

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE BIOLOGÍA

INFORME DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA PURIFICACIÓN DEL
METANO PRODUCIDO MEDIANTE BIODIGESTIÓN EN EL ITCR**

María Alejandra Valerio García.

CARTAGO, 2010.



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE BIOLOGIA

INFORME DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA PURIFICACIÓN DEL
METANO PRODUCIDO MEDIANTE BIODIGESTIÓN EN EL ITCR**

**Para optar por el título de
Ingeniería en Biotecnología con el grado académico de Bachiller**

María Alejandra Valerio García.

CARTAGO, 2010.



DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA PURIFICACIÓN DEL METANO PRODUCIDO MEDIANTE BIODIGESTIÓN

María Alejandra Valerio García.

RESUMEN

El biogás como una fuente de energía alternativa está limitado por la necesidad de remover algunos gases que lo componen y reducen la capacidad combustible al CH_4 del biogás. Entre estos gases el H_2S genera problemas de corrosión, impidiendo que el biogás pueda ser comprimido y almacenado; mientras que el CO_2 no es un gas combustible y reduce el valor calorífico del biogás.

Con este trabajo de investigación se pretendía construir y poner a funcionar un sistema para la purificación de biogás en el ITCR, a escala, sencillo y con el cual se pretendía obtener CH_4 de alta pureza. Este sistema consistió de un proceso desulfuración biológica para reducir la concentración de H_2S del biogás, acoplado a una columna para la absorción química del CO_2 utilizando NaOH . Además, se evaluó la eficiencia del sistema por medio de análisis de la composición del biogás (CH_4 y H_2S) antes y después de probar cada proceso de purificación.

Para la desulfuración biológica, se diseñó un tanque que permitiera la aireación de una fase líquida correspondiente a un cultivo de las bacterias aerobias *A.thiooxidans* y *S. novella*, capaces de oxidar el sulfuro, de forma que al pasar el biogás por el tanque éstas logran el consumo de H_2S . Entre los parámetros de diseño, se contempló un tiempo de retención de 1 hora y una aireación que no superó el 5% del volumen de biogás en el tanque. Con el tanque y las bacterias desulfurantes, se logró una eficiencia del 56% en la remoción del H_2S del biogás.

En cuanto a la columna de absorción, ésta se adaptó a un biodigestor experimental del ITCR para remover el CO_2 en el biogás producido. La columna de absorción se construyó a contracorriente y empacada, utilizando una solución de NaOH 2.5M como absorbente. Los problemas en el diseño y funcionamiento de la columna, un flujo del biogás muy pequeño y

sin compresionar, así como un absorbente tan concentrado impidieron que el proceso fuese eficiente, ya que no se evidenció el aumento esperado en el porcentaje de CH₄.

Palabras clave: purificación de biogás, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, columna de absorción, desulfuración biológica.

- Informe de Práctica de Especialidad, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2010.

DESIGN AND EVALUATION OF A SYSTEM FOR THE PURIFICATION OF METHANE PRODUCED THROUGH BIODIGESTION, AT THE ITCR

María Alejandra Valerio García.

ABSTRACT

The use of biogas as an alternative energy source is being limited by the need to remove certain gases which reduce the combustion potential of methane present in biogas. Among these gases, H₂S can lead to corrosion problems which restricts biogas from being compressed and stored. On the other hand, CO₂ is not a combustible gas, therefore it reduces the calorific value of biogas.

The aim of this reasearch project was to build and put into function a small-scale purification system for biogas at the ITCR, which was simple and would generate high quality CH₄. The system established consisted of a biological desulfurisation process to reduce the concentration of H₂S, and a scrubber for the chemical absorption of CO₂ using NaOH. In order to evaluate the purification system's efficiency, the composition of the biogas treated was analyzed before and after the purification processes took place.

For the biological desulfuration of biogas, a tank was designed to hold a liquid phase consisting of a culture of the aerobic bacteria *A.thiooxidans* y *S. novella* capable of sulphur oxidation, so that in presence of air, H₂S would be consumed by the bacteria when biogas passed through the tank. Among the design parameters for the tank, a retention time of 1 hour was established and also the air introduced in the tank did not exceed 5% of the volume of biogas in it. The tank design and the bacteria allowed a 56% removal rate of H₂S from biogas.

Meanwhile the absorption scrubber was adapted to one of the experimental biodigesters at the ITCR, in order to remove CO₂ from the biogas produced. The scrubber constructed was

packed and allowed a counter-current absorption process, using NaOH 2.5M as the absorbent. Certain problems with the design and functioning of the column, the introduction of uncompressed biogas with a small flow rate and a very concentrated absorbent, were possible reasons why this process was not an efficient method for the purification of biogas, since the expected increase in the percentage of CH₄ in the biogas did not occur.

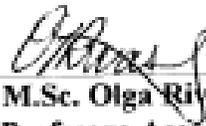
Keywords: biogas purification, hydrogen sulphide, carbon dioxide, absorption column, biological desulphuration.

- Final Graduation Report, Biology School, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. 2010.

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA PURIFICACIÓN DEL
METANO PRODUCIDO MEDIANTE BIODIGESTIÓN EN EL ITCR**

**Informe presentado a la Escuela de Biología
del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial
para optar al título de Bachiller en Ingeniería en Biotecnología.**

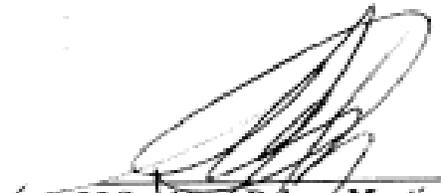
Miembros del Tribunal



**M.Sc. Olga Rivas Solano
Profesora Asesora-ITCR**



**Ing. William Rivera Méndez
Asesor- ITCR**



**M.Sc. Alma Deloya Martínez
Lectora**

DEDICATORIA

A mi familia,
por su gran cariño y apoyo
incondicional en todo momento.
A ustedes, a su esfuerzo, amor,
sacrificios y consejos les debo
este trabajo, mi carrera y lo que soy.

A Alex,
por haber estado ahí
para todo lo que necesitara.

- María.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece profundamente a las siguientes personas, por su valiosa ayuda para poder llevar a cabo el presente trabajo:

A la M.Sc. Olga Rivas Solano, por su paciencia, además de sus ideas y sugerencias, que definitivamente me dieron la motivación para sacar adelante el proyecto a pesar de muchos obstáculos.

Al Ing. William Rivera Méndez y a la M.Sc. Alma Deloya Martínez, por estar al tanto del proyecto y siempre dispuestos a brindar ayuda y aclarar las dudas que surgieron con el manejo de los biodigestores.

Al MSc. Adolfo Ulate y a Don Carlos Abarca, de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, por su atención tan especial hacia mí y por no dudar en ningún momento de facilitarme el material que necesario para poder realizar parte de este trabajo.

A Rossy Guillén y Margie Faith, por haber tenido la suerte de compartir con ustedes durante la práctica. Gracias por ser más que compañeras de trabajo y realmente ofrecerme su amistad.

A Osvaldo Ibarzabal, por la ayuda técnica en la parte eléctrica.

Al Ing. Joaquín Víquez, Ing. Gabriel Smith y a Don Oscar Ramírez, por ayudarme en la obtención de las muestras de biogás.

A Don Carlos Solano y a Don Freddy Angulo, por su colaboración tan desinteresada a lo largo de la práctica y por alivianar, con miles de favores, el trabajo pesado para mantener los biodigestores funcionando.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA	3
1. <i>Biodigestión</i>	3
1.1. Descripción de las etapas de biodigestión	3
1.2. Factores a considerar en el proceso metanogénico.....	5
2. <i>Biodigestores: Concepto, importancia y clasificación</i>	6
3. <i>Características del biogás sin purificar</i>	11
3.1. Composición	11
3.2. Propiedades.....	11
3.3. Limitaciones de su uso.....	12
4. <i>Purificación del biogás y características de sus principales contaminantes</i>	13
4.1. Sulfuro de hidrógeno	13
4.2. Dióxido de carbono.....	14
5. <i>Usos del metano</i>	16
5.1. En calentadores, plantillas de cocina y lámparas de gas	16
5.2. En motores de combustión interna	16
5.3. Combustible para vehículos.....	17
5.4. Generación de electricidad	18
6. <i>Procesos para la purificación del biogás</i>	19
6.1. Métodos físicos para la purificación de metano	19
6.2. Métodos químicos para la purificación de metano	25

6.3. Métodos biológicos para la purificación de metano	28
OBJETIVOS	34
<i>OBJETIVO GENERAL</i>	34
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	34
MATERIALES Y MÉTODOS	35
<i>Localización del trabajo de investigación</i>	35
<i>Composición del biogás sin purificar</i>	37
<i>Implementación del sistema de desulfuración biológica</i>	40
<i>Evaluación de la eficiencia de la desulfuración biológica</i>	43
<i>Diseño de la columna de absorción para el biodigestor</i>	43
<i>Evaluación de la eficiencia de la columna de absorción para la purificación del biogás</i>	45
RESULTADOS	46
<i>Diseño del sistema de purificación del biogás</i>	46
<i>Composición inicial del biogás sin purificar</i>	47
<i>Proceso de biodesulfuración biológica del biogás por aireación</i>	48
<i>Eficiencia del proceso de desulfuración biológica del biogás</i>	51
<i>Columna de absorción química del CO₂ con NaOH</i>	51
<i>Eficiencia de la columna de absorción para la purificación del metano</i>	54
DISCUSIÓN	55
<i>Sistema de purificación del metano</i>	55
<i>Composición inicial del biogás utilizado para evaluar el sistema de purificación</i>	56
<i>Biodesulfuración por aireación con bacterias desulfurantes eficientes</i>	59
<i>Eficiencia del proceso de desulfuración biológica del biogás</i>	62
<i>Columna de absorción con NaOH para la remoción del CO₂ del biogás</i>	67
<i>Eficiencia de la columna de absorción para la purificación del metano</i>	70
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	86

ÍNDICE DE CUADROS

Número	Título	Pág.
Cuadro 1.	Comparación entre las propiedades del biogás y el gas natural	12
Cuadro 2.	Requisito de la remoción de distintos compuestos gaseosos de acuerdo a la aplicación en la que se utilice el biogás	15
Cuadro 3.	Composición inicial de las muestras de biogás, una del biodigestor a escala del ITCR, Cartago y de la finca La Floresta, en Coronado.	47
Cuadro 4.	Características de funcionamiento del tanque de desulfuración biológica	50
Cuadro 5.	Comparación de la composición de la muestra de biogás de la finca La Floresta luego del tratamiento de biodesulfuración	51
Cuadro 6.	Evaluación del efecto de la absorción química con NaOH, como proceso de purificación del CH ₄ , en la composición del biogás.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Título	Pág.
Figura 1.	Etapas del proceso de digestión anaerobia.....	4
Figura 2.	Modelos de biodigestores más comunes.	10
Figura 3.	Esquema de una columna de absorción a contracorriente.....	26
Figura 4.	Tinción de Gram del cultivo de <i>A. thiooxidans</i> (100X y 400X).	30
Figura 5.	Tinción de Gram del cultivo de <i>Starkeya novella</i> (200X y 300X).....	31
Figura 6.	Biodigestores a escala del ITCR.	36
Figura 7.	Biodigestor tipo Taiwán de la finca La Floresta.	36
Figura 8.	Bolsas utilizadas para tomar las muestras de biogás.....	37
Figura 9.	Analizador Triple Plus IR utilizado para determinar el porcentaje de metano del biogás.	38
Figura 10.	Detección de la concentración de H ₂ S por medio del analizador Tempest 100.....	38
Figura 11.	Determinación analítica de la concentración de H ₂ S en el biogás por el método USEPA 11.....	39
Figura 12.	Inoculación de los cultivos de <i>S.novella</i> y <i>A. thiooxidans</i> en el tanque de desulfuración biológica.	41
Figura 13.	Medios de cultivo utilizados para el crecimiento de <i>S. novella</i> y <i>A. thiooxidans</i>	41
Figura 14.	Cultivo de bacterias <i>S. novella</i> y <i>A. thiooxidans</i> en tubos de ensayo.....	42
Figura 15.	Vista de un cuadrante durante el recuento directo de <i>S. novella</i> a los tres días de crecimiento.....	42
Figura 16.	Material de empaque utilizado para el relleno de la columna de absorción	44

Figura 17. Esquema del sistema propuesto para la purificación del biogás de un biodigestor a escala.....	46
Figura 18. Tanque utilizado para la remoción biológica del H ₂ S de una muestra de biogás. .	49
Figura 19. Esquema del tanque de desulfuración biológica.	49
Figura 20. Sistema de desulfuración biológica adaptado para el tratamiento de una muestra de biogás tomada del biodigestor de la finca La Floresta.....	50
Figura 21. Columna de absorción química del CO ₂ presente en el biogás, adaptada a un biodigestor experimental del ITCR.....	52
Figura 22. Esquema simplificado de los componentes de la columna de absorción y su funcionamiento	53

ÍNDICE DE ANEXOS

Número	Título	Pág.
Anexo 1.	Informe del análisis de la composición inicial del biogás del biodigestor experimental emitido por el Laboratorio GAIA.....	86
Anexo 2.	Informe del Laboratorio GAIA de los resultados de CH ₄ y H ₂ S del biogás de la finca La Floresta antes y después de la desulfuración biológica, así como del biogás a la salida de la columna de absorción.....	87
Anexo 3.	Diagrama del proceso de producción de biogás para su uso como combustible vehicular en la ciudad de Lille, Francia.	88
Anexo 4.	Esquema de una propuesta tecnológica para el proceso de biodesulfuración biológica.	88

Con base en los resultados de esta investigación se está redactando el artículo científico "Desarrollo de un sistema de purificación a escala para la remoción del H₂S y CO₂ del biogás".

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el biogás se perfila como un combustible renovable, con bajos costos de producción y escasa contaminación ambiental, que ha ganado popularidad por la posibilidad de solventar los problemas de la dependencia en los combustibles fósiles y del calentamiento global. El biogás puede ser utilizado directamente, cerca del lugar donde se produce, para generar llama y calentar. Sin embargo, para otras aplicaciones, en donde se requiere su compresión, como para su almacenamiento y transporte en cilindros, así como para su transporte en tuberías, se requiere de un proceso previo de purificación que permita convertir el biogás en una fuente de energía versátil (Viquez, 2009; Wellinger y Lindberg, 2000; Ford, 2007).

El biogás, al obtenerse de la biodigestión o degradación anaerobia de la materia orgánica, presenta una composición variable de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), vapor, sulfuro de hidrógeno (H_2S), así como trazas de amonio (NH_3) y nitrógeno (N_2). La purificación del biogás consiste en la obtención de un alto porcentaje de metano, por medio de la remoción de los otros gases no combustibles y contaminantes que lo componen. De esta manera, por medio de la purificación del biogás, se logra obtener un combustible alternativo que puede ser empleado en las mismas aplicaciones que el gas natural; que van desde el calentamiento o la producción de electricidad con motores de combustión interna o como combustible para vehículos (Nozic, 2006; Jarvis, 2004).

A medida que se ha popularizado el uso del biogás, también se ha incrementado la investigación y la generación de conocimiento tecnológico con respecto a su purificación. Por ello, existe una gran cantidad de métodos físicos, químicos e incluso biológicos que conllevan a la separación selectiva de los diferentes contaminantes y de esta forma, permiten la producción segura de biogás de mayor calidad. En el caso de la remoción de los principales contaminantes del biogás, CO_2 y H_2S , se pueden nombrar la absorción física, separación por membrana, la absorción química y el empleo de procesos biológicos (Kapdi *et al.*, 2004).

En Costa Rica, ya se cuenta con más de mil biodigestores –o receptáculos de fermentación anaerobia- distribuidos principalmente en fincas agropecuarias o lecherías de las zonas rurales, que brindan una fuente de energía adicional y de bajo costo, debido a la capacidad del biodigestor de producir biogás (Guevara, 1996; Botero, 2007). Por ello, considerando que en Costa Rica se cuenta con la capacidad de producción de biogás, se puede potenciar el uso de esta fuente de energía mejorando la calidad del biogás obtenido de los biodigestores.

Por otro lado, el presente proyecto de graduación se desarrolla dentro y como parte del proyecto de investigación multidisciplinario “Sistema de vigilancia, control y protección para la purificación, compresión y envasado de metano empleando comunicación inalámbrica bajo protocolos de seguridad OSHA y NFPA”, que se está llevando a cabo en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Este proyecto tiene como finalidad lograr la compresión del biogás dentro de cilindros de gas, para lo cual es indispensable la purificación previa del biogás, y que permitiría el uso de este combustible en una gran cantidad de funciones; siendo su uso como combustible para vehículos de particular interés para esa investigación.

El presente trabajo de investigación detalla el diseño de un sistema de purificación de biogás práctico y poco costoso cuyo fin era acoplarse a los biodigestores experimentales establecidos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Este sistema consiste de una torre de absorción y un proceso biotecnológico de desulfuración biológica con bacterias, para remover CO_2 y H_2S del biogás. Además, por medio de análisis de la composición del biogás en las diferentes etapas del proceso, se determinó la eficiencia del sistema de purificación propuesto, para establecer si con él era posible para alcanzar altos niveles de pureza del metano final. Todo esto con miras a generar un sistema de purificación que pudiese ser adaptado a las condiciones nacionales y que fuese efectivo para la obtención de un biogás altamente puro; maximizando el uso de una fuente de energía tan beneficiosa como el biogás, con el fin de reducir o incluso reemplazar el consumo de combustibles fósiles.

REVISIÓN DE LITERATURA

1. Biodigestión

La biodigestión es un proceso que comprende una parte del ciclo biológico y que consiste en una fermentación anaeróbica por parte de un conjunto de diferentes tipos de microorganismos que permiten la degradación metanogénica de la materia orgánica. En principio, toda la materia orgánica puede ser fermentada o digerida por lo cual en el proceso de biodigestión se obtiene como producto final la materia orgánica degradada y la producción de un gas combustible conocido como biogás (Viquez, 2009; ISAT, s.f.).

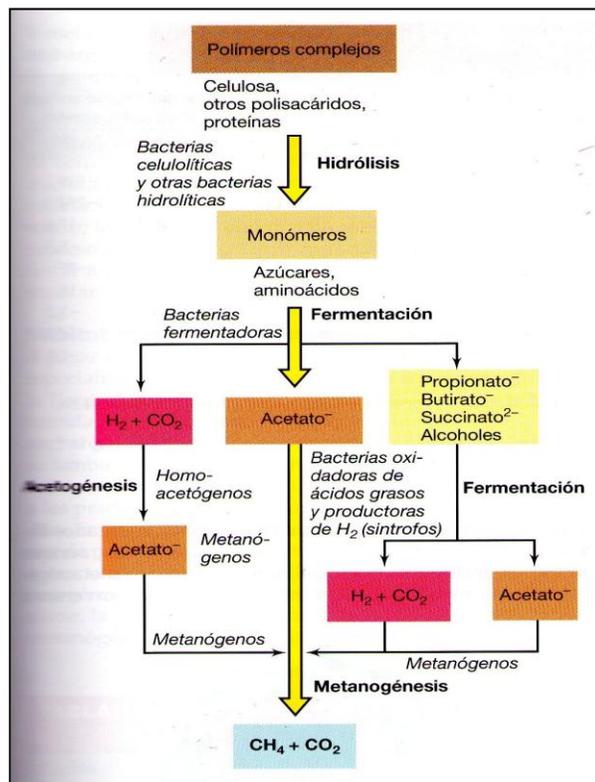
1.1. Descripción de las etapas de biodigestión

Todo el proceso bioquímico de biodigestión se puede dividir en cuatro etapas principales que consisten en la hidrólisis, la acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis; como se esquematiza en la figura 1. Para que ocurra la biodigestión, se presenta primero una etapa de hidrólisis en la cual las bacterias degradan las cadenas largas de estructuras carbonadas, de carbohidratos, lipasas y proteínas que conforman la materia orgánica, y las van rompiendo y transformando en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando hidrógeno y dióxido de carbono. Este trabajo se lleva a cabo por un complejo de microorganismos, en su gran mayoría anaerobios facultativos que liberan enzimas extracelulares como celulasas, lipasas, amilasas y proteasas (De Mes *et al.*, 2003; FAO, 1996).

La segunda etapa es la acidogénesis, que consiste en la conversión de compuestos orgánicos solubles en ácidos grasos volátiles y dióxido de carbono. Luego, se procede a una fase de acetogénesis, en donde las bacterias acetogénicas realizan la degradación o reducción de los ácidos grasos orgánicos, tomando el grupo acético $\text{CH}_3\text{-COOH}$ y liberando como productos ácido acético e hidrógeno. Para poder llevar a cabo este proceso y producir ácido acético, estas bacterias anaerobias facultativas necesitan oxígeno y carbono. Para ello, utilizan el oxígeno en

el sustrato, de forma tal que estas bacterias productoras de ácido generan condiciones anaeróbicas que son esenciales para que los microorganismos metanogénicos puedan vivir (Madigan *et al.*, 2006; De Mes *et al.*, 2003; ISAT, s.f.).

Las bacterias metanogénicas, encargadas de la producción del biogás, constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos encargados de digerir la materia orgánica y devolver al medio los elementos básicos para reiniciar el ciclo. Ellas pertenecen al grupo de las arqueobacterias y son estrictamente anaeróbicas. Otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales debido a lo cual será necesario un mantenimiento casi constante de ciertos parámetros que se detallan en el siguiente apartado. Las bacterias metanogénicas degradan los compuestos restantes de bajo peso molecular; por ejemplo, utilizan hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético para producir metano, dióxido de carbono y agua (Hilbert, s.f.; FAO, 1996).



(Tomado de: Madigan *et al.*, 2006)

Figura 1. Etapas del proceso de digestión anaerobia

1.2. Factores a considerar en el proceso metanogénico

La actividad metabólica bacteriana involucrada en el proceso de biodigestión es sensible a muchos factores. La calidad del biogás así como la productividad que se obtenga va a depender de facilitar a las bacterias condiciones ambientales óptimas para su crecimiento. Debido a que cada grupo de bacterias involucradas en las distintas etapas del proceso responde en forma diferencial a esos cambios no es posible dar valores cualitativos sobre el grado en que afecta cada uno de ellos la producción de gas. Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta están el sustrato (nutrientes disponibles); la temperatura del sustrato; el tiempo de retención hidráulico; el nivel de acidez (pH); la relación carbono/nitrógeno; la concentración del sustrato; el agregado de inoculantes; el grado de mezclado; y la presencia de compuestos inhibidores del proceso (Hilbert, s.f.).

Por un lado, es indispensable que la materia orgánica contenga suficientes nutrientes para que se logre la sobrevivencia y el crecimiento adecuado de los microorganismos, y se asegure el proceso de degradación del sustrato. El nitrógeno es esencial para el crecimiento y la actividad de las bacterias, por lo que se busca que la materia con que se alimenta al biodigestor presente una relación carbono-nitrógeno (C/N) de 20 a 30:1.

Por otro lado, la temperatura es un factor importante para la eficiencia del proceso de biodigestión. El nivel de producción de metano aumenta al ir incrementando la temperatura, hasta alcanzar un máximo relativo, entre 35 y los 37°C, temperatura en la cual los organismos mesofílicos pueden sobrevivir. La mayoría de las bacterias anaeróbicas funcionan mejor en el rango de 30 a 35°C y esta es la temperatura óptima para la producción de biogás. La temperatura en el tanque digestor siempre debe estar por encima de 20°C, porque a temperaturas menores, se produce poco biogás.

El tiempo de retención es el número de días que demora la masa en producir metano y depende de la temperatura; por esta razón en países tropicales los períodos de retención

tienden a ser de 10 a 25 días, mientras que en climas más fríos, son comunes periodos de retención más largos, de 80 a 90 días. Además, cada sustrato tiene un óptimo tiempo de retención y éste solo puede ser determinado en la práctica para cada caso.

Por otro lado, en cuanto a pH, las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las variaciones en pH por lo que debe mantenerse dentro de un rango de pH neutro; entre 6.5 y 7.5. Igualmente, los compuestos que presentan efectos tóxicos y son adversos a la metanogénesis son el amonio, cationes de Na^+ , K^+ y Ca^{++} , metales pesados, xenobióticos, entre otros (Silva, 2002; De Mes *et al.*, 2003).

2. Biodigestores: Concepto, importancia y clasificación

Un biodigestor es un depósito hermético dentro del cual se puede llevar a cabo el proceso de fermentación o digestión anaeróbica, y que favorece la estabilización de la materia orgánica y la generación del biogás. Generalmente, todos los biodigestores deben contar con tres partes esenciales: un tanque de carga o de ingreso para la materia orgánica, el tanque digestor donde se produce y se almacena el biogás y la parte del biodigestor que comprende la descarga o salida del abono (Sánchez, 2003).

Cuando se implementa un biodigestor para que se lleve a cabo la biodigestión, se obtienen grandes beneficios tales como proporcionar biogás para suplir necesidades energéticas y disminuir los gases del efecto invernadero al recircular el carbono en los sistemas de producción donde se utiliza el biodigestor. Además, es un sistema de descontaminación para convertir los desechos que pueden contaminar las aguas o generar daños a la salud, eliminando malos olores y patógenos, en residuos útiles que conservan sus nutrientes y que sirven como abono líquido de alta calidad. Por ello, la tecnología del biogás es una de las tecnologías alternas que demostró una gran potencialidad dentro del espectro de la biomasa, comenzando una gran difusión en Europa, Asia y en América Latina. Su aplicación se enmarcó en dos escenarios, por un lado el medio rural debido a las grandes deficiencias en zonas relativamente

aisladas en cuanto a electrificación, y el otro escenario ha sido el del tratamiento de efluentes agroindustriales y urbano rurales con aprovechamiento energético (Viquez, 2009; Taylhardat, 2007).

La producción de biogás por medio de un biodigestor va a depender de los factores descritos anteriormente que afectan el proceso metanogénico, así como otros correspondientes a la alimentación del biodigestor, su construcción y diseño. Primero se debe considerar la fuente de la materia orgánica con la que se va a alimentar el biodigestor. Cualquier forma de materia orgánica húmeda (entre un 40 a 95% de humedad), con un contenido bajo de lignina y celulosa es adecuado para llevar a cabo la digestión anaerobia. Un contenido insuficiente de agua en la mezcla alimentada al biodigestor ocasiona que los microorganismos no obtengan el entorno apropiado para que puedan funcionar efectivamente y la cantidad de biogás producido será pequeña. Si la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción de biogás es limitada. Los materiales que tradicionalmente se han empleado son de origen agropecuario como el estiércol de ganado y de otros animales como cerdos, ovejas, caballos y gallinas. Sin embargo, también se puede utilizar materia de origen vegetal como plantas frescas o desechos de procesos agroindustriales. El tipo de materia y la proporción de la mezcla agregada al digestor afecta la capacidad de degradación por parte de los microorganismos, y por lo tanto, va a determinar la productividad de biogás resultante (Silva; 2002; Kabasci, 2009).

Además, se deben considerar aspectos de su construcción que pueden beneficiar parámetros, que pueden influir en la capacidad de producción de biogás. Por ejemplo, los biodigestores pueden ser construidos bajo tierra o sobre la superficie. En zonas frías es mejor hacerlo bajo tierra porque la temperatura es más alta que en la superficie o, en su defecto, se puede construir en superficie bajo un invernadero o utilizar sistemas de calentamiento del tanque. Igualmente, en un biodigestor el tiempo de retención va a depender del volumen del biodigestor, por lo cual aspectos de diseño son esenciales para lograr una mayor efectividad del biodigestor (Sánchez, 2003).

Los biodigestores se pueden clasificar de acuerdo a la frecuencia de cargado como sistemas de biodigestión batch, semi-continuo y continuo. El sistema batch o discontinuo se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir gas combustible. Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. Además este sistema de biodigestor también es ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso, o el efecto de un determinado residuo orgánico o una mezcla de desechos. Por otro lado, el sistema semi-continuo es uno de los más usados en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños para uso doméstico. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación. Finalmente, los sistemas continuos son aquellos digestores que se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. Generalmente son plantas muy grandes de tipo industrial, en las cuales se emplean equipos para su control y se genera una gran cantidad de biogás que se aprovecha en aplicaciones industriales (Solari, 2004; Guevara, 1996).

Debido a la creciente implementación de los biodigestores, además de su clasificación en estos tipos de sistemas, surgen también distintos “modelos” de biodigestores. El desarrollo de estos diversos modelos ha respondido a intereses específicos; como el uso de determinados materiales de construcción, facilidad de construcción e incluso políticas para la difusión masiva tanto de organismos internacionales de asistencia técnica como gubernamentales. Entre los modelos más populares se encuentra el modelo Chino, el modelo Indio y el Taiwán, que se ilustran en la figura 2 (Taylhardat, 2007; Guevara, 1996).

El modelo Chino se conoce como de domo fijo, porque consiste en tanques cilíndricos enterrados y al no existir un gasómetro, el gas se almacena dentro del mismo tanque, lo que representa un diseño que responde a una maximización del ahorro de material. El biodigestor de tipo Hindú o Indio tiene muchas variantes en cuanto a diseño, pero tiende a ser vertical, enterrado y funciona en forma continua. Este digestor posee una cámara de digestión de forma

cilíndrica, en donde la salida del efluente se efectúa por rebalse. Sobre la cámara de digestión flota una campana gasométrica, lo que permite que el gas se almacene a presión constante y volumen variable. Por otro lado, se ha desarrollado otro modelo, el OLADE Guatemala, que es uno de los biodigestores que utiliza el sistema batch o discontinuo. Este sistema es muy usado en muchos casos porque, en comparación con los modelos Chino e Hindú, presenta una mayor producción de biogás. Incluso, se estima que la producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,5 a 1,0 m³ biogás/m³ digestor (Solari, 2004; Silva, 2002).

Entre los diversos modelos también se encuentra el biodigestor de tipo Taiwán, que se caracteriza por ser un biodigestor que presenta una bolsa tubular de PVC o de polietileno, colocado en una fosa de tierra o concreto, y que presenta en cada extremo una entrada y una salida. Se diseñó con el objetivo de eliminar los inconvenientes que se generaban con el empleo de otros materiales, como el metal o concreto, en la construcción de otros tipos de biodigestores. Por un lado, este biodigestor se caracteriza por ser muy económico porque todos sus componentes pueden ser fabricados con materiales fáciles de obtener. Igualmente, su implementación y mantenimiento es relativamente fácil. Además la eficiencia de este diseño es mayor, debido a que es de flujo continuo y la producción de biogás es constante. Por ejemplo, un biodigestor casero modelo Taiwán, de aproximadamente 3 a 5 metros de largo, que se alimente diariamente con 20 kilos de excrementos frescos mezclados con 100 litros de agua, permite la cocción diaria de los alimentos para una familia de cinco personas y disminuye la factura eléctrica hasta en un 50%. Como desventaja del modelo Taiwán se puede mencionar que presenta un corto período de vida y es más susceptible al daño, debido a que está elaborado con una bolsa de plástico o PVC (Viquez, 2009; FAO, 1996; Botero, 2007; Sánchez, 2003).

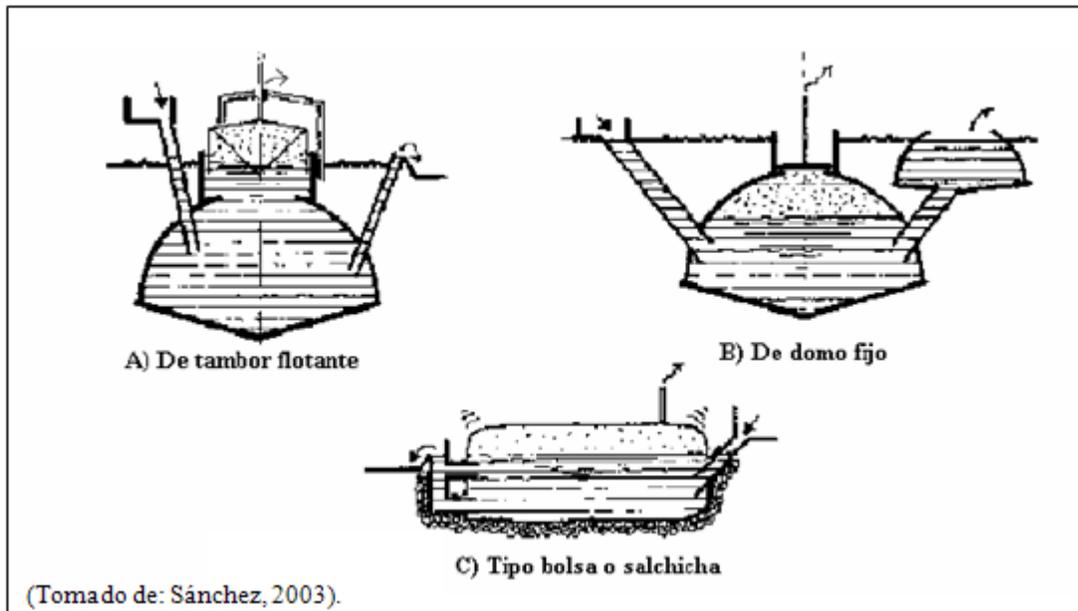


Figura 2. Modelos de biodigestores más comunes.

A) Biodigestor de tambor flotante o Modelo Hindú; **B)** Modelo Chino; **C)** Modelo Taiwán.

En Costa Rica el modelo Taiwán es el más común. Gracias al trabajo conjunto de la Universidad EARTH con el Ministerio de Agricultura, el Instituto Costarricense de Electricidad, el proyecto POCOTSI de la Fundación Neotrópica y el proyecto COBODES de la Unión Europea, existen actualmente unos mil biodigestores instalados en el medio rural de Costa Rica. Estos biodigestores pueden producir biogás con un contenido de entre un 60 a 80% de CH_4 , que es un combustible renovable, apto para su uso directo o para la generación de energía eléctrica. Incluso el biodigestor establecido en la Universidad EARTH desde 1994, cuenta desde el 2006, con una planta de generación de energía eléctrica que trabaja con el biogás producido en éste (Botero, 2007).

3. Características del biogás sin purificar

3.1. Composición

El producto de la digestión anaeróbica de desechos biológicos que ocurre en un biodigestor es un gas mixto conocido como biogás. El biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4) (50-80%), y dióxido de carbono (CO_2) (15-45%) así como pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S), amonio, y trazas de nitrógeno y monóxido de carbono. Además, el biogás generalmente se encuentra saturado de vapor y puede contener partículas de polvo y siloxanos (Persson *et al.*, 2006; Plombin, 2003).

Igualmente se debe tener en cuenta que la composición del biogás va a variar dependiendo de donde provienen los desechos. El biogás obtenido de la digestión de desechos animales no presenta algunos de los contaminantes que sí posee el biogás proveniente de desechos del tratamiento municipal de aguas o de los desechos agrícolas (AD Community, s.f.).

3.2. Propiedades

Las propiedades características del biogás, al igual que con un gas puro, son dependientes de la presión y la temperatura. También sus propiedades pueden ser alteradas debido a los contenidos de humedad. Por ello, los principales factores o variables de interés que se consideran en cuanto al rendimiento y la producción de biogás son: el cambio en el volumen en función de la presión y la temperatura, el cambio en el valor calorífico del biogás con respecto a la temperatura, presión y el contenido de vapor, y por último, el cambio en el contenido de vapor en función a la temperatura y la presión. Sin embargo, se han establecido aproximaciones en cuanto a otras propiedades cuando el biogás está sin purificar ($\approx 60\%$ de CH_4 y $\approx 40\%$ CO_2), las cuales se presentan en el cuadro 1 y muestran la similitud entre el biogás y el gas natural. Igualmente, otra de sus características es que el biogás liberado al aire

y que se encuentre en concentraciones de entre un 6 y 12% puede llegar a ser explosivo (ISAT, s.f.; Wellinger y Lindberg, 2000).

El biogás crudo puede ser quemado en una serie de artefactos para calentar o para iluminación, descomponiéndose principalmente en CO₂ y H₂O. Aunque el poder calorífico del biogás depende de la concentración que éste posea de CH₄, se establece que 1m³ de biogás con aproximadamente un 65% de CH₄ equivale a 6,4 kW⁻¹ de energía ó 21.6 MJ/m³. Este valor corresponde, o se asemeja, aproximadamente a medio litro de diesel, a 0,63 litros de gasolina o a 1,61 kg de leña (Viquez; 2009; Velásquez, 2007).

Cuadro 1. Comparación entre las propiedades del biogás y el gas natural

Parámetro		Biogás (60% CH₄; 38% CO₂ y 2% de otras trazas)	Gas Natural
Valor calorífico	MJ/m ³	21.5	36.14
Densidad	Kg/m ³	1.21	0.82
Velocidad de ignición máxima	m/s	0.25	0.39
Punto de rocío	°C	60-160	59

(Tomado y traducido de: Wellinger & Lindberg, 2000).

3.3. Limitaciones de su uso

A pesar de que la producción de biogás puede ser un proceso continuo, uno de los principales problemas que se presentan, es que su uso se mantiene limitado al área donde se encuentra el biodigestor que lo produce, a menos que el biogás sea mejorado y comprimido para su transporte. Igualmente el uso de biogás “crudo” o sin purificar en aparatos para calentar o en motores de combustión interna, puede ser poco conveniente debido a que hay posibilidades de corrosión que limitan la vida útil de estos aparatos, debido a la presencia de trazas de vapor así como de H₂S (Kapdi *et al.*, 2004; AD Community, s.f.).

4. Purificación del biogás y características de sus principales contaminantes

La mejora o purificación del biogás consiste en la remoción de gases no combustibles, considerados contaminantes, tales como CO₂, H₂S y vapor de agua, los cuales reducen el valor calorífico del biogás y hacen poco rentable el proceso de compresión del biogás. De esta manera se logra la obtención de un alto porcentaje del CH₄, el cual se caracteriza por ser incoloro, insípido e inodoro, además de ser efectivo energéticamente para su aplicación como combustible. Para ello, se han desarrollado una serie de tecnologías para el mejoramiento o purificación del biogás de acuerdo al compuesto contaminante que se desee eliminar, las cuales se detallan más adelante en el trabajo (Kapdi *et al.*, 2004; Quesada *et al.*, 2006). A continuación, se describen los principales gases contaminantes que componen el biogás y que son eliminados por medio de diversos procesos de purificación.

4.1. Sulfuro de hidrógeno

El sulfuro de hidrógeno (H₂S) es el componente del biogás cuya eliminación se ha convertido en el principal motivo de investigación. Al reaccionar con el agua forma ácido sulfúrico que es altamente corrosivo, lo que constituye una gran desventaja, pues causa la corrosión severa de las partes o el equipo metálico utilizado para el aprovechamiento del biogás. Además, el H₂S es altamente inflamable, por lo que con concentraciones en el aire entre 4.3 y 46%, puede generar una explosión por ignición. Aparte de los peligros generados por su reactividad, es un compuesto que se puede considerar contaminante para el ambiente. Genera contaminación del aire, ya que su presencia o liberación conlleva a malos olores, lo que afecta el establecimiento de biodigestores a nivel industrial. Igualmente, este gas se puede convertir en dióxido de azufre (SO₂), otro contaminante tóxico que contribuye al fenómeno de lluvia ácida en la atmósfera. Con respecto a nivel de seguridad del personal que maneja un biodigestor, se deben considerar los peligros a la salud humana, ya que el sulfuro de hidrógeno es un gas de elevada toxicidad. Luego de una exposición a bajas concentraciones, su olor se deja de percibir por lo que es imposible detectar cuando se están inhalando concentraciones más altas y tóxicas (1000

ppm), que pueden llevar a la muerte con tan sólo 2 ó 3 minutos de exposición (Acosta *et al.*, 2009; Pérez y Villa, 2005; Horikawa *et al.*, 2004; Mandavia, 2007).

Considerando esas características tan particulares del sulfuro de hidrógeno se requiere de procesos prácticos y de bajo costo para la desulfuración y el manejo adecuado de un biodigestor productor de biogás de calidad. Actualmente existen varios métodos que se detallan más adelante entre los que predominan el uso de limadura de hierro, uso de filtros o borboteadores con compuestos químicos alcalinos, o el proceso de aireación para desulfuración biológica (Acosta *et al.*, 2009).

4.2. Dióxido de carbono

Otro de los contaminantes de importancia es el dióxido de carbono (CO₂). El CO₂ es uno de los principales componentes del biogás, y al no tener un valor energético como el CH₄, conlleva a que el biogás producido no tenga una alta eficiencia como combustible. Su remoción es necesaria para que el biogás presente un alto valor energético. Además, debe ser eliminado para poder obtener un porcentaje conocido de CH₄, que asegure una calidad consistente del biogás, y que cumpla con los estándares necesarios para ser empleado como combustible de vehículos y motores para la generación de electricidad. Igualmente al remover el CO₂, se asegura un volumen fijo o constante del metano almacenado (Nozic, 2006; Persson, 2006).

4.3. Vapor de agua

Igualmente, se requiere eliminar la presencia de vapor, ya que al acumularse genera condensación cuando el biogás se almacena a altas presiones. Esta potencial condensación en las tuberías de gas puede conllevar a la formación de soluciones ácidas que pueden ser muy corrosivas, afectando el transporte y almacenamiento del biogás. Además la remoción del agua

permite que el biogás pueda ser almacenado bajo altas presiones sin que ocurra condensación o congelamiento (Wellinger y Lindberg, 2000).

Teniendo en cuenta los efectos que tienen estos contaminantes en el biogás utilizado como una fuente de energía, en el cuadro 2 se indican los usos del biogás en los cuales no es necesario o no se considera rentable realizar la eliminación de estos compuestos; así como también se señalan las aplicaciones donde sí se considera un requisito el proceso de purificación del biogás.

Cuadro 2. Requisito de la remoción de distintos compuestos gaseosos de acuerdo a la aplicación en la que se utilice el biogás

Usos del biogás	Componentes del biogás		
	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O
Caldera (Calentador de agua)	Reducir a < 1000 ppm	No	No
Cocina	Sí	No	No
Motor estacionario	Reducir a < 1000 ppm	No	Evitar condensación
Combustible para vehículos	Sí	Sí (Recomendado)	Sí
Gasoducto	Sí	Sí	Sí

(Tomado y traducido de : Wellinger y Lindberg, 2000).

En el siguiente apartado se van a detallar las distintas formas en las que se ha utilizado el biogás como fuente de energía, cómo se ha adaptado el biogás para ser utilizado en estas aplicaciones, y cuales son los requisitos en cuánto a composición que debe presentar el biogás para ciertos usos.

5. Usos del metano

En cuanto a los usos del biogás, éste puede ser empleado en las mismas aplicaciones en las que se utiliza el gas natural. Se establece que sus principales usos son la generación eléctrica, en motores de combustión interna, para bombas de agua, alumbrado, en la cocción de alimentos y equipos de refrigeración (Silva, 2002).

5.1. En calentadores, plantillas de cocina y lámparas de gas

El biogás como fuente de calor es el uso más aplicado de esta forma de energía. La ventaja es que existe una amplia disponibilidad de aparatos que pueden ser modificados para utilizarlos con biogás. Por ejemplo, el biogás puede usarse en quemadores de cocina modificados con orificios más grandes que permitan el paso del gas. La ventaja de emplear el biogás para calentar es que no se necesita que el gas fluya a altas presiones y tampoco requiere un contenido muy elevado de CH₄; aunque es preferible utilizar técnicas de purificación del biogás para la remoción del vapor y el H₂S, para evitar la formación de ácidos que generan corrosión en los calentadores u otro equipo similar (Sánchez, 2003; Plombin, 2003; Wellinger y Lindberg, 2000).

5.2. En motores de combustión interna

El biogás puede ser utilizado para reemplazar la gasolina o el combustible diesel en motores de combustión interna debido a su poder calorífico. Aunque en motores de gasolina dicho reemplazo puede ser total, en motores diesel alcanza un máximo del 80% del reemplazo, pero se puede usar una mezcla de biogás y el combustible normal, para lo cual es necesario modificar el sistema de inyección o el carburador. Tienen amplio espectro de aplicación siendo los utilizados aquellos destinados al bombeo de agua y el funcionamiento de ordeñadoras en el área rural. Además, en cuanto a calidad del biogás, los motores a gas presentan requerimientos similares a los que se establecieron para los quemadores, con la

única diferencia de que la concentración de H₂S debe ser menor, con el fin de garantizar una vida útil del motor más prolongada (Sánchez, 2003; Persson *et al.*, 2006).

5.3. Combustible para vehículos

El uso vehicular del biogás es posible y se ha empleado desde hace bastante tiempo. El biogás puede ser utilizado en vehículos que presentan configuraciones en su motor para poder funcionar con gas natural. Considerando que ya existe una gran cantidad de automóviles que utilizan gas natural, se puede establecer que no hay problemas en cuanto a la capacidad de modificar un carro para que éste pueda utilizar biogás. Sin embargo, la difusión de este tipo de vehículos está limitada porque se requiere un tratamiento muy intensivo para que el biogás alcance los estándares necesarios para su uso como combustible de vehículos. Primero, para poder establecer los tanques de biogás en el carro, éste debe ser comprimido a alta presión (200 bar) y para poder realizar esto es necesario un proceso de purificación que asegure la obtención de un biogás con más del 95% correspondiente al CH₄. Esto por sí sólo encarece el biogás, sin considerar que se debe desarrollar infraestructura adecuada como estaciones de servicio. Además, la conversión de los motores es cara y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos. Por esta razón, hay una carencia en cuanto a servicios de abastecimiento y/o de compresión.

Sin embargo, se han realizado esfuerzos para modificar esta situación. Por ejemplo, desde 1991, se encuentra en funcionamiento un proyecto en la comunidad de Lille, Francia, en donde se comenzó a utilizar el biogás producido de las 100 000 toneladas por año de desechos orgánicos de la comunidad que se recolectan en el Centro de Recuperación de Desechos Orgánico, como combustible para una flotilla completa de autobuses de transporte público. Para ello, se requirió de la instalación de una unidad purificación y compresión del biogás que puede tratar 100 m³ de biogás crudo por hora así como toda una instalación especial para el abastecimiento del biogás en los autobuses (Plombin, 2003; Persson *et al.*, 2006.; Baesen, 2005).

5.4. Generación de electricidad

Otra de las principales aplicaciones del biogás y cuyo desarrollo es de gran importancia es la obtención de electricidad. Esto se puede lograr por medio de métodos diferentes. La generación de electricidad con biogás se puede lograr utilizando motores de ignición o de combustible dual, en los cuales el gas que ha sido previamente comprimido pasa por el motor y se calienta y genera una chispa, que es lo que conlleva a la generación de la electricidad y de calor. Sin embargo, la producción de electricidad también se puede realizar utilizando un calentador que funcione con biogás seguido de una turbina a vapor. Como ventaja se establece que la generación de electricidad tampoco requiere de excesivos procesos de purificación, ya que el contenido de CH₄ puede ser de un 40% o más. Anteriormente el empleo industrial de biogás para la producción de electricidad dependía de la capacidad de utilizar el calor del biogás en el sitio donde se localizaba el biodigestor, por lo que esto limitaba el potencial de las aplicaciones del biogás. Sin embargo, el uso de biogás purificado ofrece una mayor flexibilidad para su uso descentralizado. De esta forma, independientemente de donde se produzca, el biogás puede ser empleado para plantas de cogeneración eléctrica. Además, se ha establecido que la eficiencia de la producción de energía eléctrica a partir de biogás puede llegar a alcanzar un 68.5% (Jarvis, 2004; Ford, 2007).

Entre las ventajas de la producción de electricidad a partir de biogás se establece que, contrario a fuentes de energía renovables, como la energía solar o eólica, la biomasa siempre está disponible; de forma que el biogás se puede producir constantemente y puede ser almacenado de forma temporal en respuesta a la demanda energética. Igualmente, a nivel económico, en países europeos se ha establecido que el costo de producción de biogás es similar al costo de producción de gas natural. Esto considerando que las tecnologías de purificación son todavía recientes, y que los avances tecnológicos van a permitir que los costos de producción de biogás se reduzcan. De esta forma, se establece que el uso de biogás para la producción de electricidad puede llegar a convertirse en alternativa ante una crisis debido a la escasez de recursos que permitan la generación de electricidad (Ford, 2007).

6. Procesos para la purificación del biogás

Existe mucha tecnología disponible para el enriquecimiento del contenido del CH₄ en el biogás, principalmente por medio de la remoción de CO₂ y H₂S. En grandes rasgos, estos procesos de purificación se pueden clasificar como físicos, químicos y biológicos. Aunque la mayoría de estos mecanismos básicos que logran la separación del CO₂ del biogás, pueden ser usados para la eliminación del H₂S; otros procesos logran la remoción selectiva de diferentes constituyentes del biogás. Sin embargo estos procesos fueron desarrollados inicialmente para su uso en la purificación de otros compuestos combustibles como el gas natural o el petróleo. Por esta razón, no todos ellos pueden ser aplicados de forma exitosa para el tratamiento específico del biogás. La aplicación o la elección de los métodos de purificación va a depender de la escala de producción del biogás, su composición, el uso que se le va a dar al biogás y el grado de purificación necesaria; además se debe hacer un análisis de las ventajas y desventajas prácticas de cada proceso; evaluando también los costos para ponerlo en marcha. A continuación se va a realizar una descripción de las tecnologías más importantes y más empleadas en el área de la purificación de biogás; incluyendo las dos técnicas que se pretenden desarrollar en este proyecto, la absorción y el empleo de procesos biodesulfuración (Vijay *et al.*, 2006).

En el caso del CO₂ los procesos de absorción más utilizados son la absorción física, la absorción química y PSA o adsorción por cambios de presión. Mientras que para el H₂S, los procesos más utilizados para eliminarlo del biogás son la desulfuración biológica, la reacción química con otros compuestos y la absorción (Nozic, 2006; Persson, 2006).

6.1. Métodos físicos para la purificación de metano

Absorción física

Entre los métodos físicos de purificación, la absorción física es una de las técnicas más utilizadas debido que es efectiva incluso cuando hay bajos niveles de producción de biogás. La absorción consiste en una separación que ocurre debido a la transferencia de uno o más componentes minoritarios de una corriente gaseosa a una corriente líquida, llamada solvente. El objetivo de esta operación suele ser purificar una corriente gaseosa para su procesamiento, su emisión a la atmósfera, o recuperar un componente valioso presente en una determinada mezcla gaseosa (Franco y Ojeda, 2008).

La absorción se suele llevar a cabo en torres o columnas de relleno, en donde el gas conteniendo el componente a absorber se introduce por la parte inferior y atraviesa el relleno, el cual consiste en un lecho de partículas de un determinado tamaño, forma, y material. Al mismo tiempo, se introduce la corriente de solvente por la parte superior y cae por gravedad. Bajo esta disposición a contracorriente, en la que el sentido de circulación de ambas fases es opuesto, se logra la transferencia del componente de la corriente de gas a la corriente líquida. La concentración del componente en la fase líquida es inferior a la que le correspondería si estuviera en equilibrio con la fase gaseosa; es decir, existe una fuerza impulsora para la transferencia del componente gaseoso a la fase líquida (Zafar, 2006; Franco y Ojeda, 2008).

Para la absorción física, generalmente se hace uso de agua presurizada como un absorbente. Por lo cual a las columnas de absorción se les denominan columnas de lavado o *scrubbers* de agua. De esta manera, con el proceso continuo de absorción se logra la disociación de estas moléculas contaminantes de la corriente de gas y su posterior absorción en el agua, de forma que se permite alcanzar hasta un 96% de CH₄; es decir, una alta pureza del biogás (Zafar, 2006; Kabasci, 2009; Horikawa *et al.*, 2004).

En el caso de la purificación del biogás, el proceso de absorción física con agua depende de las diferencias de solubilidad del CH₄ y el contaminante (CO₂ o H₂S) en el agua. Por ello, en algunos casos se establece que este proceso puede ser usado para la remoción selectiva del H₂S, ya que este compuesto es más soluble que el CO₂. Incluso se establece que en

condiciones ideales, la solubilidad es de 0.5 g H₂S/100 ml de agua, de forma tal que se puede eliminar 200 ppm de este componente contaminante (Kabasci, 2009; Velásquez, 2007).

Para la remoción de H₂S, la serie de reacciones que se llevan a cabo son:

- $\text{H}_2\text{S}_{(g)} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{S}_{(ac)}$
- $\text{H}_2\text{S}_{(ac)} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HS}^-$
- $\text{HS}^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{S}^{2-}$ (Horikawa *et al.*, 2004).

En el caso de la aplicación de la absorción física para eliminación del CO₂ necesaria para la purificación de biogás, lo que ocurre a nivel de reacción es que el CO₂ al ser soluble en el agua, se asocia a estas moléculas para formar ácido carbónico:

- $\text{CO}_2_{(g)} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_{3(ac)}$

Se establece que la solubilidad del CO₂ en el agua es de 0.15 kg_{CO₂}/kg_{H₂O} (a 1 atm y 20°C). A pesar de se requieren mayores cantidades de agua ya que el CO₂ es menos soluble en ella que el H₂S, la absorción física del CO₂ permite la recirculación del agua ya que puede ser removido fácilmente con tan sólo reducir la presión (Vijay, 2006; Zafar 2006).

Considerando que el agua empleada en la columna puede ser recirculada, se establece que para su regeneración o limpieza, ésta se puede pasar a otra columna similar, donde el agua es tratada por el ingreso de aire a alta presión. Sin embargo, este proceso no es muy recomendable cuando se presentan altos niveles de H₂S, debido a que el agua va a comenzar a presentar altos niveles de azufre elemental que puede causar problemas operacionales (Wellinger y Lindberg, 2000).

Por otro lado la técnica de absorción física presenta otra gran cantidad de ventajas, ya que es muy sencilla, requiere de poca infraestructura, es amigable con el ambiente y se considera económica. Es por esta razón que es muy utilizada por los propietarios de pequeños terrenos agrícolas y de pequeñas granjas. Sin embargo, se ha establecido que la obtención de CH₄

purificado a partir de la absorción física es dependiente de factores tales como las dimensiones de la columna, la presión del gas, la composición inicial del biogás, el flujo de agua, el flujo de gas y la pureza del agua empleada (Zafar, 2006).

Adsorción

Otra de las metodologías físicas que se ha probado es el proceso de adsorción en una superficie sólida. La adsorción consiste en la transferencia de determinados compuestos presentes en el biogás a la superficie de un material sólido, en donde se concentran gracias a fuerzas físicas. El material que sirve para la adsorción es constituido principalmente por adsorbentes que se caracterizan por ser sólidos porosos, para así aumentar el área superficial. Por ejemplo para la remoción del CO₂ del biogás se han utilizado compuestos que se caracterizan por ser separadores o tamices moleculares, tales como la sílica, el óxido de aluminio, carbón activado o silicatos (Allam *et al.*, 2003).

Para realizar la adsorción, se requiere de la elaboración de un sistema comprendido por varios tanques pequeños o columnas unidas unas con otras. En cada unidad de adsorción, una columna está llena con el adsorbente seleccionado. De esta manera, el biogás se hace pasar por los diferentes compartimentos del sistema y los contaminantes son atrapados por el adsorbente presente, de forma que se va purificando progresivamente. El uso de varias columnas o tanques permite reducir la energía que se consume en la compresión del biogás, ya que para realizar este proceso se requiere que el gas sea presurizado, y de esta forma, cuando la presión de gas de un tanque se libera, es utilizada por las otras columnas (Wellinger y Lindberg, 2000).

Con este método, se tiene la capacidad de seleccionar el adsorbente deseado. Dependiendo del adsorbente elegido se pueden eliminar varios contaminantes o, por otro lado, se puede lograr la eliminación de un contaminante en específico. De esta forma, se logra que la eficiencia del proceso de adsorción como método de purificación sea mayor. Específicamente en el caso del

biogás, dependiendo del adsorbente seleccionado, se va a lograr remover CO_2 , H_2S , vapor u otras impurezas de forma selectiva. Por ejemplo, para la eliminación de H_2S , uno de los métodos más antiguos es la utilización de limallas de hierro u óxido de hierro (II), que se agregan a una columna por donde se hace pasar el biogás. En muchos casos para este proceso se utilizan virutas de madera cubiertas con óxido de hierro. De esta manera se agrega al biodigestor un adsorbente con una buena área superficial pero que tiene una baja densidad y peso, en comparación con la aplicación de limallas de hierro que son más pesadas. Se estima que de esta forma, con aproximadamente 100 gramos de fragmentos de madera recubiertos se puede eliminar o adsorber 20 gramos de H_2S (Kapdi *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 1998).

Existen numerosas ventajas en el uso de métodos de adsorción para purificar gases, dentro de las cuales se encuentran que proporciona un servicio prolongado, ya que las partículas se adsorben, pero no quedan unidas al adsorbente de forma irreversible, por lo que pueden ser reutilizados. Además con esta técnica se mantiene una alta estabilidad térmica del biogás. Su ejecución no requiere equipo muy sofisticado por lo que este sistema es de fácil operación. Por otro lado, proporciona la posibilidad de una elevada selectividad en la eliminación de un determinado contaminante. Sin embargo tiene como desventajas fundamentales que requiere de grandes volúmenes de material granulado para procesar mayores flujos de gases; haciendo el proceso más costoso (Fernández *et al.*, 1998).

Membranas

La separación por membrana se basa en la difusión de algunos compuestos que pasan a través de una membrana selectiva; de forma que, por ejemplo, algunos componentes del biogás crudo pueden ser transportados a través de una membrana selectiva, mientras otros son retenidos. El transporte de cada componente ocurre por diferencias en la presión y es dependiente de la permeabilidad y la difusividad que posea el componente ante el material del cual está elaborada la membrana. Por ello, para obtener CH_4 de alta pureza, se requiere de una alta permeabilidad. Las membranas están hechas de polímeros porosos y son extremadamente

finas; del orden de los micrones. Se ha establecido que las membranas sólidas a partir del polímero de acetato-celulosa presentan una permeabilidad para el CO₂ y H₂S de 20 y 60 veces mayor, respectivamente, que para el CH₄ (Fernández *et al.*, 1998; Kapdi *et al.*, 2004).

Para la separación por membranas, hay dos sistemas básicos de purificación. Uno de ellos es la separación de gases por presión alta, con fases gaseosas a ambos lados de la membrana, y la otra es la separación de gases de presión baja en absorción líquida, donde un líquido absorbe las moléculas que pasan por la membrana (Wellinger y Lindberg, 2000).

Estas técnicas de separación por membrana se utilizan solamente en procesos en los cuales el flujo de gas sea lo suficientemente grande para justificar la inversión. Esto porque aunque los equipos y la operación de este método son simples, los costos son elevados debido a la necesidad de aplicar grandes presiones al gas. Además se establece que la eficiencia no es tan considerable (Fernández *et al.*, 1998).

Separación o destilación criogénica

Otro de los métodos físicos que pueden ser empleados para la purificación del biogás es la separación criogénica. Este proceso consiste en la separación de mezclas de gases por medio del uso de condensaciones fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas. Aunque se ha utilizado la separación criogénica para la eliminación de CO₂, todavía no se han realizado todos los estudios necesarios para asegurar si el proceso es exitoso como técnica de purificación de biogás (Allam *et al.*, 2003; Kapdi *et al.*, 2004).

Para realizar una separación criogénica, el biogás sin purificar debe ser comprimido a una presión aproximada de 80 bar. Esta compresión se debe realizar por medio de diferentes etapas entre las cuales se da un proceso de enfriamiento. Esto porque para separar el CO₂, se requiere al menos una temperatura de -56,6°C y una presión de 5,18 bar. A estas bajas temperaturas el

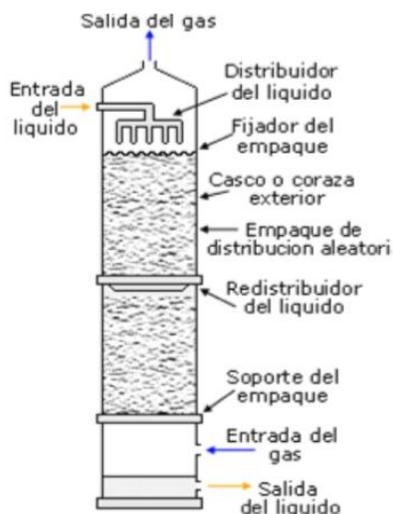
CO₂ y la mezcla de los gases restantes del biogás, comienzan a hacerse líquidos, de manera que se logra separar el CO₂ condensado. El CO₂ que ha sido removido del biogás se puede procesar aún más por medio de destilaciones para intentar extraer de él residuos de CH₄ (Allam *et al.*, 2003).

Sin embargo como todos los métodos, éste también presenta sus ventajas y desventajas. Aparte de la alta pureza obtenida, con la separación criogénica se logra recuperar o separar un compuesto gaseoso en su forma líquida, lo que puede ser muy conveniente para hacer productos derivados y o para su transporte. En cuanto a sus desventajas, todavía no ha sido muy utilizado como técnica de purificación de biogás, sólo se han realizado pruebas. Igualmente, aunque no se tiene un estimado de la inversión necesaria y los costos que puede generar aplicar este método, se sabe que es un proceso muy costoso con muchos requisitos de mantenimiento (Kapdi *et al.*, 2004).

6.2. Métodos químicos para la purificación de metano

Absorción química

Uno de los métodos químicos para la purificación del biogás es la absorción química, la cual consiste en la formación reversible de enlaces químicos entre el soluto y la solución química establecida. Para realizar la absorción química, generalmente se utiliza una columna de absorción o scrubber similar a la que se emplea para la absorción física, por la que el biogás debe pasar a contracorriente a la solución química para que así logre entrar en contacto con el compuesto absorbente y generar la reacción necesaria para que el contaminante se asocie a la solución; como se muestra en la figura 3. Se ha señalado que la absorción química es una técnica efectiva incluso cuando el contacto de las soluciones químicas con el gas es de sólo 1,3 a 2 segundos (Horiwaka *et al.*, 2004; Allam *et al.*, 2003; Gabriel *et al.*, 2003).



(Tomado de: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), s.f.)

Figura 3. Esquema de una columna de absorción a contracorriente.

Los solventes químicos utilizados para la purificación del biogás generalmente involucran a soluciones acuosas de amonio o sales alcalinas. En el caso de las soluciones de amonio, el grupo amino (NH_2) de éstas se combina con CO_2 y H_2S para dar compuestos de hidrógeno carbonato amoníaco $(\text{RNH}_3)\text{HCO}_3$ y azufre con amoníaco $(\text{RNH}_3)\text{S}$ (Kapdi *et al.*, 2004).

Para ilustrar el uso de la absorción química, en el caso específico de la absorción química del CO_2 , se pueden utilizar soluciones alcalinas, tales como KOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con ayuda de la agitación, ya que la turbulencia en la solución facilita la difusión de esta molécula en el líquido (Kapdi *et al.*, 2004). Para la eliminación del CO_2 , otro de los principales métodos disponibles y que genera la producción de biometano de alta pureza es la absorción química con polietilenglicol. Para este proceso, generalmente se utiliza el producto comercial llamado Selexol, que tiene afinidad al CO_2 y H_2S . Incluso se considera que esta técnica es más efectiva que la absorción física para la remoción de CO_2 , ya que se requiere una menor demanda de soluto y, por lo tanto, menor energía para bombear el soluto dentro de la columna (Wellinger y Lindberg, 2000).

De igual forma, el H₂S también se puede eliminar del biogás con ayuda de la absorción química. El estudio de Horiwaka *et al.* (2004) estableció que es posible remover este compuesto por medio de su absorción en una solución de hierro quelatado (Fe-EDTA), el cual convierte el H₂S a azufre elemental, que es menos tóxico, más estable y se puede considerar como un producto químico de interés comercial. Además, puede convertirse en un sub-producto del proceso, o al menos se transforma en un residuo sólido que es más fácil de desechar.

Con respecto a la aplicabilidad de este proceso, se puede decir que su uso es muy ventajoso porque para la absorción en biogás se tienden a utilizar las soluciones acuosas alcalinas, que aseguran la eliminación de los problemas de corrosión. Igualmente, con la absorción química, se requieren menores volúmenes de los solventes para que se logre la absorción, por lo que también se logran disminuir las demandas de bombeo de la solución a la columna donde entra el biogás. Sin embargo, aunque presenta muchas ventajas, entre sus limitantes se establece que sus costos de operación pueden llegar a ser muy altos. Igualmente, en algunos casos, se utilizan químicos que presentan desventajas tales como que el proceso puede generar halometanos que son tóxicos para el aire, o que son considerados peligrosos; por lo que se deben establecer normas de manipulación y cuidado (Gabriel *et al.*, 2003; Fernández *et al.*, 1998).

Metanación catalítica

Por medio de un proceso de conversión química de un compuesto se puede lograr la reducción considerable de las concentraciones del gas indeseable, hasta que se obtienen niveles mínimos de éste; al convertir el gas indeseable en el compuesto de interés. De esta manera, se logra obtener una alta pureza en el producto deseado. Generalmente la conversión química se realiza una vez que el componente contaminante se ha removido por otros métodos y únicamente se presentan trazas restantes. En el caso de la purificación de biogás en específico, la conversión química se conoce como metanación catalítica, en la cual el CO₂ y H₂ se convierten de forma

catalítica a CH_4 y a agua. Sin embargo esta técnica es bastante cara y el resultado no puede garantizarse en todos los casos. Otra de sus desventajas es que las reacciones son altamente exotérmicas, por lo que hay un problema en cuanto a la eliminación del calor a partir del metanizador. Igualmente, se requiere una gran cantidad de hidrógeno para que este proceso ocurra (Kapdi *et al.*, 2004).

6.3. Métodos biológicos para la purificación de metano

Desulfuración biológica

En los últimos tiempos se han desarrollado y aplicado con mayor preferencia los procesos biológicos, por ser más sencillos y amigables con el medio ambiente. Para la purificación de biogás, los métodos biológicos se enfocan principalmente en los procesos de desulfuración, es decir, la remoción del H_2S .

La biodesulfuración es el proceso en el cual se emplean microorganismos para remover sulfuros del medio. Se basa en la capacidad de ciertos microorganismos para oxidar compuestos reducidos de azufre, transformándolos en compuestos de fácil eliminación. Este proceso posee una serie de ventajas como bajos costos de inversión y de operación ya que utiliza equipos sencillos y de bajo consumo de reactivo, menor consumo energético al poderse trabajar a temperatura ambiente, así como, la posibilidad de eliminar tanto el azufre pirítico como parte del orgánico (Pérez y Villa, 2005).

Microorganismos desulfurantes

Existen muchos microorganismos que son los responsables de los procesos de biodesulfuración y específicamente la remoción de H_2S del biogás. Éstos se encuentran de forma natural en los desechos o pueden ser inoculados, como cuando se utilizan biofiltros,

para poder realizar una purificación de forma biológica. Estos microorganismos habitan en lugares húmedos y son consumidores de H₂S como fuente nutricional, tomándolo y generando productos oxidación como el azufre elemental y el sulfato. Estos microorganismos corresponden principalmente a las bacterias incoloras del azufre, las cuales juegan un papel esencial en la parte oxidativa del ciclo del azufre (Fernández *et al.*, 1998; Pérez y Villa, 2005).

Las bacterias incoloras del azufre abarcan un amplio rango de diferentes tipos de bacterias con diversa morfología, fisiología, propiedades ecológicas, y diverso requerimiento medio ambiental. Por ello, pueden ser encontradas en casi todos los nichos ecológicos donde los compuestos reducidos de azufre están presentes. Por otro lado el metabolismo del carbono de estas bacterias sulfoxidantes va de un rango de completa autotrofia hasta la heterotrofia. A pesar de su gran diversidad, este grupo de bacterias se caracteriza por utilizar compuestos reducidos de azufre como fuente de energía para su crecimiento. Es decir, lo único que tienen en común es su capacidad de oxidar el azufre (Pérez y Villa, 2005; Pérez-Ibarra, 2007).

Se ha establecido que entre estos microorganismos, los más empleados para el control del H₂S son aquellos microorganismos autotróficos del género *Thiobacillus* los cuales se encargan de oxidar el sulfuro a sulfato mientras que emplea el CO₂ como su fuente de carbono para crecimiento. Las especies de *Thiobacillus* se caracterizan por ser bacterias con forma de bacilos pequeños, que miden 0.3 µm de ancho por 1-3 µm de largo, de crecimiento lento y quimiolitófos obligados. Además, son microorganismos aeróbicos y anaeróbicos facultativos, gram-negativos, móviles por un flagelo polar sencillo y no forman esporas. Estas bacterias pueden crecer entre los 25 – 35 °C; sin embargo, se han encontrado especies termofilas moderadas que crecen a 55 °C. Las especies de *Thiobacillus* presentan, además, resistencia a pH bajo (Madigan *et al.*, 2006; Pérez-Ibarra, 2007; Gabriel *et al.*, 2003).

En 1989, se caracterizó al grupo *Thiobacillus* como aquel con la capacidad metabólica de crecer en presencia de compuestos reducidos de azufre usándolos como fuente de energía y electrones; sin embargo gracias a los avances en el análisis filogenético molecular de las

secuencias del gen rRNA 16S, el género *Thiobacillus* posteriormente fue reorganizado. De esta manera, en el año 2000, se presentaron propuestas de la reclasificación de ciertas especies, antes clasificadas bajo el género *Thiobacillus*, dentro de otros nuevos géneros; como fue el caso de *T. novellus*, que pasó a convertirse en *Starkeya novella*. Igualmente, *T. thiooxidans* se reclasificó dentro del género *Acidithiobacillus* como *A. thiooxidans* (Pérez-Ibarra, 2007; Kelly *et al.*, 2000; Kelly y Wood, 2000).

Como parte del género *Acidithiobacillus*, la especie *A. thiooxidans* es un bacilo Gram negativo (0,4 x 2,0 μm), acidofílico y aeróbico, miembro de la subclase c de *Proteobacteria*. Es móvil gracias a que presenta un flagelo polar y utiliza compuestos reducidos del azufre para su crecimiento autotrófico, y puede crecer en medio líquido que presente azufre elemental, tiosulfato o tetratiónato, con una temperatura óptima para su crecimiento que ronda entre los 30-35 °C. La especie de *A. thiooxidans* es muy empleada en procesos de minería, ya que puede oxidar el azufre en un amplio rango de pH desde 1 a 9 y tolerar altas concentraciones de metales en el proceso de lixiviación (Kelly y Wood, 2000).

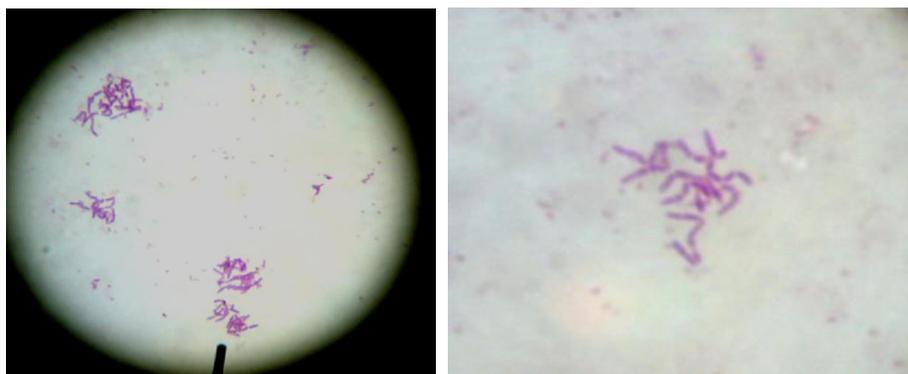


Figura 4. Tinción de Gram del cultivo de *A. thiooxidans* (100X y 400X).

En el caso de *S. novella*, esta bacteria es un bacilo pequeño (0,4-0,8 μm x 0,8-2,0 μm) aunque también puede presentar una forma cocoidal o elipsoidal, que se mantiene sola o en parejas. El género pertenece a la subclase a-2 de *Proteobacteria*, y debido a que se puede aislar del suelo

se presume que es una bacteria universal. Es un quimiolitotrofo facultativo o mixotrofo; es decir, puede crecer utilizando ambos CO_2 o compuestos orgánicos como fuente de carbono y es capaz de obtener energía de la oxidación de compuestos de azufre inorgánicos. A pesar de ello, este organismo es aeróbico, tanto en su condición autotrófica como heterotrófica. La temperatura óptima de crecimiento es de entre 25-30 °C, pero puede crecer dentro del rango de los 10 a 37 °C. Igualmente, aunque el pH óptimo para su crecimiento es de 7; puede crecer en un amplio rango que va de 5-9 (Kelly *et al.*, 2000).

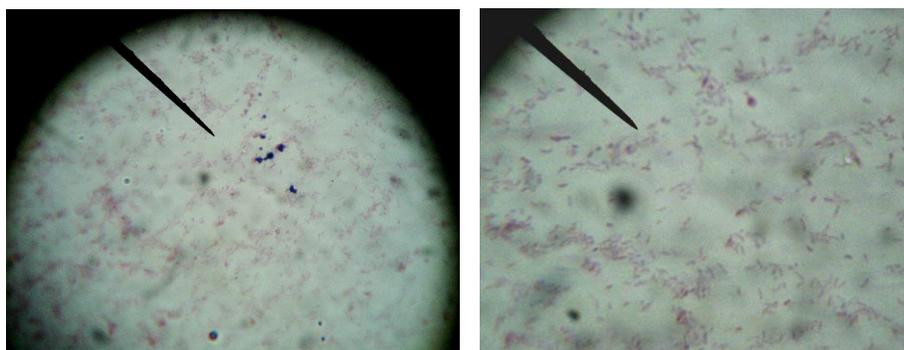


Figura 5. Tinción de Gram del cultivo de *Starkeya novella* (200X y 300X).

Además de estos dos ejemplos específicos de especies bacterianas, también se han empleado cultivos mixtos de bacterias incoloras del azufre correspondientes a los géneros *Beggiatoa*, *Sulfobacillus* y *Thiothrix*, además de otras bacterias capaces de crecer sobre compuestos reducidos de azufre como *Paracoccus* y bacterias fotosintéticas como *Chlorobium thiosulfatophilum*, que son capaces de oxidar el sulfuro de hidrógeno en el flujo de gas a azufre elemental. Sin embargo, todas ellas presentan como desventaja que, al ser bacterias autotróficas y presentar un crecimiento más lento que el de las heterótrofas, su manipulación es más difícil. Por lo tanto también se ha buscado la aplicación de microorganismos heterótrofos y se ha establecido que las bacterias *Xanthomonas* sp. pueden ser utilizadas como degradadoras de H_2S . También se han encontrado bacterias del género *Bacillus* anaerobias facultativas y heterótrofas que oxidan sulfuro (*Bacillus mojavensis*) (Cho *et al.*, 1992; Gabriel *et al.*, 2003).

Biofiltros

El sistema de la biofiltración ha sido efectivo para el tratamiento de efluentes o emisiones gaseosas y emplea microorganismos que degradan sustancias contaminantes, normalmente mediante procesos oxidativos. Para ello, en la biofiltración se emplean bioreactores (biofiltros), de amplio uso para degradar contaminantes orgánicos como inorgánicos de una corriente gaseosa. En los biofiltros, el gas contaminado pasa por un reactor empacado de material húmedo en donde se ha desarrollado una película de microorganismos sobre la superficie y los macroporos del soporte. El contaminante es transferido desde el gas a esta biopelícula húmeda en donde, por degradación biológica, es transformado eventualmente a compuestos inocuos como CO_2 y/o H_2O , siendo estos compuestos arrastrados a la salida. Para ello pueden ocurrir dos procesos diferentes, ya sea que el contaminante en el flujo del biogás se pase a un estado líquido y de esta manera se quede asociado al biofilm, o por otro lado, puede ser directamente que el gas contaminante pase a través del biofilm y allí sea degradado. Específicamente en el caso de biogás, se reportan numerosos trabajos de desulfuración biológica con microorganismos fototróficos, heterotróficos y autotróficos, en los cuales incluso se utilizan biofiltros con cultivos puros y mixtos inmovilizados de estos microorganismos (Pérez *et al.*, s.f.; Revah *et al.*, 2004).

Los materiales de empaque pueden ser diferentes tipos de compost; desechos de madera, turba, bagazo de caña, cáscaras de maní, que presenten minerales en cantidad suficiente para sostener una población. Sin embargo, se han estudiado soportes inertes, en donde los nutrientes tienen que ser adicionados externamente, ya que la adición controlada de nutrientes y agua tiene un efecto estimulante (Revah *et al.*, 2004).

El empleo de biofiltros presenta varias ventajas sobre otras tecnologías de oxidación, tales como la carencia de contaminantes secundarios, costos de operación generalmente bajos, altas eficiencias de degradación, biomasa inmovilizada de vida larga y seguridad intrínseca del sistema. Sin embargo, a diferencia de las técnicas químicas o físicas, este tratamiento

biológico requiere de mayores tiempos de contacto del gas con el biofiltro. Por ejemplo, en el caso del uso de biofiltros para remover H₂S, estos tiempos pueden rondar los 10 y hasta los 30 segundos. Esto hace que la técnica de los biofiltros sea poco práctica cuando se producen flujos muy altos de biogás (Pérez *et al.*, s.f.; Gabriel *et al.*, 2003).

Aireación como método de biodesulfuración

El método más sencillo de desulfuración biológica consiste simplemente en adicionar oxígeno o aire directamente en el biodigestor o en el tanque de almacenamiento del biogás, lo que promueve el crecimiento de bacterias sulforeductoras presentes en la materia orgánica con la que se carga el biodigestor, de forma que se logra la degradación del H₂S por medio de esas bacterias (Fernández *et al.*, s.f.).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de purificación de metano a escala en el ITCR con el fin de eliminar los principales contaminantes no combustibles, CO₂ y H₂S, presentes en el metano producido en un biodigestor.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un sistema de remoción biológica del H₂S mediante la acción de bacterias biodesulfuradoras.

- Construir una columna de absorción química para la remoción del CO₂ presente en el biogás.

- Analizar la composición del biogás en las diferentes etapas del sistema para determinar su eficiencia como un método de purificación de metano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del trabajo de investigación

La presente investigación se llevó a cabo en la sede central del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). El ITCR se encuentra ubicado en la ciudad de Cartago, en la región del Valle Central.

El sistema de purificación fue diseñado para su posible uso en los seis biodigestores a escala experimental localizados en las instalaciones de las lagunas de tratamiento de esta institución. Estos biodigestores experimentales simulan el modelo Taiwán, ya que fueron elaborados con una doble bolsa de polietileno situada en una cama de concreto que presentó dimensiones de 70 cm de largo, 37 cm de ancho y 40cm de alto; como se ilustra en la figura 6. Además, tienen una capacidad de aproximadamente 80 litros para la fase líquida y 20 litros para la fase gaseosa y un tiempo de retención de 5 semanas.

Se eligió el biodigestor experimental que presentaba mayor producción de biogás para evaluar la columna de absorción del sistema de purificación, y éste se alimentó de forma discontinua o batch, cada 3 días, con una mezcla de 7,5 litros de aguas residuales ordinarias domésticas y 400 gramos de lirios triturados. Para lo cual, se aprovecharon las aguas residuales ordinarias del ITCR que son recibidas en la planta de tratamiento de la institución así como los lirios acuáticos que cubren las lagunas de oxidación.



Figura 6. Biodigestores a escala del ITCR.

Por otro lado, para realizar la parte del proyecto correspondiente al proceso de desulfuración biológica se utilizó el Laboratorio de Biología, de la Escuela de Biología, y del Laboratorio de Biología Molecular del CIB, dentro del ITCR, con el fin de realizar el cultivo y crecimiento de las bacterias desulfurantes, así como su tinción, observación en microscopio y conteo.

Para evaluar el sistema de desulfuración, se debió tomar una muestra de biogás producido en un biodigestor de una finca productora de leche, Finca La Floresta, ubicada en Cascajal de Coronado. El biodigestor era de tipo Taiwán, construido con geomembrana de PVC de 15 metros de largo (figura 7). Se alimentaba diariamente con el estiércol del ganado de la finca y presentaba un tiempo de retención de 40 días.



Figura 7. Biodigestor tipo Taiwán de la finca La Floresta.

Para tomar las muestras de biogás se utilizó una doble bolsa de polietileno calibre 8 con aproximadamente 30 litros de capacidad, a la que se le adaptó una llave de paso de PVC de 12mm y se selló a calor (figura 8). La bolsa se adaptó a la tubería que transporta el biogás del biodigestor, y se llenó hasta alcanzar toda su capacidad.



Figura 8. Bolsas utilizadas para tomar las muestras de biogás.

Esta investigación se realizó entre los meses de agosto del 2009 a febrero del 2010.

Composición del biogás sin purificar

Se realizó un análisis de la composición inicial del biogás producido por el biodigestor experimental, para conocer el porcentaje de CH_4 y H_2S presentes en éste. Igualmente, se requirió un análisis de composición inicial al biogás obtenido del biodigestor de la finca La Floresta.

Tanto el porcentaje de CH_4 como el de H_2S se determinaron por medio de dos analizadores de gases con detector infrarrojo. El analizador de biogás Crowcon®, modelo Triple Plus IR, que se observa en la figura 9, fue utilizado para medir el CH_4 . Este dispositivo presenta un ámbito de medición de CH_4 de 0-100% (v/v), y también permitió determinar la cantidad de oxígeno, ya que lo detecta en un rango entre 0-25%.



Figura 9. Analizador Triple Plus IR utilizado para determinar el porcentaje de metano del biogás.

Por otro lado, el analizador de campo Tempest 100 marca Telegan, que determina hasta 200 ppm de H_2S , se empleó para la medición de la concentración de H_2S del biogás del biodigestor experimental (Figura 10).



Figura 10. Detección de la concentración de H_2S por medio del analizador Tempest 100.

Igualmente, para determinar la concentración de H_2S de la muestra de biogás obtenida de la finca La Floresta, se requirió realizar una prueba analítica, consistente en el método 11 de la USEPA (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos), el cual es empleado para monitorear las emisiones de H_2S de fuentes gaseosas. Como se muestra en la figura 11, para

ello se extrajo una muestra y se hizo pasar por una serie de tres de burbujeadores con sulfato de cadmio donde el H_2S se absorbe, formando sulfuro de cadmio. Este compuesto posteriormente se cuantificó iodometricamente por medio de una titulación, determinando así la concentración del H_2S (USEPA, s.f.).



Figura 11. Determinación analítica de la concentración de H_2S en el biogás por el método USEPA 11.

a) Los burbujeadores se llenaron con una solución de sulfato de cadmio. **b)** La bolsa con la muestra de biogás se conectó a la serie de burbujeadores. **c)** Luego de pasar el biogás por los burbujeadores, el H_2S quedó atrapado en ellos, ya que se absorbe en el sulfato de cadmio, formando sulfuro de cadmio. **d)** Se agregó una solución de yodo acidificado al sulfuro de cadmio formado, el cual absorbe el H_2S . **e)** Finalmente se realizó una titulación con tiosulfato de sodio hasta que la muestra se tornó incolora. (USEPA, s.f.)

Para realizar los análisis, se extrajo una muestra aproximada de 5 litros de biogás de los respectivos biodigestores. La muestra se hizo pasar por medio de una sonda a los detectores o en el caso del método para determinar H_2S , se burbujeó en una solución de sulfato de cadmio. Todos análisis fueron llevados a cabo por el Laboratorio GAIA (incrito en el Colegio de

Químicos y con permiso de funcionamiento ARSA-1-0017-2006 del Ministerio de Salud), localizado en Alajuela.

Implementación del sistema de desulfuración biológica

Para llevar a cabo el proceso de desulfuración biológica, se construyó un tanque utilizando un tubo de PVC de 75 mm de diámetro y 25 cm de largo. Con el tubo colocado horizontalmente, se realizó una abertura de 76 mm de diámetro en la parte superior del tubo, en el que se insertó un adaptador macho de PVC mismo diámetro del agujero realizado. Para asegurar que el tanque se mantuviera cerrado durante el proceso de biodesulfuración, se utilizó una tapa de rosca de PVC de 76 mm para que se enroscara en el adaptador.

En ambos extremos del tubo, también se colocaron tapas lisas de PVC. En una de ellas realizaron dos orificios, uno en la parte superior de la tapa presentando un diámetro de 12 mm y otro en la parte inferior con un diámetro aproximado de 3 mm, necesarios para la instalación de tuberías por las cuales se alimentó el biogás y el aire respectivamente al tanque. En el primer orificio se colocó un tubo de PVC de 12 mm de diámetro unido a una llave de paso que permitió la unión entre la bolsa de almacenamiento del biogás sin tratar y el tanque ya descrito. En el otro agujero, se introdujo una manguera transparente conectada así mismo a un motor de pecera de 100 voltios, marca ELITE 799.

Igualmente en el otro lateral del tanque se realizaron otros dos orificios de 12 mm de diámetro. Uno en la parte superior de la tapa, para la salida del biogás ya tratado a una bolsa de polietileno calibre 8 de aproximadamente 10 litros de capacidad, así como otro en la parte inferior donde se instaló una tubería ajustada a una llave de paso, para permitir la salida de la carga líquida que se inoculó en el tanque.

Tratamiento del sistema de desulfuración biológica:

Al tanque limpio, se adicionaron 125 ml de un cultivo de *Starkeya novella* (DSM 506) y otros 125 ml de un cultivo líquido *Acidithiobacillus thiooxidans* (DSM 504), con tres días de crecimiento (figura 12).



Figura 12. Inoculación de los cultivos de *S.novella* y *A. thiooxidans* en el tanque de desulfuración biológica.

Ambas cepas fueron adquiridas de la colección DSMZ. Estas cepas son conocidas por ser bacterias con capacidad desulfurante y antes de su uso en el tanque para desulfuración, se mantuvieron en cultivo líquido fresco que consistió para *S.novella* en caldo nutritivo y en el caso de *A. thiooxidans* en un medio ácido y enriquecido con azufre elemental como sustrato, específico para *Acidithiobacillus* spp. (Composición en g/L: 3.5g K_2HPO_4 ; 0.3g $(NH_4)_2SO_4$; 0.5g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$; 0.018g $FeSO_4 \cdot H_2O$; 0.25 $CaCl_2$; 5g S elemental; pH 4,5).

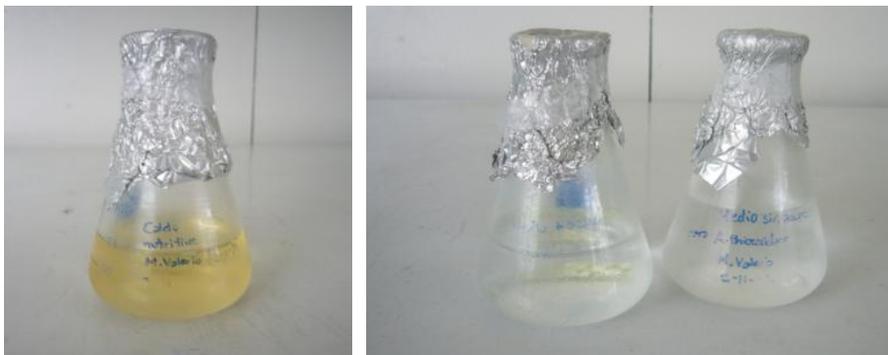


Figura 13. Medios de cultivo utilizados para el crecimiento de *S. novella* y *A. thiooxidans*.

Ambas cepas se mantuvieron entre 25 a 30°C en tubos de ensayo con 5 ml de medio y se subcultivaron pasando 100 µl de *S. novella* y de *A. thiooxidans*, respectivamente, cada 4 días. Tres días antes de su inoculación en el tanque, ambas bacterias se subcultivaron en erlenmeyers de 250 ml de capacidad con 125 ml de sus respectivos medios de cultivos.



Figura 14. Cultivo de bacterias *S. novella* y *A. thiooxidans* en tubos de ensayo.

Igualmente, previo a la inoculación en el tanque, se realizaron varios conteos directos al microscopio de las bacterias a los 3 días de cultivo usando una cámara de Neubauer, para conocer la concentración aproximada de células bacterianas que se agregaron al tanque; estableciendo un promedio, con el que se determinó que se adicionaron aproximadamente $7,0 \times 10^7$ bacterias/ ml de *S. novella* y cerca de $1,0 \times 10^7$ células/ ml de *A. thiooxidans*.

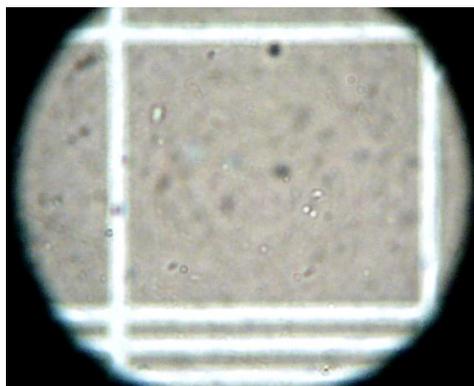


Figura 15. Vista de un cuadrante durante el recuento directo de *S. novella* a los tres días de crecimiento.

Funcionamiento del sistema de desulfuración biológica:

Para poder evaluar el tratamiento del proceso de desulfuración, se tomó la bolsa con la muestra de biogás de la finca y se conectó a una bolsa de aproximadamente 1 litro de capacidad, colocada justo antes del tanque de desulfuración. Esto permitiría asegurar el ingreso de 1 litro de biogás al tanque ya inoculado el tratamiento descrito anteriormente. Se procedió a presionar la bolsa de almacenamiento de forma tal que se lograra llenar la segunda bolsa. Finalmente se abrió la llave de paso al tanque de desulfuración y se presionó todo el contenido de esa segunda bolsa dentro del tanque. Nuevamente las llaves de paso se cerraron para asegurar la permanencia del biogás por una hora dentro del tanque. Transcurrido ese tiempo, se volvió a repetir este procedimiento para lograr el funcionamiento del sistema.

Evaluación de la eficiencia de la desulfuración biológica

Una vez transcurridas cinco horas de funcionamiento del tanque, se procedió a tomar una muestra de biogás de la bolsa a la salida del tanque, para realizar el respectivo análisis de CH_4 por medio del uso del analizador de gases y el método USEPA M11 para conocer la concentración de H_2S del tratamiento empleado. De esta forma se determinó si la cantidad de H_2S fue menor luego de la biodesulfuración realizada; estimando así la eficiencia del proceso como método de purificación del biogás.

Diseño de la columna de absorción para el biodigestor

Para llevar a cabo la absorción química del CO_2 presente en el biogás, se utilizó una columna de vidrio pequeña; de 25 cm de alto y 3,5 cm de ancho. Se llenó hasta aproximadamente un 65% de su capacidad con anillos Rasching de porcelana, de forma semi-circular, con dimensiones de aproximadamente 0,7 cm de largo, que se muestran en la figura 16.



Figura 16. Material de empaque utilizado para el relleno de la columna de absorción

En los extremos de la columna se adaptaron tapones de hule sellados, que presentaban dos orificios cada uno, en los que se insertaron tubos de vidrio de aproximadamente 0,4 cm de diámetro. A estos tubos se adaptaron mangueras transparentes flexibles; que en el extremo superior consistían en la salida del biogás ya tratado y la otra en la entrada de la solución absorbente. Al tubo de vidrio utilizado para la entrada del absorbente, se le colocó un trozo de manguera agujereada con una función de dispersor en el extremo que se encontraba dentro de la columna. Por otro lado, en el tapón colocado en el extremo inferior, una de las mangueras correspondía a la entrada del biogás del biodigestor a la columna y la otra permitió la salida de la solución de la columna a un contenedor de plástico donde se almacenó la solución para ser recirculada nuevamente por la columna.

El flujo ascendente del absorbente hacia la parte superior de la torre se logró por medio del uso de una bomba de agua para pecera marca LifeTech, modelo AP 1200. El absorbente que se preparó consistió en un litro de una solución acuosa de 2,5M de NaOH con un pH de 10,54. La columna se puso en funcionamiento por medio de la aspersion continua del absorbente desde arriba de la columna, mientras que el biogás fluía en dirección contraria, hacia una bolsa de polietileno calibre 8 de aproximadamente 10 litros de capacidad, para su almacenamiento.

Evaluación de la eficiencia de la columna de absorción para la purificación del biogás

Una vez instalada la columna de absorción y después de su funcionamiento por cinco días, se realizó el muestreo del biogás que se almacenó en la bolsa a la salida de la columna y se realizó un análisis con los analizadores de gases para CH₄ y H₂S. De esta manera, por medio de las diferencias obtenidas entre ambas mediciones, se estimó la pureza del biogás y la eficiencia de la columna como método de purificación del biogás.

RESULTADOS

Diseño del sistema de purificación del biogás

El sistema de purificación diseñado comprende, como se indicó anteriormente, dos procesos; uno para la remoción del H_2S y otro para eliminar el CO_2 y trazas restantes del H_2S . Por lo tanto el diseño propuesto para ser adaptado a un biodigestor a escala consiste en un tanque hermético para realizar el proceso de desulfuración biológica por aireación, junto con una columna para la absorción química del CO_2 , como se presenta en el siguiente esquema simplificado.

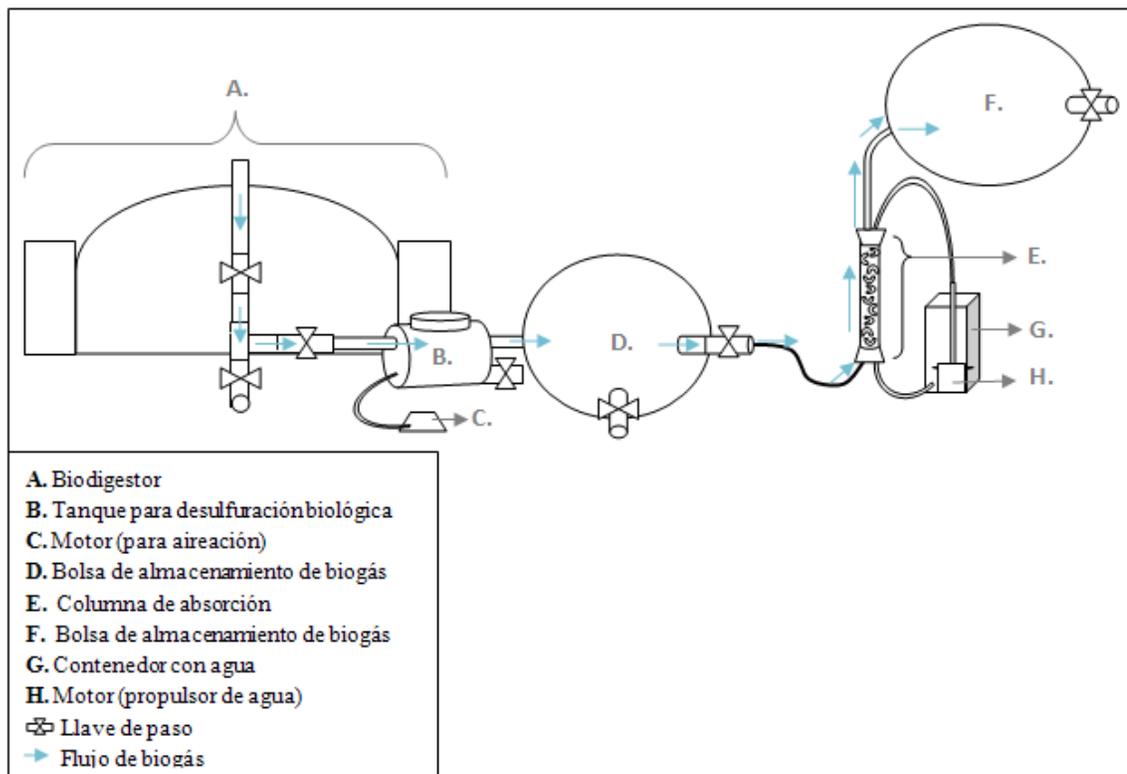


Figura 17. Esquema del sistema propuesto para la purificación del biogás de un biodigestor a escala.

De esta manera lo que se propone es adaptar, directamente después del biodigestor, un tanque para la desulfuración biológica. Éste se emplea agregando aire al tanque, el cual contiene una fase líquida en la que se presentan bacterias capaces de oxidar el sulfuro, por el cual el biogás pasa para lograr la absorción del H₂S por parte de los microorganismos desulfurantes. Luego de este proceso el biogás se almacena en una bolsa de 10 litros de capacidad que permita monitorear la calidad del biogás luego de este primer paso de purificación. Posteriormente, se dispone de una columna de absorción junto con el contenedor con una solución de NaOH al 10% que permite la recirculación continua de este absorbente del CO₂. Luego de atravesar la columna de absorción, el biogás purificado es almacenado en otra bolsa, en donde se mantendría hasta su uso.

Composición inicial del biogás sin purificar

La comparación entre la composición inicial de las diferentes muestras de biogás utilizadas para evaluar el sistema de purificación de metano se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Composición inicial de las muestras de biogás, una del biodigestor a escala del ITCR, Cartago y de la finca La Floresta, en Coronado.

Biodigestores muestreados	Componentes del biogás				
	CH ₄ (% v/v)	O ₂ (% v/v)	≈CO ₂ (% v/v)	H ₂ S (mg/m ³)	≈ (ppm)
ITCR	82 ± 2	< 0,2	18,1 ± 0,2	< 3	< 2
La Floresta (22-2-10)	34 ± 2	4,9	61,1	470 ± 10	337

Como se indicó en el punto anterior, el sistema de purificación propuesto se pretendía adaptar a uno de los biodigestores experimentales del ITCR. De ahí que, el 13 de enero del 2010 se realizó un análisis de la composición del biogás del biodigestor a escala seleccionado y, como se muestra en el cuadro 3, la composición de éste fue de 82% CH₄ y menos de 3mg/m³ o 2 ppm de H₂S (Anexo 1).

Debido a la baja cantidad de H_2S presente en el biogás del biodigestor experimental, no se pudo evaluar el proceso de desulfuración biológica utilizando este biogás. Aunque se estableció que se podía evaluar la eficiencia de la columna de absorción utilizando este biodigestor, se decidió tomar una muestra de biogás de un biodigestor con otro tipo de alimentación para determinar la eficiencia del tanque y del tratamiento de desulfuración.

Con el análisis realizado el 22 de febrero a la muestra de biogás extraída del biodigestor de la lechería La Floresta el 17 de febrero, se determinó que éste presentaba una composición inicial muy distinta a la que se obtuvo del biodigestor experimental del ITCR. El biogás presenta menos de la mitad del CH_4 que se presentó en el biodigestor a escala, con tan sólo un 34%, pero una concentración elevada de H_2S , que alcanza los 337 ppm (Anexo 2).

Proceso de biodesulfuración biológica del biogás por aireación

Siendo la adición de aire una de las formas más sencillas para lograr la biodesulfuración biológica del biogás, se construyó un sistema consistente en un tanque colocado horizontalmente, que permite colocar dentro de él y mantener de forma hermética, una fase líquida que pueda ser aireada para lograr la proliferación de bacterias desulfurantes, de forma que al pasar el biogás por el tanque se logre la eliminación del H_2S . La propuesta elaborada para este fin, se observa en las figuras 18 y 19, donde se muestra el tanque con un volumen de 1 litro que se construyó y un esquema simplificado detallando su estructura.



Figura 18. Tanque utilizado para la remoción biológica del H_2S de una muestra de biogás.

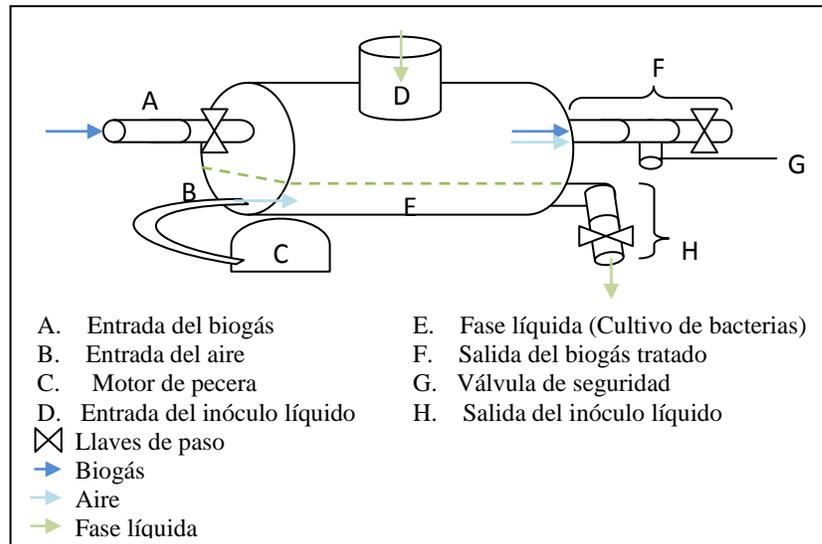


Figura 19. Esquema del tanque de desulfuración biológica.

En la figura 20 se muestra cómo se instaló la bolsa con la muestra de biogás tomada del biodigestor de la finca La Floresta al tanque para la desulfuración biológica. Igualmente, en la figura 20 se observa que el motor de pecera se conectó a un temporizador, el cual estaba programado para encenderse durante 15 segundos cada 30 minutos, de forma que introdujera aproximadamente 50 ml de aire por hora. Transcurrida la hora, las llaves de paso localizadas

antes y después del tanque de desulfuración se abrieron para dejar que el biogás tratado saliera y se almacenara en la bolsa destinada a este fin, y que una cantidad aproximada a 1 litro de biogás “crudo” entrara al tanque.



Figura 20. Sistema de desulfuración biológica adaptado para el tratamiento de una muestra de biogás tomada del biodigestor de la finca La Floresta.

De esta forma, el cuadro 4 presenta algunas características del tanque y su funcionamiento que se pueden considerar factores indispensables para lograr la desulfuración biológica.

Cuadro 4. Características de funcionamiento del tanque de desulfuración biológica

	Capacidad del tanque (ml)	Flujo del biogás (ml/h)	Tiempo de retención (horas)	Flujo del aire (ml/h)	Volumen de la fase líquida (ml)
Proceso de desulfuración	1000	1000	1	50	250

Con un tanque con un volumen de 1 litro y un flujo de biogás de 1 litro por hora, se aseguró un tiempo de retención de 1 hora del biogás dentro del tanque. Durante este tiempo de retención, se permitió el contacto del biogás con los 250 ml de fase líquida. Igualmente el motor de pecera aseguró el suministro de 50 ml de aire por hora, necesario para lograr la desulfuración biológica por aireación.

Eficiencia del proceso de desulfuración biológica del biogás

Una vez construido el tanque de biodesulfuración, con los parámetros establecidos en el diseño para asegurar su funcionamiento, se procedió a llevar a cabo el tratamiento establecido. Los resultados de los análisis al biogás, tanto de la composición de éste antes de realizar el proceso de desulfuración con las bacterias como los realizados a la bolsa de almacenamiento del biogás a la salida del tanque de desulfuración biológica se presentan en el cuadro 5. Considerando que con el tratamiento de desulfuración biológica se esperaba una disminución en la cantidad del H₂S del biogás, en este cuadro también se evidencian los cambios en la composición de este compuesto; determinando la eficiencia de este proceso para alcanzar la purificación del biogás.

Cuadro 5. Comparación de la composición de la muestra de biogás de la finca La Floresta luego del tratamiento de biodesulfuración

Componentes del biogás	Composición		Remoción	Eficiencia (%)
	Inicial	Tras desulfuración biológica		
CH ₄ (%)	34 ± 2	22 ± 2	-	-
H ₂ S (mg/m ³)	470 ± 10	206 ± 4	264	56
H ₂ S (ppm)	337	148	189	

Columna de absorción química para remoción del CO₂ con NaOH

La absorción química para la eliminación del CO₂ y la obtención de CH₄ más puro es el otro proceso que compone el sistema de purificación de biogás propuesto en este trabajo. Para ello, se construyó la columna de absorción que se presenta en la figura 21, la cual se adaptó

directamente al biodigestor experimental ubicado en el ITCR, para determinar si se podría obtener una disminución en la cantidad de CO_2 del biogás producido en él.

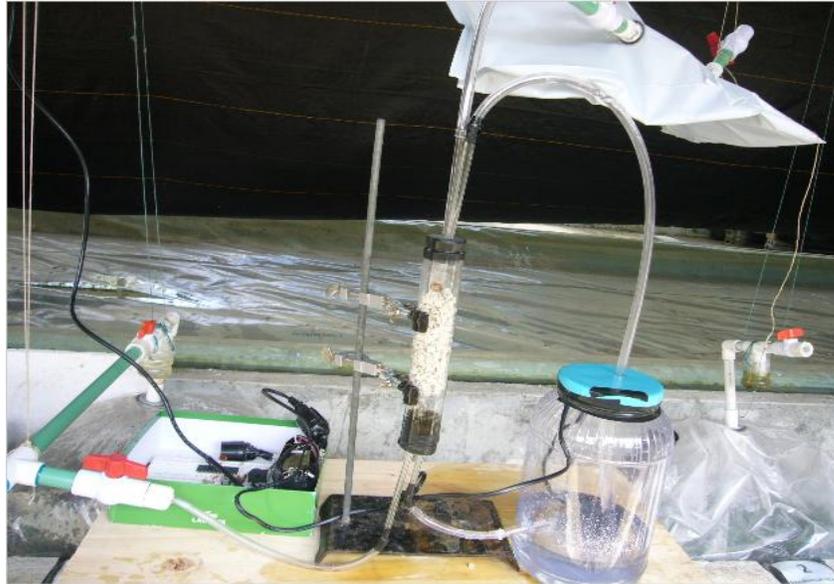


Figura 21. Columna de absorción química del CO_2 presente en el biogás, adaptada a un biodigestor experimental del ITCR.

Como se detalla en el esquema de la figura 22, la columna de absorción química diseñada tiene la característica de ser a contracorriente, por presentar un flujo contrario del biogás y el absorbente. Igualmente, se diseñó para que fuese una columna empacada, a la que se le adaptó un contenedor con el absorbente, de forma que también se lograra la recirculación de éste.

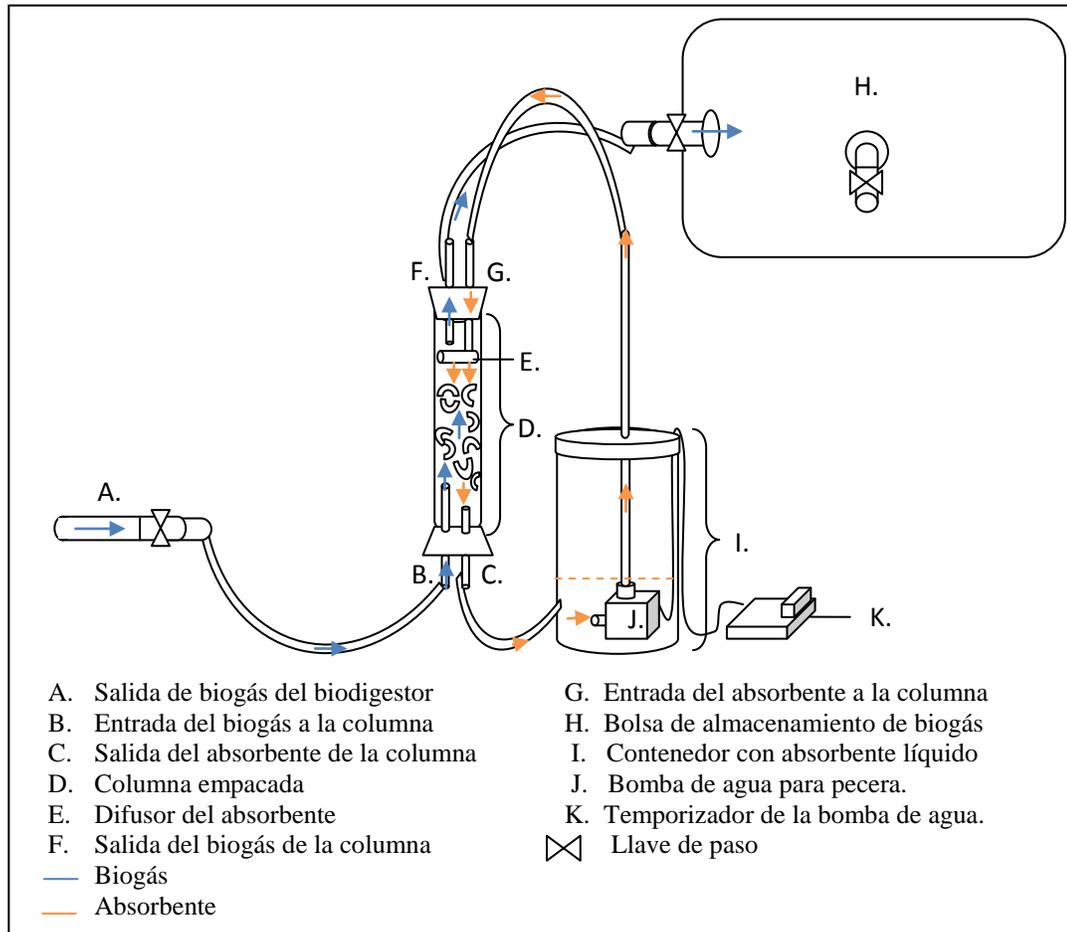


Figura 22. Esquema simplificado de los componentes de la columna de absorción y su funcionamiento

Otros aspectos que se deben señalar sobre el funcionamiento de la columna de absorción son el flujo de biogás y el flujo del absorbente con el que se trabajó.

En el caso del flujo de biogás, éste se determinó con base en su producción, la cual se midió en 300ml/hora; permitiendo que, con el biodigestor lleno, se tenga este mismo caudal de biogás. Por otro lado, como se ilustra en la figura 22, el absorbente se logró transportar a la parte superior de la columna por medio de una bomba de agua conectada a un temporizador. El temporizador permitió que la bomba se activara en lapsos de 2 segundos, para así generar un flujo del absorbente a la columna que se estableció en 22ml/min.

Eficiencia de la columna de absorción para la purificación del metano

Luego del funcionamiento de la columna de absorción por 5 días, el 22 de febrero se analizó la composición del biogás de la bolsa de almacenamiento colocada al final del sistema. Los resultados de los análisis realizados se presentan en el cuadro 6, en donde se comparan con los resultados obtenidos de la composición inicial del biogás del biodigestor experimental, en el cual se adaptó la columna de absorción.

Cuadro 6. Evaluación del efecto de la absorción química con NaOH, como proceso de purificación del CH₄, en la composición del biogás.

Componentes del biogás	Composición		Purificación del metano (%)	Eficiencia (%)
	Inicial	Tras absorción química		
CH ₄ (%)	82 ± 2	39 ± 2	0	0
O ₂ (%)	< 0,2	6,7	-	-
H ₂ S (ppm)	< 2	< 2	-	-

Como se observa en el cuadro anterior, la comparación de la composición del biogás inicial con el biogás a la salida de la columna de absorción no demuestran que se haya logrado el aumento en la concentración del CH₄ a causa de la eliminación del CO₂ por medio de la columna y con NaOH como absorbente, más bien ésta disminuyó considerablemente luego de aplicar el proceso.

DISCUSIÓN

Sistema de purificación del metano

Para cumplir con el objetivo principal de este proyecto, consistente en el diseño de un sistema para la purificación del biogás, se propuso un método que lograra la eliminación de los contaminantes más comunes y problemáticos que se producen junto con el CH₄ en el proceso de digestión anaerobia. Por ello se optó por establecer un sistema en el que se fusionara una técnica específica para la eliminación del H₂S y otra para remover el CO₂. De esta manera se eligió diseñar un sistema lineal por el cual se lograra pasar el flujo del biogás sin tratar desde el biodigestor a un proceso de desulfuración biológica y luego a una columna que permitiera el proceso de absorción.

A pesar de la gran cantidad de técnicas disponibles para la eliminación CO₂ y el H₂S, al realizar un balance de las ventajas y limitaciones, se establece que hay sólo unos pocos procesos que se pueden considerar como tecnologías prácticas, económicas y fáciles de adaptar a las condiciones de los biodigestores instalados en el país; dentro de los cuales se puede nombrar a estos dos procesos.

Aunque el sistema diseñado se elaboró a pequeña escala y se le realizaron ciertas adaptaciones debido a su carácter experimental y a la poca cantidad de biogás con la que se trabajó, se evidencia como su construcción se puede realizar con los mismos materiales con que se construye el biodigestor; básicamente utilizando polietileno y materiales de PVC. Igualmente, el funcionamiento de los dos procesos se puede lograr por medio de bombas de agua y aire, elegidas de acuerdo al tamaño del biodigestor y la producción del biogás que este genere.

Además, se consideró que los métodos seleccionados fueron los más aptos para la elaboración de un sistema que permitiera la remoción de estos principales contaminantes del CH₄ producido por biodigestión porque son métodos que generan muy poca o ninguna

contaminación, lo que va de la mano del uso de una fuente de energía sostenible, como lo es el biogás.

Igualmente, se deben considerar las experiencias que ya se han tenido en cuanto a procesos de purificación de biogás. Por ejemplo, dentro de proyectos altamente exitosos en el uso del biogás, como es el caso del proyecto de la ciudad de Lille, que se mencionó anteriormente, se aplican técnicas biológicas junto con los principios de absorción para el proceso de mejoramiento del biogás, como se presenta en el esquema del Anexo 3. En este proyecto, se utilizan columnas de lavado (absorción física) así como biofiltros para la eliminación de los contaminantes del biogás (Plombin, 2003).

Considerando estas ventajas, se decidió que eran los métodos con más potencial y por ello fueron los que se eligieron para construirlos, ponerlos a funcionar y evaluarlos a escala experimental.

Composición inicial del biogás utilizado para evaluar el sistema de purificación

Según la propuesta de diseño del sistema de purificación, éste se pretendía poner a funcionar en uno de los biodigestores experimentales, para probar si su eficiencia en la obtención de metano de alta pureza era lo suficientemente aceptable como para adaptarlo posteriormente al biodigestor a gran escala del ITCR para la obtención de metano para su compresión, envasado y uso como combustible vehicular.

Según se establece, las especificaciones sobre la calidad del CH₄ utilizado como combustible son las más estrictas. Para poder cumplir con ellas, se requiere un mínimo del 96% de CH₄ y el contenido de H₂S no debe exceder los 100 mg/Nm³, que corresponde a aproximadamente 66 ppm (Plombin, 2003). Por lo cual, se pueden determinar estas especificaciones como los parámetros a los que se quiere llegar utilizando el sistema de purificación propuesto.

Teniendo estos parámetros en cuenta, se procedió a realizar un análisis de su composición al biogás proveniente del biodigestor a escala. De esta manera se determinó que el biogás producido contaba ya con un porcentaje de CH_4 bastante alto, de un 82%, pero que no alcanzaba el parámetro establecido de pureza necesaria. Por lo cual, iba a ser necesaria la eliminación de al menos un 14% de CO_2 del biogás por medio del uso de la columna de absorción. Considerando los resultados del análisis que se muestran en el cuadro 1 y en el anexo 1, esto implicaría reducir la cantidad de CO_2 presente en el biogás (18%) en más de un 77%. Sin embargo, como se mostró en el cuadro 3, el biogás proveniente del biodigestor a escala presentaba cantidades mínimas de H_2S , menos de 2 ppm, muy por debajo del rango establecido para un biogás de alta pureza. Vale la pena resaltar que, según estos resultados obtenidos, el biogás producido en el biodigestor experimental cuenta con una composición que puede considerarse ideal, ya que según lo que se cita en la literatura, la composición del biogás se reporta entre un 50-80% de CH_4 y un 15-45% de CO_2 ; además de que el rango promedio del H_2S en un biogás sin purificar se encuentra entre 0-10 000 ppm, cuando con este biodigestor sólo se presenta 2 ppm. En este caso, se cuenta con valores máximos de CH_4 y porcentajes mínimos de CO_2 y H_2S ; lo que ya determina que es un biogás de buena calidad y pureza (Persson *et al.*, 2006).

Debido a que no iba a ser necesaria la eliminación del H_2S del biogás, no se requería instalar todo el sistema de purificación propuesto al biodigestor experimental. Además, con una concentración tan baja de H_2S inicial, era prácticamente imposible evaluar la eficiencia del proceso de biodesulfuración, ya que si se presentaba una disminución en ella no iba a ser cuantificable. Se decidió entonces evaluar los procesos para la eliminación de los dos contaminantes del biogás por separado, colocando únicamente la columna de absorción en el biodigestor experimental y buscando otra fuente de biogás, con una concentración de H_2S con la que se pudiera evaluar el tanque de desulfuración para la eliminación del H_2S .

Los otros biodigestores experimentales presentaban la misma alimentación que el biodigestor elegido. Por lo cual, considerando que ya el diseño establecido era para adaptarlo a pequeña

escala, se consideró que lo más propicio era tomar una muestra de biogás de un biodigestor que presentara una alimentación con materia orgánica diferente. Se optó por probar el uso de biogás de un biodigestor alimentado con excretas de ganado considerando la potencialidad que tendría el sistema de purificación en los biodigestores que hay en Costa Rica ya que, como se indicó anteriormente, en su mayoría son establecidos en fincas lecheras.

El biogás de la muestra tomada del biodigestor de la lechería La Floresta contenía un menor porcentaje de CH_4 , pero una concentración mucho mayor de H_2S que el biogás del biodigestor experimental. Esto se debió a que la materia prima con que se alimentaron los biodigestores es muy diferente. En el caso del biodigestor experimental, el lirio acuático es un residuo vegetal que se caracteriza por presentar una alta producción de gas, con un mayor contenido de CH_4 y de nutrientes que la boñiga digerida; de ahí que el porcentaje de CH_4 del biodigestor experimental superara en aproximadamente un 48% el que se presentó en el biogás obtenido de la finca (Nijaguna, 2002).

Por otro lado, en el biogás del biodigestor experimental la presencia de H_2S correspondía a simples trazas, mientras que el biodigestor de la finca presentaba niveles altos de este compuesto, 337 ppm. La diferencia en el contenido del H_2S en estas dos fuentes de biogás se debió a que el H_2S que se obtiene durante de biodigestión, se produce a causa de la degradación de aminoácidos como la metionina y la cisteína presentes en sustratos ricos en proteínas, como es el caso de las excretas animales y algunos desechos industriales; pero que no son el caso del lirio acuático que al ser de origen vegetal está compuesto principalmente por celulosa (Syed *et al.*, 2006; Higgins *et al.*, 2003).

Sin embargo, que el biogás de la finca presentara una composición muy pobre de CH_4 , de tan sólo un 34%, e incluso un contenido alto de oxígeno para ser un proceso anaerobio (4,9%), como se indicó en el cuadro 3, se pueden deber a factores relacionados al manejo que se le da al biodigestor en la finca. Según lo indicó Don Oscar Ramírez, propietario de la finca La Floresta, en la semana en la que se tomó la muestra de biogás se había realizado una

extracción del inóculo del biodigestor, el cual es utilizado como abono para el pastizal de la finca. El proceso de extracción del contenido líquido del biodigestor posiblemente creó una desestabilización del sistema cerrado que se maneja en un biodigestor, lo que pudo conllevar al ingreso de aire en éste. Además es posible que al reducir la materia orgánica dentro del biodigestor, se desequilibrara también el proceso de biodigestión por parte de los microorganismos, reduciendo así el porcentaje de CH₄ presente en la muestra que se obtuvo de la finca.

Igualmente, esta diferencia en la composición de las distintas fuentes de biogás posiblemente se debe a problemas que se presentaron con las bolsas que se elaboraron para el almacenamiento del biogás. Las bolsas de almacenamiento utilizadas fueron adaptadas, instalándoles una llave de paso y además sellándolas por calor; por lo que es posible que las modificaciones les generaran fugas. Esto, junto con la alta volatilidad del metano, pudo conllevar a la salida de una cantidad considerable del compuesto de interés que conforma el biogás.

Biodesulfuración por aireación con bacterias desulfurantes eficientes

El principio de la biodesulfuración biológica adicionando aire al biogás se fundamenta en el hecho de que al poner ambos gases en contacto y en presencia de un líquido residual (con el que se inocula al biodigestor), se va a lograr la colonización de especies sulfuroductoras aerobias, ya que son microorganismos omnipresentes. Incluso, este proceso se puede realizar aplicando aire directamente al biodigestor, haciendo que estas bacterias crezcan en la superficie del material que está siendo fermentado, permitiendo además que se produzcan los nutrientes y las condiciones microaerófilas necesarias para la producción de biogás (Fernández *et al.*, s.f).

Sin embargo, el proceso de desulfuración biológica implementado se basó en una propuesta tecnológica sugerida por Fernández *et al.*, en la que el proceso de desulfuración se realiza en

un compartimento aparte del biodigestor, de forma que la aireación no ocurre dentro de él. De ahí que el diseño elaborado y puesto a evaluar en este trabajo se asemeja al diseño establecido en el estudio mencionado anteriormente (Anexo 5).

En cuanto al tanque de desulfuración construido, se debieron contemplar los factores establecidos en el cuadro 4, los cuales podrían afectar el funcionamiento de éste y la eficiencia del tratamiento.

Por un lado, se establece que se requiere un período entre 20 y 60 minutos para asegurar que los microorganismos desulfurantes, que se encuentran en la superficie líquida, logren consumir el H₂S en altas proporciones. Para asegurar el tiempo de retención máximo, y considerando que el tiempo de retención (Tr) depende del volumen (V) y del caudal (Q), según la fórmula $Tr = \frac{V}{Q}$, se procedió a determinar el flujo de biogás y el volumen del tanque

biodesulfurador, que permitieran obtenerlo. Por ello, debido a que el biogás con el que se trabajó eran muestras extraídas de un biodigestor, que no permitían un flujo constante del biogás por sí solo, se decidió que se podría introducir de forma manual 1 litro/hora en el tanque. Éste último se construyó entonces con un volumen de aproximadamente 1 litro de capacidad, para lograr un tiempo de retención de 1 hora. De esta manera, se buscaba aumentar la eficiencia del tratamiento, ya que al poner a funcionar el tanque, se estaba trabajando con el mayor tiempo de contacto recomendado por Fernández *et al* (s.f.).

Igualmente otro factor importante en este proceso de desulfuración biológica es la aireación. Esta se debe realizar de forma que permita la sobrevivencia de los microorganismos aerobios encargados de la eliminación del H₂S pero a la vez considerando la seguridad en el funcionamiento del proceso. Esto último se debe a que el CH₄ es explosivo cuando entra en contacto con una cantidad de aire entre el 5 a 15% o superior a este rango; de ahí que el biogás con un contenido igual o mayor al 60% de CH₄ y el resto de su composición siendo principalmente CO₂, puede llegar a ser explosivo con cantidades de aire entre 6 y 12%. Por

ello, en muchos estudios se establece que el aire introducido no debe superar el 3 al 5% del biogás presente en el espacio en el que se encuentra almacenado ya que hay posibilidades de que el biogás reaccione con el oxígeno (Acosta, 2009; Persson *et al.*, 2006).

De esta manera se buscó una forma para lograr el funcionamiento seguro del tanque de biodesulfuración, sin posibilidades de una reacción indeseada, pero asegurando la máxima aireación posible, correspondiente al 5% del biogás que ingresaba al tanque. Para ello, se instaló una bomba de pecera con un adaptador en la manguera que permitiera regular el flujo de aire al mínimo posible. Igualmente, debido a que las bombas de pecera tienen un flujo constante de gas, se debió instalar un temporizador para que la bomba sólo funcionara por 15 segundos cada media hora, ingresando así aproximadamente 50ml/h de aire.

Finalmente, la desulfuración biológica no sólo depende del diseño y el funcionamiento del tanque; se debe considerar también la inoculación que se haga a éste y que asegure la presencia de microorganismos capaces de remover el H₂S. Se ha establecido que con la aireación de materia no es necesaria la inoculación de microorganismos, ya que se utilizan aquellos que se encuentran de forma natural en la materia orgánica. Sin embargo, la posibilidad de evaluar el aumento de la eficiencia de la biodesulfuración al introducir cultivos de bacterias que por su naturaleza tienen una capacidad desulfurante, es una variable que se consideró importante al buscar un sistema de purificación de biogás efectivo. A raíz de esto, se optó por poner a funcionar el tanque de biodesulfuración utilizando *A. thiooxidans* y *S. novella*, dos especies de microorganismos que se caracterizan por ser oxidadores del azufre y que han sido utilizados anteriormente en procesos de remoción de H₂S de fuentes gaseosas.

Además ambos presentan características favorables que permiten su cultivo y mantenimiento en laboratorio, ya que ambos se clasifican como organismos de riesgo 1 que pueden crecer en un rango muy amplio de temperatura y pH; además de ser microorganismos aerobios cuyos medios de cultivo son relativamente accesibles y fáciles de preparar. Incluso, ambos tienen características autotróficas, por lo que también pueden llegar a generar una mayor purificación

del biogás al tomar el CO₂ del biogás para cubrir sus necesidades de carbono. En el caso de *S. novella* se debe considerar que empresas dedicadas al tratamiento biológico de desechos industriales, como es el caso de Alken-Murray Corporation, hacen uso de esta bacteria en productos como ALKEN ENZ-ODOR® 8, con el fin de eliminar los malos olores que se producen a causa de la presencia de H₂S en emisiones industriales. Por otro lado, con *A. thiooxidans*, se tienen múltiples estudios sobre su actividad, debido a su potencial importancia a nivel industrial al ser una especie sulfuroreductora capaz de remover H₂S en fuentes tanto altamente ácidas como neutras y además porque se ha demostrado que puede realizar lixiviación microbiana de metales (Kelly y Wood, 2000; Kelly *et al.*, 2000; Alken Murray Corp., 2006; Lee *et al.*, 2006).

Eficiencia del proceso de desulfuración biológica del biogás

Se han realizado trabajos de investigación donde se ha aplicado efectivamente el procedimiento de desulfuración biológica por aireación y se logra la purificación biológica del biogás. Incluso sin la adaptación de un tanque de biodesulfuración aparte, simplemente aireando directamente el biodigestor y con las condiciones ideales de temperatura, tiempo de retención y la cantidad de aire adicionado, la concentración de H₂S puede reducirse a menos de 50ppm. Incluso en un biodigestor con un gasómetro, con las condiciones ideales de temperatura, si se asegura que el gasómetro se mantiene a una presión de trabajo igual a la del digestor, y que el pH se encuentre entre 6 y 8,5, se puede lograr una disminución del H₂S en un 98% o más (Wellinger y Lindberg, 2000; Fernández *et al.*, s.f.).

Por otro lado, muchas investigaciones han reportado la capacidad de microorganismos de lograr la transformación de compuestos contaminantes del biogás a otros compuestos, que son utilizados por los microorganismos como fuente de energía, removiéndolos del flujo gaseoso y logrando así la purificación del biogás. En un estudio de la EARTH se evaluó la elaboración de filtros con sustratos orgánicos, para que al hacer pasar el biogás por ellos, se lograra retener el H₂S en el filtro y así lograr su remoción del biogás. Se determinó que de los sustratos

evaluados, el más efectivo para la remoción del H₂S fue el EM compost, en donde se logró remover de un 81% a un 96%. Este sustrato, al contar con una materia orgánica en proceso de fermentación por parte de microorganismos eficientes, logra que los microorganismos también reaccionen con el H₂S (Acosta *et al.*, 2009). De esta manera, el estudio demuestra la capacidad de los microorganismos en la misma materia orgánica en descomposición de lograr procesos de desulfuración.

En el caso del tratamiento utilizado en esta investigación, con el inoculo mixto de *S.novella* y *A.thiooxidans* en el tanque de desulfuración biológica, se evidenció una disminución considerable en la concentración de H₂S del biogás. Como se muestra en el cuadro 5, comparando la concentración inicial de H₂S en la muestra de biogás con la obtenida a la salida del tanque de biodesulfuración, se logró remover 189 ppm (261 mg/m³) del H₂S; pasando de 337 ppm a 148 ppm; lo que corresponde a más de la mitad, un 56%, del que se tenía inicialmente. Esto significa que el diseño establecido para tanque de biodesulfuración funcionó y permitió que se dieran las condiciones adecuadas que propiciaron la actividad de *S.novella* y *A.thiooxidans* en el aprovechamiento y oxidación del H₂S, y por lo tanto su eliminación del biogás.

En cuanto a la composición del CH₄, se determinó que hubo una disminución de este componente luego de pasar por el proceso de desulfuración biológica. Esto posiblemente se debió a que, al ser un proceso en donde se introduce O₂, en la bolsa de almacenamiento luego del proceso de biodesulfuración se va recolectando una mezcla del biogás que se hace pasar por el tanque junto con el aire que se incorpora con la bomba de pecera. Por ello, el agregar aire hace que el CH₄ luego del tratamiento se encuentre más diluido. Sin embargo, como se denota en el cuadro 5, hubo una disminución muy alta del CH₄, de casi un 12%, pasando del 34% de CH₄ inicial a un 22%. Considerando que la aireación realizada fue la mínima para asegurar la sobrevivencia de microorganismos aerobios y el funcionamiento seguro del tanque de biodesulfuración, un aumento tan elevado en la cantidad de O₂ pudo haber sido causado por la presencia de fugas.

Los resultados obtenidos con el tratamiento utilizado concuerdan con otros estudios realizados anteriormente, los cuales evalúan y revelan una alta eficiencia en la oxidación del H₂S por parte de estas dos bacterias.

En el caso de *A. thiooxidans* por ejemplo, en un estudio realizado por Aroca *et al.* (2007), se evaluó la capacidad de remoción de H₂S utilizando biofiltros con biofilms de cultivos puros de *A. thiooxidans* y *Thiobacillus thioparus*, debido a la alta capacidad de desulfuración de ambas especies. Luego del desarrollo de la biomasa de ambos microorganismos en los respectivos biofiltros y de pasar un flujo continuo de H₂S durante 30 días, se determinó finalmente la cantidad de H₂S consumido. De esta forma se estableció que la máxima capacidad de remoción de H₂S se logró con *A. thiooxidans* (370 gS m⁻³ h⁻¹) y fue mucho mayor que la obtenida para el biofiltro inoculado con *T. thioparus* (14 gS m⁻³ h⁻¹). De igual forma, en otra investigación, se logró aislar una cepa resistente a bajos valores de pH y al sulfato, *A. thiooxidans* AZ11. Utilizando esta cepa se adaptó un biofiltro para determinar su capacidad para remover el H₂S. Se procedió a pasar H₂S con concentraciones iniciales entre 2000 a 2200 ppmv con tiempos de retención de 18 segundos en el biofiltro, y tras analizar el H₂S a la salida del biofiltro, se obtuvo una concentración de menos de 0.1 ppmv de H₂S en el gas de salida (Lee *et al.*, 2006).

Por otro lado, se han realizado estudios en donde se evalúa la capacidad de remoción del H₂S por parte de *S. novella* (*T. novellus*), y se ha determinado que en un biofiltro con un cultivo puro de la bacteria y en condiciones mixotróficas se puede alcanzar una remoción máxima del H₂S; correspondiente a un 99.5% (Chung *et al.*, 1997).

A pesar de que la eficiencia del proceso de desulfuración fue considerable, la cantidad de H₂S de la muestra de biogás no disminuyó lo suficiente como para que el biogás con el que se trabajó cumpla con los requisitos de compresión y uso como combustible para vehículos. Según se indicó anteriormente, el parámetro se establece en aproximadamente 66 ppm o 100 mg/Nm³ de H₂S. Sin embargo, considerando la eficiencia del 56% del proceso de

desulfuración, es posible aplicar este sistema para la purificación de biogás que presente concentraciones iguales o menores a 150ppm, y se asegura que se va a cumplir con el parámetro que asegura la pureza suficiente del biogás para su uso como combustible para vehículos.

El hecho de que el cultivo mixto de estas bacterias no presentara una eficiencia tan exitosa como la que se reporta en otras investigaciones, en las que se reporta hasta un 99% de eliminación del H₂S, puede deberse a diferentes razones. Se debe tener en cuenta que la mayoría de los estudios que se han realizado sobre la capacidad de remoción del H₂S por parte de *S. novella* y *A.thiooxidans* utilizan biofiltros. En esta investigación sin embargo, se procedió únicamente a incorporar a un tanque con aireación los cultivos bacterianos con tres días de crecimiento. Contrario a un biofiltro, no se contaba con un sustrato que permitiera el desarrollo de biofilm maduro, y el diseño del tanque tampoco permitía, como en el caso de los biofiltros, renovar el medio de cultivo para mantener las bacterias en él por varios días.

Por ello se establece que, aunque sí se demostró una capacidad de remoción del H₂S con el uso del tanque de biodesulfuración biológica y el tratamiento utilizado, es posible que el rendimiento de este proceso de purificación pueda mejorarse por medio de modificaciones a la propuesta de diseño del tanque, la cual es realmente simple, para que permita trabajar de forma algo similar a un biofiltro. Por ejemplo, se podría incorporar un lecho empacado al tanque, de forma que se permita a los microorganismos contar con una superficie de soporte y se pueda además mejorar el contacto entre el H₂S del biogás y las bacterias por medio de la formación de un biofilm. Incluso se podría adaptar el diseño para que el tanque sea vertical, y se asemeje a la columna que se utilizó para el proceso de absorción. De esta manera, se podría realizar la renovación del medio de cultivo o la fase líquida en que la que se encuentran los microorganismos cada cierto tiempo, por medio de un sistema que se asemeje al sistema de recirculación que se utilizó en la columna de absorción. De esta manera se podría mantener el sistema funcionando de forma constante asegurando que siempre van a haber bacterias activas en el tanque.

Por otro lado, a raíz de las observaciones hechas una vez que el tanque de biodesulfuración se puso a funcionar y con los resultados obtenidos de los análisis de la composición de biogás, hay varios aspectos que se pueden mejorar específicamente al diseño del tanque de desulfuración biológica, para su funcionamiento como sistema de purificación. Por un lado, al pretender establecer un sistema fácil de instalar, la construcción de todo el sistema de purificación, incluyendo las bolsas de almacenamiento, fue realmente artesanal. Esto generó un problema con las bolsas de almacenamiento, ya que a pesar de probar varias formas de sellarlas tendían a presentar fugas que pudieron conllevar la pérdida del CH_4 . Por lo tanto, si se hubiese adaptado equipo que permitiera regular los flujos del biogás y de aire de forma más exacta, como por ejemplo rotámetros, el funcionamiento del tanque podría ser más controlado.

Además, al no contar con un flujo continuo de biogás, se restringió el funcionamiento del tanque, ya que el paso del biogás hacia éste se debió realizar de forma manual. Por el contrario, manejando un flujo continuo de biogás, el tratamiento se pudo haber probado por varios días, y no sólo por periodos de 5 horas, lo que hubiese permitido a los microorganismos ambientarse las condiciones a las que fueron sometidas en el tanque de biodesulfuración. Relacionado a esto, el tener que movilizarse hasta Coronado para obtener una muestra de biogás y el transporte de ésta, hizo que se limitara la cantidad de biogás y el tiempo con el que podía contar para montar y probar el sistema con el tratamiento.

Por lo tanto, no sólo se recomienda hacer los ajustes al diseño indicados anteriormente, sino que también se podrían tomar los factores de diseño establecidos en este estudio para diseñar un tanque de biodesulfuración para un biodigestor estable y en funcionamiento que requiera reducir la cantidad de H_2S del biogás que se está produciendo. De esta forma se podría probar nuevamente el sistema, pero por un periodo de funcionamiento más prolongado. Incluso, algo que no se realizó en este estudio y que es importante evaluar, es probar distintas fuentes de materia orgánica en descomposición como inóculo del tanque para el proceso de desulfuración biológica, determinando cuál es más eficiente para la remoción de H_2S y aislando e

identificando los microorganismos responsables de la oxidación del sulfuro que se encuentran de forma natural en esos desechos.

Columna de absorción con NaOH para la remoción del CO₂ del biogás

La columna de absorción se consideró el sistema de purificación más adecuado para la remoción del CO₂ del biogás, debido a que se buscaba un sistema sencillo, de fácil funcionamiento y lo más ambientalmente amigable. En un inicio, se pensaba realizar una absorción física utilizando una columna diseñada para este fin y únicamente el agua como el líquido para realizar la absorción del CO₂.

Sin embargo, como se indicó anteriormente, la absorción es un proceso que depende del desequilibrio originado por la diferencia de concentración del componente de interés en la fase gaseosa y en la fase líquida. Es decir, si la concentración del componente en la fase gaseosa es superior a la que le correspondería si estuviera en equilibrio con la fase líquida, va a lograrse la transferencia de ese gas a la fase líquida. A raíz de esto, se tiende a diseñar columnas con determinadas dimensiones, para asegurar que se presenten las condiciones ideales para que ocurra la transferencia de masas y por lo tanto, la absorción (Franco y Ojeda, 2008).

Para determinar las dimensiones de la columna necesaria, se deben realizar una serie de cálculos, para lo que se requiere de datos como la presión parcial del compuesto por absorber, el caudal y temperatura del gas así como el caudal y concentración de absorbente. Sin embargo, cuando se contemplaron estos datos para el diseño de la columna para la absorción del CO₂ presente en el biogás del biodigestor experimental, se estableció que el caudal o el flujo del biogás con el que se contaba era realmente pequeño (Franco y Ojeda, 2008).

Como se indicó en los resultados, por medio de estimaciones teóricas se estableció que la producción de biogás del biodigestor experimental con el que se trabajó era de 8 litros por día, correspondiente a 300 ml de biogás por hora. Estas estimaciones se basan en lo establecido por

Silva (2002), quien indica que la tasa de producción de biogás corresponde entre un 10-30% del volumen del biodigestor por día. Considerando que el biodigestor tiene 80 litros de capacidad, y considerando una producción mínima de éste, la producción de biogás sería la indicada anteriormente.

Tras consultarlo con especialistas en la materia, se determinó que al trabajar con un flujo tan bajo de biogás, no se justificaba realizar cálculos tan detallados para diseñar la columna de absorción. Esto porque el diámetro que presenta una columna de absorción va a depender de los flujos del gas como del líquido, mientras que su altura va a depender de la transferencia de masas del CO₂ del biogás al absorbente. Por un lado, considerando que el diámetro depende de los flujos, al tener un flujo de biogás tan pequeño, esto significa que el diámetro de la columna va a ser realmente pequeño. Igualmente, la altura de la columna corresponde a la altura de relleno necesaria para conseguir la transferencia del gas al absorbente líquido. Sin embargo, para que haya una buena transferencia lo que se debe asegurar es el contacto del componente que se desea absorber con la fase líquida. Considerando que el flujo del biogás es muy reducido, esto significa que se requiere de poca área para asegurar que ocurra el contacto entre el absorbente y el componente por absorber. De esta manera, teniendo en cuenta únicamente el flujo de biogás que se manejaba, si se realizaban los cálculos respectivos, se iba a determinar que la columna de absorción necesaria para el proceso de absorción iba a ser realmente pequeña, y por lo tanto, difícil de construir y evaluar¹.

Por ello, finalmente se decidió por no realizar los cálculos de diseño para la columna de absorción del CO₂ del biogás. Lo que se hizo fue probar la adaptación de una columna de vidrio pequeña (25cm de alto y 3,5cm de ancho) para que funcionara como columna de absorción, considerando en su construcción todas las características que favorecen el proceso de absorción. Por un lado, se adaptaron los extremos de la columna, de forma que se ingresara el biogás por la parte inferior de ésta y por la parte superior entrara el absorbente a la columna,

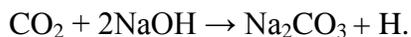
¹ Ulate, A. 2010. Columnas de absorción. Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, UCR. (Comunicación personal)

presentando igualmente direcciones contrarias para la salida de la fase líquida y gaseosa; es decir se generó el flujo contracorriente las dos fases. Esto permite que se cuente con una amplia superficie de interfase para que ocurra la transferencia de masa y, a la vez, también asegura que haya contacto entre ambas fases. El tamaño de la columna de vidrio también permitió empacarla, utilizando los anillos Rasching de 0,7cm de largo. Al presentar un relleno en la columna se aumenta el área superficial de ésta y se favorece el contacto de la fase gaseosa (CO₂ del biogás) con el absorbente (Franco y Ojeda, 2008).

Por último, para aumentar la eficiencia del proceso, evitando el gasto excesivo del absorbente, se construyó la columna de forma tal que permitiera la recirculación de éste para así aprovechar mejor el absorbente en el proceso de eliminación del CO₂. Esto se realizó principalmente considerando que como se indicó en el cuadro 3, el biogás del biodigestor experimental ya presentaba un porcentaje de CH₄ (82%) bastante alto, por lo que la cantidad de CO₂ que se debía eliminar con la columna era poca para cumplir con los estándares de pureza para el biogás.

Además, se decidió realizar una absorción química, en lugar de una absorción física, ya que este proceso tiene la ventaja de que se lleva a cabo una reacción química del componente contaminante del gas con la fase líquida correspondiente a la solución acuosa, y la capacidad de formar enlaces químicos entre ambas fases permite que se aumente el coeficiente de transferencia de masa del contaminante gaseoso a la fase líquida (Jofre *et al.*, s.f.).

La elección del NaOH como absorbente se debe a que, entre los muchos absorbentes, los hidroxilos son muy eficientes para la absorción del CO₂, además de que son compuestos estables, fáciles y seguros de manejar. En el caso del hidróxido de sodio (NaOH), éste reacciona con el CO₂ para formar carbonato de sodio:



Además una de las ventajas del uso del NaOH, es que también permite la remoción del H₂S, con el cual reacciona para formar sulfuro de sodio. De esta forma, por medio de la absorción química con NaOH se logra la eliminación de los principales contaminantes del biogás (Olutoye y Eterigho, 2008; Wellinger y Lindberg, 2000).

Otro aspecto que se consideró para el funcionamiento de la columna de absorción fue la concentración del absorbente. Se utilizó una solución de NaOH bastante concentrada, al 10% o 2.5M, lo que permitiría saturar la columna fácilmente con el absorbente y así también asegurar que que ocurriera la reacción entre el NaOH y el CO₂ presente en el biogás. Igualmente se ha establecido que la absorción depende de la concentración de la solución absorbente y se ha demostrado que con la solución de NaOH 2,5 a 3,0 M se logra la absorción de forma más rápida (Kapdi *et al.*, 2004).

Por último, considerando el reducido flujo de biogás con el que se contaba, se debía asegurar que el flujo del absorbente en la columna también fuera el más reducido posible. Por ello, se procedió a utilizar un temporizador adaptado a la bomba de agua que permitió la movilización del absorbente a la parte superior de la columna. Con el temporizador se logró disminuir el voltaje y por lo tanto la potencia de la bomba. Además, el temporizador permitió que la bomba se prendiera y se apagara por lapsos cortos de tiempo, reduciendo así el flujo de absorbente que caía dentro de la columna. De esta manera se logró obtener un flujo suficiente como para que el absorbente pudiese subir y alcanzar el extremo superior de la columna pero el mínimo posible como para lograr un goteo por la columna que apenas mojara sus paredes.

Eficiencia de la columna de absorción para la purificación del metano

La finalidad de la columna de absorción era reducir la cantidad de CO₂ de la composición inicial en el biogás; de forma que su remoción permitiera obtener un biogás de alta pureza, con un 96% de CH₄, según los estándares establecidos para el uso de CH₄ como un combustible para vehículos. Por ello, considerando la composición inicial del biogás del biodigestor

experimental con el que se trabajó, se buscaba el porcentaje de CH_4 aumentara un 14% por medio de la eliminación del CO_2 que con la columna de absorción química con NaOH .

Sin embargo, como se muestra en el cuadro 6, no se obtuvieron los resultados esperados, que correspondían básicamente a un aumento en la concentración del CH_4 del biogás. Contrario a esto, se presentó una disminución del 43% en el CH_4 a la salida de la columna de absorción. Igualmente, el resultado de O_2 obtenido en el análisis al biogás que había pasado por la columna, indica que hubo un aumento de prácticamente un 6,5% con respecto a la cantidad inicial de O_2 , la cual era prácticamente mínima.

Considerando que se siguieron los principios de absorción y que incluso, se utilizó un absorbente con gran afinidad al CO_2 en una solución acuosa concentrada para asegurar el funcionamiento de la columna, se debe analizar las razones por las cuales no se logró obtener una eficiencia del proceso.

Primero, debido a que se necesitaba que el absorbente básicamente goteara por la parte superior de la columna, se adaptó un temporizador a la bomba de agua para asegurar el flujo mínimo posible del absorbente. Sin embargo, para lograr este flujo, lo que se probó fue generar un funcionamiento discontinuo de la bomba, es decir, que ésta se prendiera y apagara por lapsos de 2 segundos, generando también un flujo discontinuo del absorbente. Este funcionamiento de la bomba generó vacíos que pudieron haber permitido el ingreso de aire o otros compuestos como hidrógeno que se obtiene de la reacción del CO_2 junto con el absorbente al sistema, conllevando a un aumento del O_2 y una disminución del CH_4 en el biogás a la salida de la columna.

Por otro lado, este proceso de purificación se puso a funcionar por un lapso de tiempo de 5 días. Considerando los problemas con las bolsas de almacenamiento, es posible que durante ese tiempo se diera una pérdida del CH_4 por medio de fugas. De esta forma se aumentó la

cantidad de oxígeno y se disminuyó la cantidad de CH₄ en la composición del biogás a la salida de la columna de absorción.

Otro aspecto que se debe considerar son los flujos que se manejaron en la columna. Estudios han demostrado que la absorción del CO₂ se encuentra más influenciada por los flujos del gas y del absorbente que por las dimensiones (diámetro) de la columna (Kapdi *et al.*, 2004). Mientras que el biogás presentaba un flujo aproximado de 8 l/día, es decir prácticamente 5 ml/min; el absorbente bajaba por la columna al flujo mínimo que se pudo lograr con la bomba con la que se contaba, que era de 22 ml/min. La diferencia entre los flujos, y el hecho de que el flujo del absorbente superó considerablemente el flujo del biogás, pudo hacer que el absorbente al ser tan concentrado no sólo absorbiera CO₂, sino que también absorbiera el compuesto de interés, correspondiente al CH₄ del biogás².

Por último, se debe tener en cuenta que el biogás se movilizó a lo largo de la columna con la misma presión que tenía al salir del biodigestor. Al no compresionar el biogás antes de la columna, aumentando la velocidad con la que fluye por el sistema, se reduce la posibilidad del biogás de vencer la fuerza de la presión que ejerce el absorbente líquido que baja por la columna, haciendo que el funcionamiento no sea el óptimo (Coto *et al.*, 2007). Por lo cual, es posible que muy poco biogás realmente lograra entrar a la columna y atravesar todo el sistema, considerando que luego de vencer la presión inicial, gran parte de los componentes del biogás posiblemente fueron absorbidos por el NaOH tan concentrado.

Considerando las dificultades en cuanto a diseño y puesta en marcha que se presentaron con la columna de absorción, y considerando que la cantidad de biogás con la que se trabajó es muy pequeña, probablemente lo mejor que se podría hacer es utilizar otro sistema más simple que el propuesto.

² Ulate, A. 2010. Columnas de absorción. Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, UCR. (Comunicación personal)

De acuerdo a un estudio realizado en la Universidad EARTH en el que se buscaba la eliminación de los contaminantes del biogás para su uso en la generación de electricidad, se determinó que el uso de burbujeadores fue un método efectivo para remover el CO_2 e incluso el H_2S . El diseño que establecieron consistió básicamente en un recipiente hermético que se llenó con una solución absorbente, con un tubo perforado en la parte inferior por el cual entraba el biogás, permitiendo así el máximo burbujeo del biogás en la solución absorbente. Además en la parte superior del recipiente, sobre el nivel alcanzado por la solución acuosa, se estableció una salida para el biogás tratado. Igualmente, antes del burbujeador, se colocó un compresor para introducir el biogás proveniente del biodigestor a presión. En la investigación se utilizaron soluciones de óxido de calcio, hidróxido de calcio y sulfato de calcio como absorbentes, determinando que el óxido de calcio fue el más eficaz en la eliminación del CO_2 del biogás, aumentando la concentración del CH_4 en el biogás de un 82,7% a un 91,2% reteniendo cerca de un 8,5% del CO_2 y CO presente en el biogás (Coto *et al.*, 2007).

Por lo cual, con este estudio evidencia que, a pesar de la simplicidad del diseño, ya sea una columna o un burbujeador, es necesario compresionar el biogás antes pasarlo por un sistema de purificación de este tipo. Además, considerando el éxito obtenido en esa investigación, se sugiere reevaluar el proceso de absorción química del CO_2 en 2,5M NaOH utilizando un burbujeador o una serie de burbujeadores, en lugar de la columna de absorción.

CONCLUSIONES

El biogás producido en el biodigestor experimental del ITCR presenta una composición ideal para su uso como una fuente de energía (82% CH₄, 18% CO₂ y < 2ppm H₂S). Por lo cual, si se utiliza la misma alimentación, de agua residual y lirios triturados en los biodigestores experimentales y en el biodigestor a gran escala del ITCR, el único proceso de purificación necesario para obtener metano de alta pureza sería la remoción del CO₂.

Del sistema de purificación propuesto y construido en esta investigación, se logró comprobar la eficiencia del proceso para la remoción del H₂S del biogás, correspondiente al tanque de desulfuración biológica funcionando con un cultivo mixto de *A. thiooxidans* y *S. novella*.

El tanque de desulfuración biológica construido para el proceso de purificación de biogás se diseñó y se puso a funcionar contemplando aspectos como un tiempo de retención de una hora y un flujo de aireación que no superara el 5% de volumen del biogás dentro del tanque.

La oxidación del H₂S por parte de las bacterias *A. thiooxidans* y *S. novella* probado en el tanque de desulfuración biológica, fue bastante exitosa, ya que permitió la eliminación del 56% de este contaminante del biogás.

La implementación del tanque de biodesulfuración con una fase líquida con *A. thiooxidans* y *S. novella* como proceso de purificación, permite que biogás con concentraciones de H₂S iguales o menores a 150 ppm puedan cumplir con los estándares establecidos para ser compresionado y utilizado como combustible para vehículos.

El flujo tan pequeño de biogás con el que se contaba en el biodigestor experimental, hizo que se considerara innecesario los cálculos de diseño para lo que sería una columna realmente pequeña. Además, impidió el funcionamiento adecuado de la columna que se construyó ya que

no generaba la presión suficiente para que el biogás rompiera las fuerzas de presión generadas por el absorbente en la columna. Por lo tanto, la absorción química del CO_2 presente en el biogás utilizando NaOH como absorbente, no resultó un proceso de purificación del biogás efectivo, ya que no se logró la reducción del CO_2 del biogás.

El utilizar un absorbente tan concentrado, NaOH al 2.5M, junto con un flujo mucho mayor que el que presentaba el biogás pudo conllevar a que se absorbiera hasta el CH_4 del biogás en la columna de absorción, de ahí que en lugar de que se presentara un aumento en el CH_4 , éste disminuyó.

El sistema de purificación construido, que consiste en el tanque de desulfuración biológica y la columna de absorción, presentó una elaboración bastante “artesanal” por lo que se generaron problemas principalmente de fugas en las bolsas de almacenamiento del biogás. Además, al intentar ejecutar un sistema lo más sencillo posible en su construcción y funcionamiento, se comprometieron elementos como el uso de rotámetros e incluso la compresión del biogás, que pudieron asegurar un funcionamiento más apropiado de éste.

RECOMENDACIONES

En el caso del sistema de purificación para la remoción biológica de H_2S , se establece que el tanque de desulfuración biológica puede modificarse para mejorar su eficiencia. Se puede probar el uso de distintos sustratos que permitan inmovilizar las bacterias, aumentando el área de contacto entre éstas y el H_2S . Igualmente, se puede buscar elementos, como caudalímetros, que permitan regular mejor el ingreso del aire y del biogás al tanque.

Se considera importante adaptar el tanque de biodesulfuración a un biodigestor estable con una fuente continua de biogás, para así poder probar el tanque de desulfuración biológica con el tratamiento establecido por un periodo de tiempo más prolongado, que supere las 24 horas, y que permita asegurar que la eficiencia se mantenga en estas condiciones.

Se recomienda implementar de forma experimental el tanque de desulfuración biológica diseñado, pero utilizando diferentes tipos de desechos orgánicos, para determinar con cuál se logra una mayor reducción del H_2S y posteriormente identificar microorganismos que se encuentren en la materia orgánica de forma natural y que sean capaces de realizar una desulfuración biológica eficiente.

Se debería contar con un biodigestor que presente un flujo de biogás continuo y mayor al que se estaba utilizando, de forma que se permita realizar los cálculos pertinentes para diseñar la columna de absorción.

Para pruebas experimentales, con bajos flujos de biogás, sería más apropiado utilizar burbujeadores cuya implementación es más simple y que aseguren que se dé la transferencia del CO_2 al absorbente, en lugar de la columna de absorción.

En cuanto al sistema de purificación en general, se considera evaluar el uso de otros materiales de construcción, como el uso de geomembrana de PVC para elaborar las bolsas de almacenamiento o utilizando epóxidos como sellantes, que permitan asegurar que el sistema va a funcionar bien y que se encuentre libre de fugas, ya que éste se convirtió en un gran problema a lo largo de la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLAM, R.; BREDSSEN, R.; DRIOTI, E. 2003. "CO₂ Separation Technologies", Capítulo 2. En: *Carbon dioxide recovery and utilization*. Kluwer Academic Publishers, Holanda. pp. 53-118.
- ACOSTA, M.; REVELO, D.; RUIZ, O.; TAX, O.; BOTERO, R. 2009. Capacidad de filtración y retención del sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás en dos diferentes sustratos orgánicos (EM-compost y lombricompost). *Tierra Tropical*. 5(1):109-113.
- ALKEN MURRAY CORP. 2006. Hydrogen sulfide odor control & general industrial waste treatment. Disponible en: <<http://alken-murray.hypermart.net/EZ8pib.htm>>.
- ANAEROBIC DIGESTION (AD) COMMUNITY. s.f. Processing Biogas from Anaerobic Digestion into a Commercial Methane Product. Disponible en: http://www.anaerobic-digestion.com/html/processing_biogas_as_biomethan.php.
- AROCA, G.; URRUTIA, H.; NÚÑEZ, D.; OYARZÚN, P.; ARANCIBIA, A.; GUERRERO, K. 2007. Comparison on the removal of hydrogen sulfide in biotrickling filters inoculated with *Thiobacillus thioparus* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Electronic Journal of Biotechnology*. 10(4):514-520.
- BAESEN, Y. 2005. Lille, France, Biogas Bus Project. Disponible en: < <http://www1.eere.energy.gov/cleancities/pdfs/baesen.pdf>>
- BOTERO, R. 2007. Generación de energía eléctrica a partir de biogás. Seminario Taller: Tecnologías de Biodigestores: Avances, variantes y aplicabilidad. Universidad EARTH, Costa Rica.

- CHO, K.; IRÍA, M.; SHODA, M. 1992. Degradation of Hydrogen Sulfide by *Xantomonas* sp. Strain DY44 Isolated from Peat. *Applied and Environmental Microbiology*. 58 (4): 1183-1189.
- CHUNG, Y.; HUANG, C.; LI, C. 1997. Removal characteristics of H₂S by *Thiobacillus novellus* CH3 biofilter in autotrophic and mixotrophic environments. *Journal of Environmental Science and Health*, 32: 1435 – 1450.
- COTO, J.; MALDONADO, J.; BOTERO, R.; MURILLO, J. 2007. Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTH.Tierra Tropical. 3 (2): 129-138.
- DE MES, T.Z.; STAMS, A.J.; REITH, H.J.; ZEEMAN, G. 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. En: *Biomethane and Biohydrogen: Status and perspectives of biological methane and hydrogen production* Capítulo 4, pp 58-91. Dutch Biological Hydrogen Foundation. Petten, Holanda.
- FAO. 1996. Biogas technology: A training manual for extension. Support for development of national biogas programme. Nepal. Disponible en:< <http://www.fao.org/docrep/008/ae897e/ae897e00.HTM>>.
- FERNÁNDEZ, E. y MONTALVO, S. 1998. Métodos económicos y ecológicamente viables para purificar gases contaminantes. Disponible en: <<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/caliaire/peru/cubpca004.pdf>>
- FERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ, S.; FRANCO, R. s.f. De biogás a gas acompañante del petróleo: Procedimiento de purificación biológica. Facultad de Ingeniería Química del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba. Disponible en:< <http://www.cubasolar. cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar13/HTML/articulo01.htm>>

- FORD, S. 2007. Spread it around: Biogas in the grid. Renewable Energy World Magazine. 10 (6). Disponible en: <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2007/11/spread-it-around-biogas-in-the-grid-51438>>
- FRANCO, C. A. y OJEDA, E. D. 2008. Operaciones básicas. Tema 12: Absorción. Ingeniería Química, Universidad de Sevilla. Disponible en: <http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos/tema12/pagina_06.htm>
- GABRIEL, D. y DESHUSSES, M.A. 2003. Retrofitting existing chemical scrubbers to biotrickling filters for H₂S emission control. PNAS. 100(11): 6308-6312.
- GUEVARA, A. 1996. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, OPS, Perú. 73p.
- HIGGINS, M; YAROSZ, D.; CHEN, Y.; MURTHY, S.; MASS, N.; COONEY, J. 2003. Mechanisms of Volatile Sulfur Compound and Odor Production in Digested Biosolids. Proceedings of the Water Environment Federation. pp 993.
- HILBERT, J. s.f. Manual para la producción de Biogas. Instituto de Ingeniería Rural. I.N.T.A
- HORIKAWA, M.S.; ROSSI, F.; GIMENES, M.; COSTA, C.; DA SILVA, M. 2004. Chemical Absorption of H₂S for Biogas Purification. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 21 (3): 415-422.
- INFORMATION AND ADVISORY SERVICE ON APPROPRIATE TECHNOLOGY (ISAT). s.f. Biogas Basics. Biogas Digest. 1:46p. GTZ Project. Disponible en: <<http://www.gtz.de/de/dokumente/en-biogas-volume1.pdf>>

- JARVIS, A. 2004. Biogas. Renewable energy from organic waste. The Swedish Biogas Association, Stockholm. 23p. Disponible en: <http://www.sbgf.info/_filer/BIOGAS_PDF_Eng.pdf>
- JOFRE, B.; PINCHEIRA, G.; ROJAS, M.A.; SANDOVAL, J. s.f. Absorción. Universidad Católica de Temuco, Chile. Disponible en: <<http://ccaa.ica.googlepages.com/disertacion20absorcion.pdf>>
- KABASCI, S. Sep-Oct., 2009. “Boosting Biogas with Heat Bonus: How Combined Heat and Power Optimizes Biogas Utilization”. Renewable Energy World Magazine. 12(5). Disponible en: <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/10/boosting-biogas-with-heat-bonus-how-combined-heat-and-power-optimizes-biogas-utilization>>.
- KAPDI, S.; VIJAY, V.; RAJESH, S.; PRASAD, R. 2004. Biogas scrubbing, compression and storage: perspectiva and prospectus in Indian context.
- KELLY, D. y WOOD, A. 2000. Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov., *Halothiobacillus* gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 50: 511–516. Disponible en: <<http://ijs.sgmjournals.org/cgi/reprint/50/2/511>>.
- KELLY, D.; McDONALD, I.; WOOD, A: 2000. Proposal for the reclassification of *Thiobacillus novellus* as *Starkeya novella* gen. nov., comb. nov., in the *a*-subclass of the *Proteobacteria*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 50: 1797–1802. Disponible en: <<http://ijs.sgmjournals.org/cgi/reprint/50/5/1797>>.

- LEE, E.; LEE, N.; CHO, K.; RYU, H. 2006. Removal of Hydrogen Sulfide by Sulfate-Resistant *Acidithiobacillus thiooxidans* AZ11. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 101(4): 309–314.
- MADIGAN, M.; MARTINKO, J.; PARKER, J. 2006. Brock. *Biología de los Microorganismos*. 10ª edición. Pearson Educación, Madrid. pp. 28, 360-362, 646-650.
- MANDAVIA, S. 2007. Toxicity, Hydrogen Sulfide. E-medicine. Disponible en: <<http://emedicine.medscape.com/article/815139-overview>>
- NIJAGUNA, B.T. 2002. “Materials for biomethanation and products of biomethanation”, Capítulo 2. En: *Biogas Technology*. 1 edición. New Age International Publishers. pp. 25-30.
- NOZIC, M. 2006. Removal of carbon dioxide from biogas. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Lund, Suecia. Disponible en: <<http://www.docstoc.com/docs/14927528/Separation-of-carbon-dioxide-from-biogas>>.
- OLUTOYE, M. y ETERIGHO, E. 2008. Modelling of a Gas Absorption Column for CO₂-NaOH System under Unsteady-State Regime. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 7(12): 105-114. Disponible en: <http://lejpt.academicdirect.org/A12/105_114.pdf>
- PÉREZ, H. y VILLA, P. 2005. Desulfuración Biológica: Una Alternativa para el Tratamiento de Emisiones de Gases a la Atmósfera. *Agua Latinoamérica*. 5(3): 17-20.
- PÉREZ-IBARRA, M. 2007. Aislamiento y caracterización de microorganismos obtenidos de reactores sulfoxidantes. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma Metropolitana. México. Disponible en: <<http://148.206.53.231/UAMI14053.pdf>>

- PERSSON, M.; JÖNSSON, O.; WELLINGER, A. 2006. Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection. IEA Bioenergy.Task 37 - Energy from Biogas and Landfill Gas. Disponible en: <http://www.iea-biogas.net/Dokumente/upgrading_report_final.pdf>
- PLOMBIN, C. 2003. Biogas as a vehicle fuel: A European Review. Trendsetter Report, 2003(3): 51p. Disponible en: <<http://www.trendsetter-europe.org/index.php?ID=1699>>.
- QUESADA, R. y SALAS, N. 2006. Generación de energía eléctrica a partir de biogás. Trabajo de graduación. Universidad EARTH. Disponible en: <http://usi.earth.ac.cr/TierraTropical/archivos-de-usuario/Edicion/51_v3.2-02_QuesadaSalas.pdf>
- REVAH, H.; ORTIZ, I. 2004. El desarrollo de bioprocesos para el tratamiento de aire contaminado emitido por fuentes fijas. En “Fundamentos y Casos Exitosos de la Biotecnología Moderna” Francisco Bolívar Editorial México: 625- 658.
- SÁNCHEZ, S. M. 2003. Bioenergía. En: Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones. WWF-Fundación Natura. Quito. Capítulo 9 :103-110. Disponible en: < http://www.ppre.uni-oldenburg.de/download/Downloads/ENERG%CDAS_RENOVABLES.pdf >
- SILVA, J.P. 2002. Tecnología del Biogás. Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente.Facutad de Ingeniería, Universidad del Valle. Disponible en: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf>>
- SOLARI, G. 2004. Ficha Técnica: Biodigestores. Soluciones Prácticas-ITDG. <<http://www.itdg.org.pe/fichastecnicas/pdf/FichaTecnica8-Biodigestores.pdf>>.

- SYED, M.; SOREANU, G., FALLETTA, P; BÉLAND, M. 2006. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - A review. Canadian Biosystems. Disponible en: <<http://www.aseanenvironment.info/Abstract/41015017.pdf>>.
- TAYLHARDAT, L. 2007. Tecnología del Biogás: Fundamentos y biodigestores rurales. Seminario Taller “Tecnología de los Biodigestores: Avances, variantes y aplicabilidad”. Universidad EARTH, Guápiles, Costa Rica.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). s.f. “Method 11-Determination of hydrogen sulphide content of fuel gas streams in petroleum refineries”. Centro de medición de emisiones. Disponible en: <<http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-11.pdf>>
- VELÁSQUEZ, J. L. 2007. Sistema de Generación de Energía Eléctrica con Combustible Biogás. Seminario Taller: Tecnologías de Biodigestores: Avances, variantes y aplicabilidad. EARTH, Costa Rica.
- VIJAY, V.; CHANDRA, R.; SUBBARAO, P.; KAPDI, S. 2006. Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications. The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment”, pp.1-6.
- VÍQUEZ, J. A. 2009. Biogás: energía recuperable. Revista ECAG Informa, Costa Rica. 50: 24-27.
- WELLINGER, W. y LINDBERG, A. 2000. Biogas upgrading and utilisation. IEA Bioenergy, Task 24: Energy from biological conversion of organic waste. Disponible en: <<http://www.iea-biogas.net/Dokumente/Biogas%20upgrading.pdf>>

ZAFAR, S. 2006. A Case Study to Bottle the Biogas in Cylinders as Source of Power for Rural Industries Development in Pakistan. *World Applied Sciences Journal*. 2: 127-130.

ANEXOS

Anexo 1. Informe del análisis de la composición inicial del biogás del biodigestor experimental emitido por el Laboratorio Gaia



RESULTADO DE ANÁLISIS QUÍMICO DE GASES Informe # RB 100113-1

Empresa solicitante: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA.
Lugar: Planta de tratamiento de aguas, sede central, Cartago.
Fecha: 01 de marzo de 2010.
Tipo de análisis: ANÁLISIS DE BIOGAS.

Datos de muestreo

Fecha de muestreo: 13/01/2010 de 1:00 p.m. a 2:30 p.m.
Condiciones: Presión atmosférica promedio de 648,0 mmHg, temperatura promedio de 20,1 °C y humedad relativa promedio de 88 %.

Descripción de muestras

Muestra 1 Biogás de Biodigestor #1

Resultados

Parámetro	Muestra 1
Metano, % v/v	82 ± 2
Sulfuro de hidrógeno, mg/m ³	Menos de 3
Oxígeno, % v/v	Menos de 0,2
Dióxido de carbono, % v/v	18,1 ± 0,2

Notas: Análisis de metano, sulfuro de hidrógeno y oxígeno por método electrométrico. Análisis de dióxido de carbono por método Orsat. Permiso de funcionamiento del Ministerio de Salud: ARSA-1-0017-2006, vigencia 10/01/06-10/01/11. Los resultados de los análisis de este informe solamente se refieren a las muestras aquí escritas. Este informe no podrá ser reproducido en forma parcial sin la aprobación escrita de la gerencia de Lab Gaia.

BQ. JENNIFER HIDALGO JIMÉNEZ
C.Q.C.R. N.I. 2442

Anexo 2. Informe del Laboratorio Gaia de los resultados de CH₄ y H₂S del biogás de la finca La Floresta antes y después de la desulfuración biológica, así como del biogás a la salida de la columna de absorción



RESULTADO DE ANÁLISIS QUÍMICO DE GASES
Informe # RB 100222-1

Empresa solicitante: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA.
Lugar: Planta de tratamiento de aguas, sede central, Cartago.
Fecha: 01 de marzo de 2010.
Tipo de análisis: ANÁLISIS DE BIOGAS.

Datos de muestreo

Fecha de muestreo: 22/02/2010 de 4:30 p.m. a 7:30 p.m.
Condiciones: Presión atmosférica promedio de 647,0 mmHg, temperatura promedio de 24,8 °C y humedad relativa promedio de 78 %.

Descripción de muestras

Muestra 1 Biogas Tratamiento Columna de Absorción
Muestra 2 Biogas Finca Floresta de Coronado
Muestra 3 Biogas Tratamiento 2

Resultados

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Metano, % v/v	39 ± 2	34 ± 2	22 ± 2
Sulfuro de hidrógeno, mg/m ³	menos de 3	470 ± 10	206 ± 4

Notas: Muestreo y análisis de sulfuro de hidrógeno para muestra 2 y 3 realizado por método USEPA # 11 y medición para muestra por método electrométrico, valores de concentración reportados a condiciones estándar, 25 °C y 1 atm. Análisis de metano y oxígeno por método electrométrico. Análisis de dióxido de carbono por método Orsat. Permiso de funcionamiento del Ministerio de Salud: ARSA-1-0017-2006, vigencia 10/01/06-10/01/11 Los resultados de los análisis de este informe solamente se refieren a las muestras aquí escritas. Este informe no podrá ser reproducido en forma parcial sin la aprobación escrita de la gerencia de Lab Gaia.

BQ. JENNIFER HIDALGO JIMENEZ
C.Q.C.R. N.I. 2442

Anexo 3. Diagrama del proceso de producción de biogás para su uso como combustible vehicular en la ciudad de Lille, Francia.

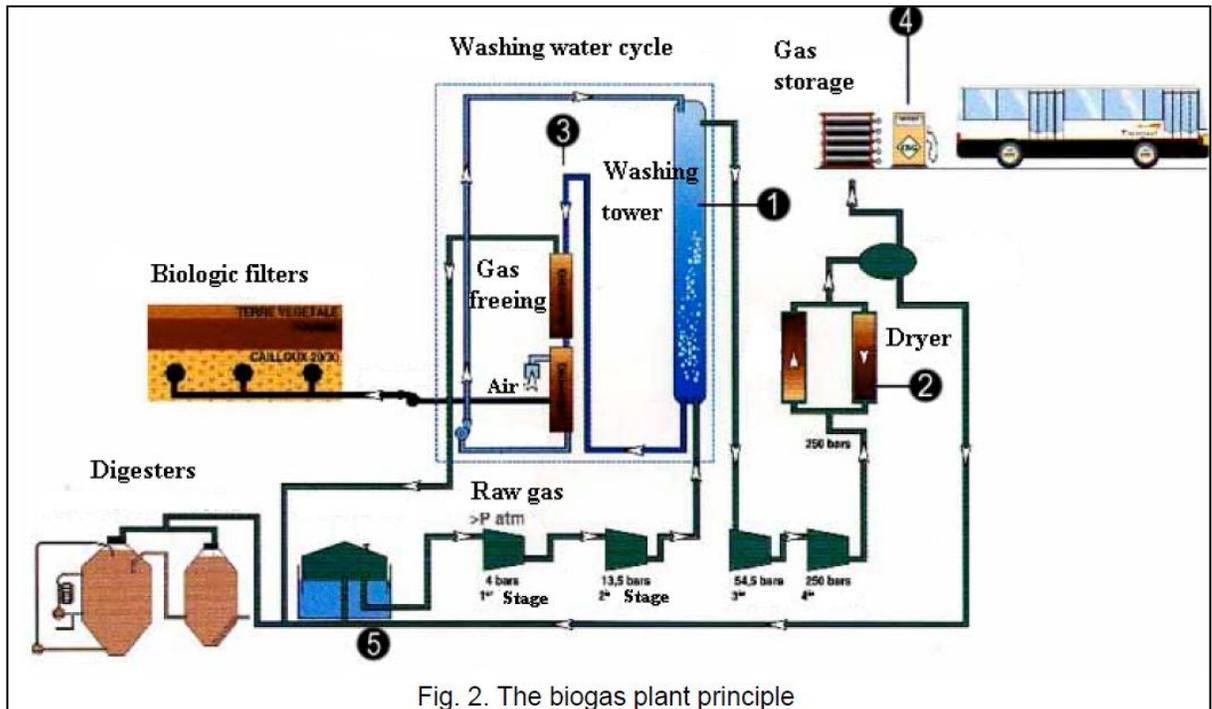
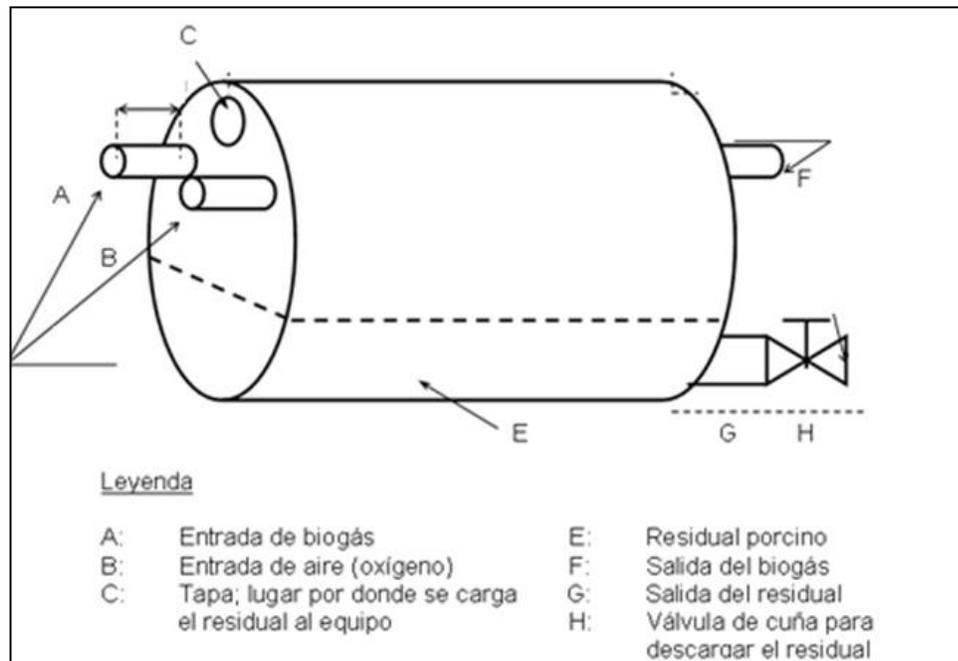


Fig. 2. The biogas plant principle

(Tomado de: Plombin, 2003).

Anexo 4. Esquema de una propuesta tecnológica para el proceso de biodesulfuración biológica.



(Tomado de: Fernández, E. *et al.*; s.f.)