y

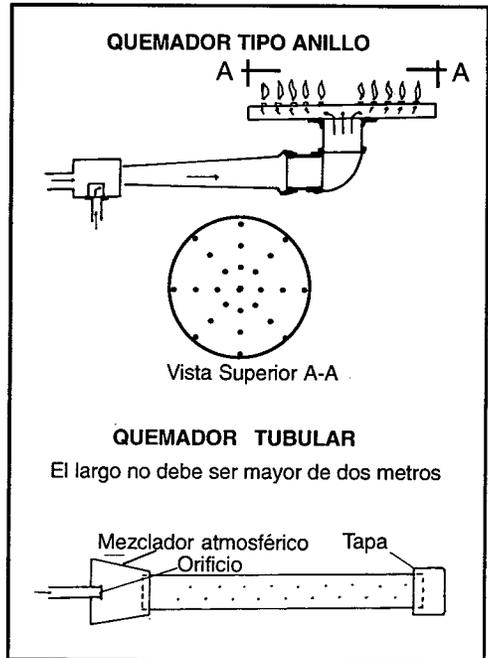


FIGURA 5. Tipos de quemadores utilizando biogás

con una mínima producción de gases contaminantes (hidrocarburos y monóxido de carbono).

Las dimensiones de un quemador doméstico e industrial de gas depende de factores como:

- Características y propiedades del biogás
- Consumo del quemador
- Presión de entrada del gas
- Consumo de aire primario y secundario; y
- Propiedades del aire.

Existen varios tipos de quemadores, pero los que han presentado más adaptabilidad al aprovechamiento energético del biogás son los quemadores domésticos de cabeza cilíndrica que se emplean tradicionalmente con gases comerciales de propano-butano y los quemadores industriales de los tipos de anillos concéntricos y tubulares (tipo flauta), con orificios perimetrales de salidas múltiples, como se pueden observar en la figuras 5 y 5A.

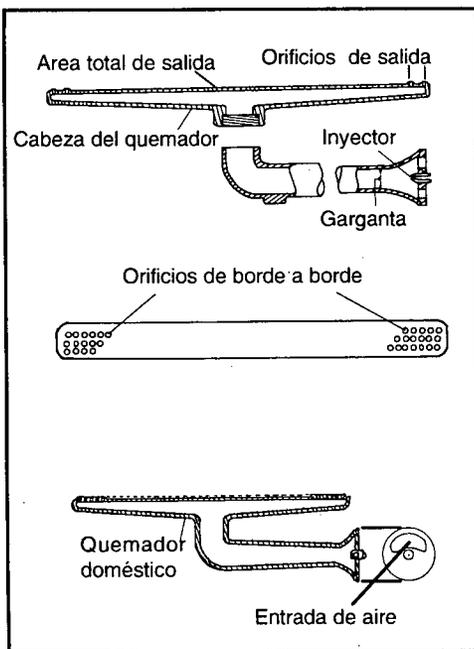


FIGURA 5A. Corte de un quemador cilíndrico para biogás

3. Características de los quemadores empleados con biogás

Los quemadores domésticos para biogás trabajan con presiones entre 50 a 150 mm de C.A. en estufas de 1 a 4 puestos con quemadores circulares de 2 a 10 pulgadas de diámetro. El consumo de biogás (con 55% en volumen de metano) varía según el tamaño de la tobera de descarga del quemador en la siguiente forma:

Diámetro de la tobera(mm.)	Consumo(lit./hora)
2	330
4	470
6	640

Los quemadores comerciales domésticos se pueden adaptar a biogás ampliando el diámetro de las toberas de descarga de gas y la del flujo de aire primario, en función de la mayor densidad del biogás, sobre todo cuando éste viene cargado de impurezas como producto de una deficiente limpieza. Aunque, para el propósito específico, es válido el diseño de inyectores y válvulas para garantizar una mezcla y combustión adecuadas, las variaciones de presión, la presencia de materiales inertes durante la generación y aprovechamiento del biogás, no justifican dimensiones perfectas.

Los quemadores industriales de más de 2 Kw, tipo anillos concéntricos y con o sin doble aro, demandan mayores presiones de suministro de biogás, (500 a 2.000 mm CA) y, como en los domésticos, es necesario ampliar hasta 2mm la boquilla de descarga de biogás, en comparación con quemadores del mismo tipo que operen con gas comercial.

Otros quemadores industriales de un metro de longitud y 1 pulgada de diámetro, tipo tubular, como los instalados en los proyectos de Yopal y Tunja, funcionan con presiones de gas dentro del reactor desde 60mm CA, calentando a una temperatura de 75°C aproximadamente 1.200 litros de agua para el escaldado (pelado) de porcinos. Estos que-

CUADRO 2. Diagnóstico de problemas comunes que se pueden presentar en un quemador de biogás

Problema	Causas posibles	Posibles soluciones
Llama larga y amarillenta	Deficit de aire primario. Exceso de combustible	Aumentar entrada de aire. Reducir paso del biogás
Llama despega del quemador	Alta presión y velocidad del gas	Reducir entrada aire primario
Llama debil y se extingue	Baja velocidad del gas en la tobera	Aumentar diámetro del inyector
Llama muy pequeña	Deficit de combustible	Limpiar orificio de inyección obstruido. Incrementar Ø de orificio de descarga
Manchas amarillas en Llama	Deficit de aire primario	Ampliar entrada de aire primario

Fuente: Adaptado de Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (G.T.Z.), 1976.

madores se colocan por debajo y a lo ancho del tanque de escaldado con dimensiones asociadas al área de transferencia de calor.

El Cuadro 2, resume los problemas más comunes que se pueden presentar en un quemador doméstico o industrial alimentado con biogás.

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS EN CALDERAS

Una caldera consiste en un sistema termomecánico para calentar agua o generar calor en forma de vapor, pudiéndose utilizar en procesos de generación eléctrica, control sanitario, cocción de alimentos, procesos bioquímicos y concentración de productos (fabricación de panela y azúcar).

Básicamente, una caldera para gas consiste en un sistema de combustión que dispone de un quemador de tiro forzado. El calor generado al quemarse el gas es parcialmente transferido a una superficie integral o tubular la cual contiene o conduce agua, que genera una cantidad de vapor, con una energía de entalpía (H), en función de la temperatura y presión a la cual se produce el vapor.

El quemador de una caldera de gas tiene un juego de electrodos de ignición, un ventilador y una válvula para el control de la combustión. Otros dispositivos de control de este tipo de sistemas se orientan a mantener unas condiciones de carga y presión, tanto del agua, como del vapor generado.

Las calderas que se acondicionan para aprovechar el biogás son del tipo vertical, con volúmenes en la cámara de combustión que varían entre 4 a 20 pies cúbicos y con potencias que oscilan comercialmente entre 5 a 50 BHP.

Aunque, técnicamente, el biogás se puede utilizar como combustible en una caldera corriente de gas, éste debe ser exigentemente purificado, en cuanto al contenido de gas sulfídrico y vapor de agua, además de eliminar la mayor cantidad de CO₂.

La selección del tamaño de la caldera está en función de la disponibilidad y características del biogás producido, de la calidad y disponibilidad de agua y de las necesidades térmicas de agua caliente o vapor para cualquiera de sus usos.

Si bien es cierto que no existen experiencias en Colombia y no se dispone de información internacional sobre aplicaciones

del uso de calderas que aprovechen parcial o totalmente el biogás como combustible, es necesario el uso de un compresor para mantener unas condiciones reguladas de suministro del gas hacia la cámara de combustión. Además de existir la posibilidad de utilizarse el biogás como complemento energético en calderas de petróleo crudo (crudo de castilla, combustóleo) o ACPM, se debe establecer la compatibilidad térmica de los combustibles y reforzar los sistemas de control de la contaminación del aire.

Por las características y propiedades térmicas del biogás altamente purificado comparadas con otros gases hidrocarburos, como el propano y gas natural, no existen incompatibilidades para su conversión total o parcial.

Sin embargo, cuando se trate de complementar energéticamente con gas a una caldera de petróleo, ACPM o carbón, es recomendable instalar una alimentación independiente para el biogás.

En Colombia, existe una variedad de marcas y capacidades de calderas con posibilidades de utilizarse con biogás, cuyos precios comerciales oscilan entre 3.000 a 10.000 dólares, entre las cuales se pueden citar las siguientes con sus características:

Caldera vertical (Distral), pirotubular

Potencia : 10 BHp

Presión de diseño : 150 PSI

Superficie de calefacción: 70 pies cuadrados

Volumen de la cámara de combustión: 5,9 pies cúbicos

Generación de calor : 334.750 BTU/Hora (8.450 Kcal/Hora)

Combustible: gas, con más de 2.500 BTU/pie³ (22.000 Kcal/m³)

Consumo de gas : 167 pies³/Hora (4,8m³/Hora)

Producción de vapor : 345 Lbs/Hora a stcpt.

Si se tiene en cuenta que el poder calorífico del biogás alcanza unas 6.000 Kcal/m³, sólo, podría utilizarse como complemento energético a cualquier hidrocarburo gaseoso, sin que se afecte la generación de entalpía en las condiciones de diseño de la caldera; de lo contrario, habría que hacer cambios en el volumen del hogar de combustión e incrementar el flujo de biogás.

Otro tipo de caldera, para la cual el biogás puede utilizarse como complemento energético, es la fabricada o comercializada por la firma Tecnick Ltda, la cual presenta las siguientes características:

Tipo : pirotubular

Combustible : gas, con poder calorífico de 19.000 BTU/Lb. (2.300 BTU/pies³)

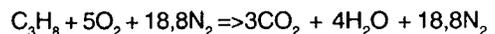
Presión de trabajo : 150 PSI

Consumo de gas: 9 Lb./Hora (4 Kg/Hora) (85 pies³/Hora)

Producción de vapor: 173 Lb/Hora.

Al igual que la caldera de Distral, existen inconvenientes en el poder calorífico del gas requerido, además que un incremento en el flujo de biogás traería consecuencias negativas para la eficiencia global del sistema, por la presencia de gases inertes como el dióxido de carbono.

Sin embargo, si se supone que al biogás se le ha realizado una exigente limpieza, incluyendo la eliminación de alto porcentaje de CO₂, su comportamiento se puede asociar al gas natural y las pérdidas de calor sensible en el escape serían ligeramente mayores, comparadas con las del propano, desde el punto de vista de la relación estequiométrica aire/combustible, según la siguiente reacción:



Así, se obtiene una relación estequiométrica a partir de los pesos atómicos de 15,6Kg de aire por Kg de combustible, la cual es unidad y media menor que la señalada anteriormente para el metano. Desde este punto de vista, habría un incremento del orden del 8,7% del aire para la combustión del metano casi puro. Bajo esta comparación, se

tendría una reducción en la eficiencia de la caldera de biogás por el incremento de pérdidas en el sistema de escape, además de la baja calidad termodinámica del vapor generado.

Una ventaja relativa del uso del metano altamente purificado es la de requerir, para su combustión completa, excesos de aire muy inferiores a los de combustibles sólidos como carbón y residuos agrícolas o madera en proporciones que van hasta el 230%.

Desde el punto de vista del estado natural en el cual se encuentra el metano (biogás altamente purificado), con respecto a combustibles líquidos, es necesario señalar que los segundos deben «robar» calor del medio para vaporizarse, el cual, unido al emitido a través de las chimeneas, como consecuencia al calentamiento del mayor volumen de nitrógeno atmosférico derivado de los excesos de aire respecto a las demandas teóricas exigidas, disminuye, en forma significativa, la eficiencia del proceso.

Otra ventaja la constituye su bajo impacto ambiental en la combustión, debido a la no emisión de contaminantes en forma de hidrocarburos parcialmente oxidados (óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre), en comparación con combustibles líquidos y sólidos. Además, su combustión produce menores volúmenes de bióxido de carbono por unidad energética producida, (50% y 30% menos que el carbón y combustibles líquidos, respectivamente), por tener una relación menor de átomos de hidrógeno con respecto a los átomos de carbono.

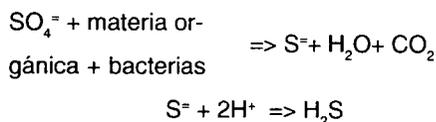
SISTEMAS DE LIMPIEZA PARA LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS

La descomposición anaeróbica de residuos complejos genera un producto gaseoso compuesto por metano, bióxido de carbono, gas sulfídrico y vapor de agua. El metano producido proviene de la reducción del ácido acético (CH₃COOH) en un 75% y del CO₂ en un 25%. Gases, como el H₂S y el CO₂ provienen de las fases de hidrólisis y acidificación en la estabilización de carbohidratos y proteínas.

En el proceso de estabilización de la materia orgánica, se puede volatilizar ésta entre un 15% a 25%, dependiendo de factores ambientales, de la velocidad de carga y de las características del tipo de sustrato para metabolizar en los tanques de reacción.

El H₂S y el CO₂ no contribuyen en el beneficio del aprovechamiento energético del metano y es el bióxido de carbono, por su alta concentración en el gas producido son un factor en la reducción del poder calorífico del metano.

En la degradación anaeróbica, los sulfatos son reducidos, por bacterias, a sulfuros y a gas sulfídrico, según la siguiente ecuación:



El gas sulfídrico puede oxidarse biológicamente hasta H₂SO₄, el cual es altamente corrosivo para ductos y partes metálicas.

El gas sulfídrico formado, por la estabilización de la proteína y por la reducción de sulfitos y sulfatos minerales, es un gas incoloro, inflamable con olor característico a huevos podridos, lo cual, ambientalmente, dificulta su disposición a la atmósfera.

Teniendo en cuenta la necesidad de remover completamente el SH₂ y la mayor proporción de bióxido de carbono y el vapor de agua presentes en la mezcla de gases producidos de la digestión anaeróbica, se han difundido métodos físicos y químicos que pueden aplicarse a cualquier nivel tecnológico, desde los sistemas domésticos a los industriales. A continuación, se describen algunos métodos para la remoción de los tres contaminantes del metano.

1. Burbujeo en agua

Es el método más simple para la remoción de las impurezas del metano a través de un lavado del mismo. Si se tiene en cuenta que a 20°C y una atmósfera de presión, los

requerimientos de agua para lavado son altos; se han diseñado columnas empacadas bajo presión, cuyo propósito es incrementar la adsorción del CO₂. El método tiene los inconvenientes del uso de grandes cantidades de agua para lograr la solubilidad del CO₂ y de la calidad corrosiva de ésta al generarse estados ácidos durante la remoción del bióxido de carbono.

La solubilidad del CO₂ aumenta en la medida que lo hace la presión de la corriente de biogás y se reduce al incrementar la temperatura, según el cuadro 3.

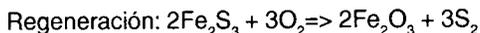
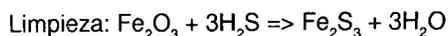
Cuando se utilizan presiones mayores a la atmosférica, es necesario el uso de compresores, los cuales se deterioran fácilmente, debido a la corrosión causada por el estado ácido del agua.

En la práctica, a pesar de ser un método simple, resulta inoperante, si se tiene en cuenta que las presiones alcanzadas en los tanques de reacción no superan los 2.000 mm. de C.A.(2 kg.cm²), con una temperatura de los gases del orden de 25°C.

2. Adsorción química

Se utiliza en la eliminación de gas sulfídrico, mediante el uso de una esponja de hierro colocada antes de ser usado el gas. El H₂S reacciona con el óxido férrico formando sulfuro férrico y agua. La regeneración del óxido férrico se realizará por recirculación de aire.

El proceso citado se puede presentar en la siguiente ecuación:



El Fe₂O₃ debe colocarse en una expansión de aproximadamente cinco veces el diámetro de la tubería de conducción del gas, preferiblemente antes de los dispositivos de aprovechamiento energético. La concentración del gas sulfídrico, antes o después de los procesos de su eliminación, se puede evaluar por cromatografía de gases o por absorción del gas a través de una columna de acetato de zinc.

La remoción química del gas de azufre a través de óxido férrico es económica y sus resultados son aceptables internacionalmente.

3. Acción biológica

En nueva Zelanda, se han realizado importantes experiencias para el tratamiento biológico en la reducción de la concentración de H₂S de las descargas gaseosas de plantas de digestión anaeróbica. Unas primeras experiencias mostraron que, cuando el gas de azufre se encuentra en concentraciones superiores a los 1.000 mg.L⁻¹ y es quemado junto con el metano en calderas, produjo corrosión en los sistemas de conducción, generando grandes cantidades de SO₂, gas altamente contaminante causante de la lluvia ácida.

CUADRO 3. Variación de la solubilidad del CO₂ en función de la temperatura y presión del biogás.

Presión de biogás kcm ²	Solubilidad Kg de CO ₂ por 100 Kg de agua				
	Temperatura °C				
	0	10	20	30	40
1,03	0,40	0,25	0,15	0,10	0,10
10,30	3,15	2,15	1,30	0,90	0,75
51,70	7,70	6,95	6,00	4,80	3,90
103,00	8,80	7,20	6,60	6,00	5,40
207,00	-----	7,95	7,20	6,55	6,05

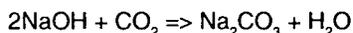
Fuente: National Academy of Sciences, 1973

Otras experiencias para el tratamiento de gas sulfídrico originado en la digestión de residuos de carnes muestran la reducción en la concentración del H_2S en oscilaciones entre el 25 al 62% mediante incineración a temperaturas medias de $750^{\circ}C$ y tiempos de residencia de 0,5 segundos, pero el procedimiento resultó costoso e ineficiente. Tal vez, el método integral más avanzado para la remoción del gas sulfídrico, proveniente de plantas de tratamiento de residuos complejos, sea el citado por Rands, (1981), en el cual, utilizando una pila de compost de un metro de alto formada por residuos de matadero (rumen, sangre y sebos), sobre un piso de escoria y haciendo fluir el gas en sentido ascendente por una tubería perforada, se lograron remociones del orden del 100%. Esto se demostró por el incremento de temperatura, causado por la actividad biológica dentro de la pila de compost.

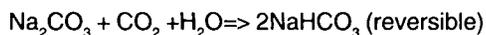
De esta forma, además de lograr una alta remoción de gas sulfídrico, se obtuvo un compost de magníficas propiedades fertilizantes, con una reducción de la relación C/N de 45/1, cuando está crudo, a 30/1 cuando se ha tratado con gas en un tiempo de retención de 20 días.

4. Burbujeo alcalino

Esta técnica, utilizada para la remoción del CO_2 , emplea sustancias alcalinas, como los hidróxidos de sodio, de calcio o de potasio. Al pasar una corriente de gases que contienen bióxido de carbono (biogás o gases industriales) a través de soluciones de las sales señaladas, se produce una reacción química, que, para el caso de la soda, es la siguiente forma:



Manteniendo a presión la corriente de CO_2 sobre el carbonato de sodio, se formará un precipitado de bicarbonato de sodio, de acuerdo a la siguiente ecuación:



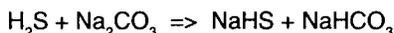
Para mejorar la eficiencia de la reacción, la solución alcalina se debe mantener en agitación, promoviendo la difusión y contacto del gas en el líquido. Un segundo factor que afecta

la velocidad de la reacción es la concentración de la solución, por ejemplo, con normalidades entre 2,5 a 3,0 de NaOH, se logra una rápida reacción.

Aunque, en la industria, para la eliminación del CO_2 se utiliza más el KOH, el hidróxido de calcio brinda mejores posibilidades desde el punto de vista económico y de mayor velocidad de reacción, pero se presenta alguna dificultad en la remoción del carbonato de calcio en los tanques de burbujeo, sobre todo cuando se trabaja con altas tasas de remoción de CO_2 .

El carbonato formado puede integrarse al sistema de tratamiento como coagulante en las unidades primarias de sedimentación y/o como estabilizador del pH, cuando se presentan condiciones ácidas en la mezcla líquida dentro de los reactores.

Si el tiempo de contacto del biogás es suficiente, también, puede ser removido el H_2S , formándose un precipitado de sulfuro de sodio, según la siguiente reacción:



El H_2S y el CO_2 , pueden ser removidos utilizando otras sustancias alcalinas, como soluciones amoniacales, fosfato trisódico y fenolato de sodio, pero su uso es limitado a causa de los elevados costos con respecto a las sustancias alcalinas de Na, Ca y K.

5. Remoción del vapor de agua

El vapor de agua es un contaminante que reduce el poder calorífico del metano y que, junto con el H_2S , puede generar estados ácidos en tuberías y sistemas por donde circula o se aprovecha el gas. El vapor de agua se produce en reactores que funcionan a más de $20^{\circ}C$.

Para eliminar el agua y evitar que ésta cause los problemas señalados, es recomendable instalar expansiones en la tubería de conducción a un diámetro de 3 a 5 pulgadas por 5" de longitud, colocadas en posición vertical; en el fondo de esta expansión se debe colocar un registro, el cual debe ser abierto por lo menos cada dos días.

A nivel industrial, el agua de una corriente de biogás se puede eliminar a través de un intercambiador de calor fabricado en cobre y lleno de nitrógeno líquido a una temperatura de -230°C .

A esta temperatura, el agua se condensa rápidamente y el gas se conduce a los sistemas complementarios de purificación. Debe tenerse en cuenta que la remoción de humedad es recomendable como el primer paso en la depuración del metano.

LITERATURA CITADA

CARDENAS, H. Utilización de biogás como combustible en motores de combustión interna. Revista Criterio, No. 21. Universidad Autónoma de Colombia. Santafé de Bogotá. 1994.

G.T.Z. Difusión de la tecnología del biogás en Colombia. Documento del proyecto, Cali. 1987.

HERNANDEZ, A. & BALCAZAR, R. Estudio de factibilidad para el aprovechamiento de los residuos de la planta de carnes del ICTA vía digestión anaeróbica. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá. 1984.

HERNANDEZ, A. Puesta en marcha, diseño, instalación y operación de sistemas de aprovechamiento energético del reactor anaeróbico instalado en Yopal (C). Informe de consultoría, Icel, Santafé de Bogotá. 1991.

HERNANDEZ, A. Diseño, construcción y readecuación de un sistema de tratamientos de aguas residuales, con puesta en marcha de varios sistemas de aprovechamiento energético de biogás para el matadero de Tunja, Tunja. 1994.

HERNANDEZ, A. Diseño de un sistema de tratamiento anaeróbico con recuperación de biogás para la planta de carnes del Instituto de Ciencia y Tecnología de alimentos -ICTA- de la Universidad Nacional. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas -INEA-. Santafé de Bogotá. 1995.

N.A.S. Methane generation from human, animal, and agricultural wastes. National Academy of Sciences. Washington D.C. 1977.

RANDS, M.B. et al. Compost filters for H_2S removal from anaerobic digestion and rendering exhausts. Water pollution control Federation. 53(2):, 1981.

VAN DER MEER, R.R. Anaerobic treatment of waste water: the gas-liquid-sludge separator. Journal of Water Pollution Control Federation 54 (1): , 1982.