UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

USO DE FILTROS HÚMEDO Y SECO PARA LA REDUCCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN FLUJOS DE BIOGÁS DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA INDOLMASA, REGIÓN UCAYALI - 2019

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

KARLA PATRICIA GARCÍA LINARES

LESLY MELANY RUÍZ REÁTEGUI

PUCALLPA – PERU
2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales

COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 93

En el auditorio de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la UNU, siendo las 12.30 horas del lunes 22 de abril del presente año, se reunieron los miembros del jurado evaluador designado con memo múltiple 067-2019-UNU-FCFYA-CGT, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Carlos Enrique Fachin Mattos	Presidente
Dr. Marco Antonio Chota Izuisa	Miembro
Eco. José Manuel Cárdenas Bernaola	Miembro

Para evaluar la sustentación de tesis titulada : **"USO DE FILTROS HÚMEDO Y SECO PARA LA REDUCCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN FLUJOS DE BIOGÁS DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA INDOLMASA, REGIÓN UCAYALI-2019**" presentado por los bachilleres: **KARLA PATRICIA GARCÍA LINARES Y LESLY MELANY RUÍZ REÁTEGUI,** asesorado por el **Dr. Grober Panduro Pisco.** Terminada la sustentación, se procedió a realizar las preguntas por parte del jurado evaluador, siendo absueltas satisfactoriamente, por lo que el jurado calificador aprobó por **UNANIMIDAD** con el calificativo de **BUENO,** en consecuencia los sustentantes se encuentran aptos para obtener el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL.**

Siendo las 13.15 del mismo día se da por concluido el acto académico.

Dr. Carlos Enrique Fachin Mattos
Presidente

Dr. Marco Antonio Chota Izuisa
Miembro

Eco. José Manuel Cárdenas Bernaola
Miembro

ACTA DE APROBACIÓN

La presente tesis fue aprobada por el Jurado Evaluador de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali, como requisito para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Dr. Carlos Enrique Fachin Mattos

Presidente

Dr. Marco Antonio Chota Izuisa

Miembro

Eco. José Cárdenas Bernaola

Miembro

Dr. Grober Panduro Pisco

Asesor

Bach. Karla Patricia García Linares

Tesista

Bach. Lesly Melany Ruiz Reátegui

Tesista

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
DIRECCION GENERAL DE PRODUCCION INTELECTUAL

Constancia

N° 162

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACION SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

La Dirección General de Producción Intelectual, hace constar por la presente, que el Informe Final (Tesis) titulado:

"USO DE FILTROS HÚMEDO Y SECO PARA LA REDUCCIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN FLUJOS DE BIOGÁS DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA INDOLMASA, REGIÓN UCAYALI-2019"

Cuyos autores son:

- **GARCIA LINARES, KARLA PATRICIA**
- **RUIZ REATEGUI, LESLY MELANY**

Asesor: Dr. PANDURO PISCO, GROBER

Escuela Profesional: INGENIERÍA AMBIENTAL

Facultad: CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

Después de realizado el análisis correspondiente en el Sistema Antiplagio, dicho documento presenta un porcentaje de similitud de 08%.

El tal que de acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO (10%), en el artículo 9: "Criterios de porcentaje de similitud". Se declara, que dicho trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de plagio, por lo que SI se aprueba su originalidad.

En señal de verificación se FIRMA Y SELLA la presente constancia.

Fecha: 06/05/2019

Firma: _____

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
DIRECCION GENERAL DE PRODUCCION INTELECTUAL
DRA. DINA PAFI QUISPE
Direc. Gral Prod Intel

REPOSITORIO DE TESIS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, KARLA PATRICIA GARCIA LINARES
Autor de la TESIS titulada:

USO DE FILTROS HUMEDO Y SECO PARA LA REDUCCIÒN DEL SULFURO DE HIDROGENO EN FLUJOS DE BIOGAS DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA INDOMASA, REGION UCAYALI 2019.

Sustentada el año: 2019
Con la asesoría de: DR. GROBER PANDURO PISCO
En la Facultad de: CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
Carrera Profesional de: INGENIERIA AMBIENTAL

Autorizo la publicación de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali, bajo los siguiente términos:
Primero: otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en forma digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones.
Segundo: declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas.
Tercero: autorizo la publicación,

- [x] Total (significa que todo el contenido de la tesis en PDF será compartido en el repositorio).
- [ ] Parcial (significa que solo la carátula, la dedicatoria y el resumen en PDF serán compartidos en el repositorio).

De mi TESIS de investigación en la página web del Repositorio Institucional de la UNU.
En señal de conformidad firma la presente autorización.

Fecha: 03 / 06 /2019

Email: gali_sch@hotmail.com
Firma: 

Teléfono: 963692390
DNI: 71053228

REPOSITORIO DE TESIS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, LESLY MELANY RUIZ BEATEGUI

Autor de la TESIS titulada:

USO DE FILTROS HUMEDO Y SECO PARA LA REDUCCION DEL SULFURO DE HIDROGENO EN FLUJOS DE BIOGAS DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA INDOLMASA, REGION UCAYALI 2019

Sustentada el año: 2019

Con la asesoría de: DR. GROBER PANDURO PISCO

En la Facultad de: CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

Carrera Profesional de: INGENIERIA AMBIENTAL

Autorizo la publicación de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali, bajo los siguiente términos: Primero: otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en forma digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones. Segundo: declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas. Tercero: autorizo la publicación,

- [X] Total (significa que todo el contenido de la tesis en PDF será compartido en el repositorio).
- [ ] Parcial (significa que solo la carátula, la dedicatoria y el resumen en PDF serán compartidos en el repositorio).

De mi TESIS de investigación en la página web del Repositorio Institucional de la UNU.

En señal de conformidad firma la presente autorización.

Fecha: 03 / 06 / 2019

Email: lesly.ruiz05@hotmail.com

Firma: 

Teléfono: 934184054

DNI: 70205347

DEDICATORIA

A Dios por bendecirme y guiarme en toda mi vida porque sin él ningún objetivo podría ser cumplido.

A mis padres Gladys y Jack, y a mi hermana Gladys Jackelyn, por ser mi fortaleza y motivación en este camino de mi vida profesional.

Karla Patricia.

A Dios, quien supo guiarme y darme la sabiduría y fuerza necesaria para cumplir mi objetivo trazado en todo el proceso de desarrollo de esta tesis.

A la memoria de mi madre Marlly Reategui Pezo, por ser mi ángel protector.

A mi familia por el apoyo incondicional durante todo el proceso de formación universitaria y desarrollo de esta tesis, al ser más importante en mi vida Jaine Pezo Rodríguez, que siempre fue mi soporte, con sus lecciones, su amo y coraje.

Lesly Melany.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Ucayali, nuestra Alma Mater, por la formación universitaria y los conocimientos adquiridos de los docentes de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales.

A nuestro asesor, Dr. Grober Panduro Pisco y su grupo técnico liderado por el Ing. Jesús Cotrina Barrueta, por los conocimientos impartidos y el apoyo en la toma de datos en campo y la orientación en el manejo de los datos obtenidos para un mejor entendimiento de los mismos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA……..vii
AGRADECIMIENTO……viii
ÍNDICE DE TABLAS……xi
ÍNDICE DE FIGURAS……..xii
RESUMEN……xiv
ABSTRACT……xv
INTRODUCCIÓN 1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 5
1.2.1. Problema General.....5
1.2.2. Problemas Específicos 5
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 5
1.3.1. Objetivo General.....5
1.3.2. Objetivos Específicos 5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....6
2.1. Antecedentes 6
2.2. Planteamiento teórico del problema 7
2.2.1. Biogás.....7
2.2.2. Generación de biogás.....7
2.2.3. Determinación de la composición del biogás 16
2.2.4. Reactor anaerobio 18
2.2.5. Biodigestor 20
2.2.6. Tecnología húmeda en la purificación del sulfuro de hidrógeno 22
2.2.7. Filtros húmedos y secos 25
2.2.8. Métodos biotecnológicos 27
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....29
3.1. Método de la investigación 29
3.2. Ubicación, población y muestra. 29
3.2.1. Ubicación 29
3.2.2. Población……30

3.2.3. Muestra.....30
3.3. Diseño de la investigación..... 30
3.4. Componentes de estudiados..... 31
3.5. Modelo estadístico 31
3.6. Instrumentos de recolección de datos.....31
3.7. Procedimiento de recolección de datos.....33
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 39
4.1. Cantidad de H2S que se absorbe mediante el empleo del filtro húmedo y seco del biogás.....39
4.2. Comportamiento de los filtros desulfuradores en el proceso de absorción de sulfuro de hidrógeno del biogás. 43
4.3. Concentración de metano presente en el flujo de biogás.....46
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....50
5.1. Conclusiones.....50
5.2. Recomendaciones.....50
REFERENCIA BILIOGRÁFICA.....51
ANEXOS 58

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

En el texto:

Tabla 1. Composición del biogás derivado de diversas fuentes…… 7

Tabla 2. Bacterias que participan en el proceso de fermentación durante las cuatro fases…… 13

Tabla 3. Condiciones de funcionamiento típicas en el biodigestor… 15

Tabla 4. Alternativas de medición de concentración…… 17

Tabla 5. Composición típica, medida y deseada del biogás, en función del sustrato utilizado…… 18

Tabla 6. Comparación de medias entre la evaluación inicial y final en la concentración de sulfuro de hidrógeno…… 39

Tabla 7. Comparación de medias entre los tipos de filtros húmedo y secos en la concentración de sulfuro de hidrógeno…….. 40

Tabla 8. Comparación de medias entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (biof 1, biof 2 y biof 3) en la remoción de sulfuro de hidrógeno……. 41

Tabla 9. Comparación de medias entre la evaluación inicial y final en la concentración de metano…… 46

Tabla 10. Comparación de medias entre tipos de filtros húmedo y seco en la concentración de metano……. 47

Tabla 11. Comparación de medias entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (biof 1, biof 2 y biof 3) en la concentración de metano…… 48

En el Anexo:

Tabla 12. Matriz de datos de la evaluación inicial por tipo de filtro…. 59

Tabla 13. Matriz de datos de la evaluación final por tipo de filtro……. 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

En el Texto:

Figura 1. Esquema de las reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos……. 9

Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia porcentual……... 15

Figura 3. Equipos de medición de concentración de biogás……. 18

Figura 4. Tanque séptico, tanque imhoff y laguna anaerobia…… 19

Figura 5. Filtro Anaerobio y UASB y reactor de lecho fluidizado…….. 20

Figura 6. Modelos de biodigestores…… 22

Figura 7. Lavador de gases de la universidad EARTH…… 23

Figura 8. Biofiltro de lecho fijo……. 27

Figura 9. Ubicación de la empresa INDOLMASA…… 29

Figura 10. Esquema del montaje experimenta…… 30

Figura 11. Prototipo del filtro húmedo desulfurador del biogás…… 34

Figura 12. Línea de reducción del sulfuro de hidrógeno del flujo de biogás……. 35

Figura 13. Prototipo del filtro seco desulfurador del biogás……. 36

Figura 14. Sistema de purificación…… 36

Figura 15. Evaluación inicial y final en la concentración de sulfuro de hidrógeno……... 39

Figura 16. Evaluación por tipos de filtros húmedo y secos en la concentración de sulfuro de hidrógeno……. 40

Figura 17. Evaluación entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (biof 1, biof 2 y biof 3) en la remoción de sulfuro de hidrógeno……. 41

Figura 18. Colocación de tiras de politileno en el filtro húmedo…….. 43

Figura 19. Distribución del biol en el filtro húmedo…… 44

Figura 20. Sustratos orgánicos para la colocación en el filtro seco…… 45

Figura 21. Colocación de los filtros húmedo y seco…….. 45

Figura 22. Evaluación inicial y final en la concentración de metano…… 47

Figura 23. Evaluación por tipos de filtros húmedos y secos en la concentración de Metano…… 48

Figura 24. Evaluación entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (biof 1, biof 2 y biof 3) en la concentración de metano…… 49

En el Anexo:

Figura 25. Construcción de filtros desulfuradores……. 61

Figura 26. Filtro seco……. 61

Figura 27. Filtro húmedo con rociadores……. 62

Figura 28. Instalación de filtro húmedo…… 62

Figura 29. Instalación de filtro seco……. 63

Figura 30. Sensor portátil……... 63

Figura 31. Evaluación de los filtros húmedo y seco…… 64

RESUMEN

La investigación se basó en evaluar la capacidad de absorción de los filtros húmedo y seco en la reducción de sulfuro de hidrógeno en flujos de biogás de la planta extractora de aceite de Palma Indolmasa, región Ucayali – 2019.

La investigación fue de alcance experimental de tipo aplicativo, donde se cuantificó la capacidad de reducción del Sulfuro de Hidrógeno. Para el filtro húmedo se recirculó el BIOL proveniente del biodigestor y se variaron las longitudes de las tiras en el mismo y para el filtro seco se variaron las composiciones de relleno de los mismos. Para la cuantificación se utilizó sensores, tanto para las lecturas de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

El filtro con mayor porcentaje de remoción fue el biofiltro 3 (50:25:25 escobajo/compost/ceniza) con 57.38% de sulfuro de hidrógeno. El prototipo 1 de filtro húmedo (longitud de 80 cm), fue el de que tuvo mayor concentración de metano, con 52.15%. El filtro seco es el que mejor comportamiento tiene en la desulfuración del biogás, a mayor porosidad mejora la desulfuración debido a que existe un mejor contacto del biogás contaminado (H_2S), con las bacterias sulfooxidativas.

Palabras claves: Filtro, biogás, sulfuro de hidrógeno.

ABSTRACT

The investigation was based on evaluating the absorption capacity of wet and dry filters in the reduction of hydrogen sulphide in biogas streams from the palm oil extracting plant Indolmasa, Ucayali region - 2018.

The investigation was of experimental scope of application type, where the capacity of reduction of Hydrogen Sulfide was quantified. For the wet filter, the Biol from the biodigester was recirculated and the lengths of the strips were varied therein and for the dry filter the filling compositions thereof were varied. For the quantification sensors were used, both for readings of methane, carbon dioxide and hydrogen sulfide.

The filter with the highest percentage of removal was biofilter 3 (50:25:25 stalk / compost / ash) with 57.38% hydrogen sulphide. The prototype 1 wet filter (length of 80 cm), was that it had a higher methane concentration, with 52.15%. The dry filter is the one that best behaves in the desulphurisation of biogas, the greater the porosity the desulfurization improves because there is a better contact of the contaminated biogas (H2S), with sulfooxidative bacteria.

Keywords: Filter, biogas, hydrogen sulfide.

INTRODUCCIÓN

Según conceptualiza (Gaete, 2007), la digestión anaeróbica es un proceso biológico basado en la transformación de la materia contaminante principalmente a biogás, debido a la acción combinada de distintas especies de microorganismos quienes instauran relaciones sintróficas, que potencian su actividad. Este biogás es la mezcla de gases productos de la digestión anaeróbica, compuesto fundamentalmente de metano (CH_4) entre 60 y 65% y dióxido de carbono (CO_2) entre 35 a 40% del total, estos son los principales gases de efecto invernadero (Noyola, Morgan, & López, 2006), conjuntamente, debido a las reacciones bioquímicas, llevadas a cabo en condiciones de anaerobiosis, pueden estar presentes otros gases como nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), vapor de agua (H_2O), amoniaco (NH_3), ácido sulfhídrico (H_2S) y gases traza que, regularmente, constituyen menos del 1% del volumen total (Noyola, Morgan, & López, 2006).

Sin embargo, continua (Gaete, 2007), generado el biogás, no puede utilizarse directamente, sin la apropiada remoción del H_2S, ya que su uso directo como combustible, no es posible., debido a que son considerados contaminantes el sulfuro de hidrógeno (H_2S) que produce daños a la salud, efectos ambientales adversos y corrosión en la maquinaria industrial y dióxido de carbono (CO_2) que disminuye el poder calorífico de la mezcla gaseosa (Etcharren, 2005); afirmación respaldada por (Coto, Maldonado, Botero, & Murillo, 2007), referente a que la principal problemática del biogás, es la presencia de H_2S, que aun encontrándose en muy baja concentración, es de vital importancia su eliminación, ya que además de ser toxico para la salud humana, es corrosivo, esto impide la utilización como combustible y por consecuencia su valor de uso.

Los impactos de las emisiones gaseosas, provocan a las personas y al medio ambiente, y han incitado al desarrollo de diferentes tecnologías para la purificación de estos efluentes, basados en principios fisicoquímicos y biológicos (Etcharren, 2005).

La investigación planteó la purificación del biogás obtenido a partir de efluentes de la industria de palma aceitera, de tres tratamientos, T1 con 100%

efluentes con 50% CO_2 y 50 ppm de H_2S, T2 con 98.67% efluentes más 1.33% vacaza con 45% CO_2 y 60 ppm de H_2S y T3 con 96% efluentes más 4% vacaza con 60% CO_2 y 78 ppm H2S; estas mezclas de gases que componen el biogás fueron sometidas a un filtro húmedo cuya función es eliminar el H_2S mediante oxidación por acción de bacterias y filtro seco que está compuesto de compost, residuos de escobajo y ceniza, que tiene la misma función.

El objetivo fue evaluar la capacidad de absorción de los filtros húmedo y seco en la reducción de sulfuro de hidrógeno en flujos de biogás.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La investigación “Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás-Departamento de Ambiente y Desarrollo-Honduras”, menciona que en varias Universidades como la Universidad EARTH en Costa Rica han realizado estudios acerca de filtración con materiales orgánicos como el EM-compost y lombricomposta, mostrando mayor eficiencia en la retención de H_2S el EM-compost y el filtro de mayor eficacia utilizado con ambos sustratos fue el de 200 cm de longitud, teniendo resultados satisfactorios con una remoción máxima de un 96.7% de sulfuro de hidrógeno, logrando determinar que tanto el tipo de sustrato, como la longitud del filtro, influyen en la eficiencia de retención, es decir que hay interacción entre ellos. Por ello se puede afirmar que a mayor longitud del filtro, la retención aumenta, en ambos sustratos (Botero *et al.*, 2009).

Otro ejemplo es la investigación realizada por la Corporación Biotec, basada en la utilización de bagazo de caña y piedra pómez inoculado con lodos que contienen bacterias consumidoras de azufre, las cuales son las encargadas junto con el bagazo de eliminar el H_2S. La capacidad máxima de eliminación del bagazo se determinó en 100 g H_2S/m^3 – h aproximadamente y la de la mezcla de bagazo piedra pómez en 80 g H_2S/m^3- h (Chávez *et al.*, 2011). Todas estas investigaciones se realizaron con el propósito de buscar mejores alternativas para sustituir los métodos tradicionales de desulfuración. Dichos métodos tienen una alta eficiencia, pero presentan altos costos de mantenimientos y una reducida vida útil.

Los materiales utilizados en estos métodos, en comparación con los sistemas de filtros de materiales biodegradables (lombricomposta) y

bacterias consumidoras de azufre mencionados anteriormente, aparte de presentar alta eficiencia, presentan un bajo costo de mantenimiento y sus residuos una vez terminada su vida útil son aprovechados para incorporarlos a un ciclo cerrado de nutrientes.

El biogás, producto de la descomposición de materia orgánica, es un gas combustible, el cual, si se purifica y direcciona a través de un sistema de conducción adecuado puede ser usado para cocción de alimentos, calefacción y las múltiples aplicaciones que tiene el gas natural. Sin embargo, el uso del biogás en cualquier aplicación se ve limitado por el alto contenido de dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno (Salazar, 2012).

Los gases ácidos presentes en el biogás influyen negativamente en la eficiencia de combustión del biogás, tales gases son el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno, por lo que el primero disminuye el poder calorífico del biogás y el segundo corroe materiales metálicos en diferentes equipos y maquinaria que van a utilizar este combustible renovable y para evitar estos problemas se debe reducir el sulfuro de hidrógeno a menos de 100ppm (Marchaim, 1992) evitando así que el mismo cause corrosión en las partes metálicas del interior del motor.

Sin embargo, las empresas o personas individuales que utilizan biogás para producir energía eléctrica o calefacción en la crianza de cerdos u otra actividad, sólo se preocupan por la eliminación del sulfuro de hidrógeno que reduce la vida de los motores de combustión interna, subestimando el daño que puede provocar la liberación del CO_2 al ambiente.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema General

- ¿Cuál es la capacidad de absorción de los filtros húmedo y seco en la reducción de sulfuro de hidrógeno en flujos de biogás?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Qué cantidad de sulfuro de hidrógeno se podrá reducir mediante el empleo del filtro húmedo y seco del biogás?
- ¿Cuál es el comportamiento del filtro húmedo y seco en el proceso de absorción del sulfuro de hidrógeno del biogás?
- ¿Cuál es la concentración de metano presente en el gasómetro antes y después del tratamiento en el flujo de biogás?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar la capacidad de absorción de los filtros húmedo y seco en la reducción de sulfuro de hidrógeno en flujos de biogás.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar cantidad de sulfuro de hidrógeno absorbido mediante el empleo del filtro húmedo y seco del biogás.
- Evaluar el comportamiento de los filtros desulfuradores en el proceso de absorción de sulfuro de hidrógeno del biogás.
- Determinar la concentración de metano presente en el flujo de biogás.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el biogás varían mucho de acuerdo al tipo de inóculo que sea suministrado y las cantidades de este como también del tipo de alimentación que recibe el ganado vacuno.

Hubo un proyecto que utilizó soluciones de endulzamiento, al cual se tuvo de referencia y acceso a la información es el realizado por el alumno (Salazar, 2012) el cual al mismo tiempo tuvo información del proyecto "Filtración de CO_2 y H_2S presentes en el biogás usado en plantas eléctricas de potencia" (conocido como proyecto MOPESA), realizado en México, en asociación del Tecnológico de Monterrey y el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología-COMECYT, con la participación de la empresa mexicana Motores Power S.A.. La universidad de EARTH en Costa Rica ha realizado estudios acerca de filtración con materiales orgánicos como el EM-compost y lombricomposta. De los dos sustratos utilizados, el filtro que reduce en mayor cantidad el sulfuro de hidrógeno es el EM-compost y el filtro de mayor eficacia utilizado con ambos sustratos fue el de 200 cm de longitud en donde tuvieron resultados satisfactorios con una remoción mayor al 90 por ciento de sulfuro de hidrógeno. En el proyecto se determinó que tanto las longitudes de los filtros como el tipo de sustrato, influyen en la eficiencia de reducción, por lo que se puede decir que a mayor longitud del filtro mayor será su reducción (Botero *et al.,* 2009).

2.2. PLANTEAMIENTO TEÓRICO DEL PROBLEMA

2.2.1. Biogás

El biogás es un combustible con contenido energético medio (~22MJ/kg), derivado de la descomposición de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas (Horikawua, 2001).

El poder calorífico del biogás es proporcional a su concentración de metano. Para ser usado como combustible en los motores de combustión interna, se ha recomendado una concentración de CH_4 mayor al 90% (Harasimowicz, 2007). Sin embargo, el CO_2 tiene una concentración aproximada de 40%. Esta alta concentración reduce el poder de salida del motor proporcionalmente a su concentración, limitando el uso del biogás en plantas de generación eléctrica impulsado por motores de combustión interna (Marchaim, 1992).

Tabla 1. Composición del biogás derivado de diversas fuentes.

	Composición del biogás derivado de diversas fuentes				
Gases	**Desechos agrícolas**	**Lodos Cloacales**	**Desechos industriales**	**Rellenos sanitarios**	**Propiedades**
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%	Combustible
CO_2	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%	ácido, asfixiante
Vapor H_2O	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	corrosivo
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	combustible
H_2S	100-7000ppm	0-1%	0-8%	0.5-100ppm	Corrosivo, olor, tóx.
Amoniaco	trazas	Trazas	Trazas	trazas	corrosivo
CO	0-1%	0-1%	0-1%	trazas	tóxico
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%	inerte
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	corrosivo
Orgánicos	trazas	Trazas	Trazas	5ppm	corrosivos, olores

2.2.2. Generación de biogás

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas

reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

- Hidrólisis
- Etapa fermentativa o de acidogénesis
- Etapa acetogénica
- Etapa metanogénica

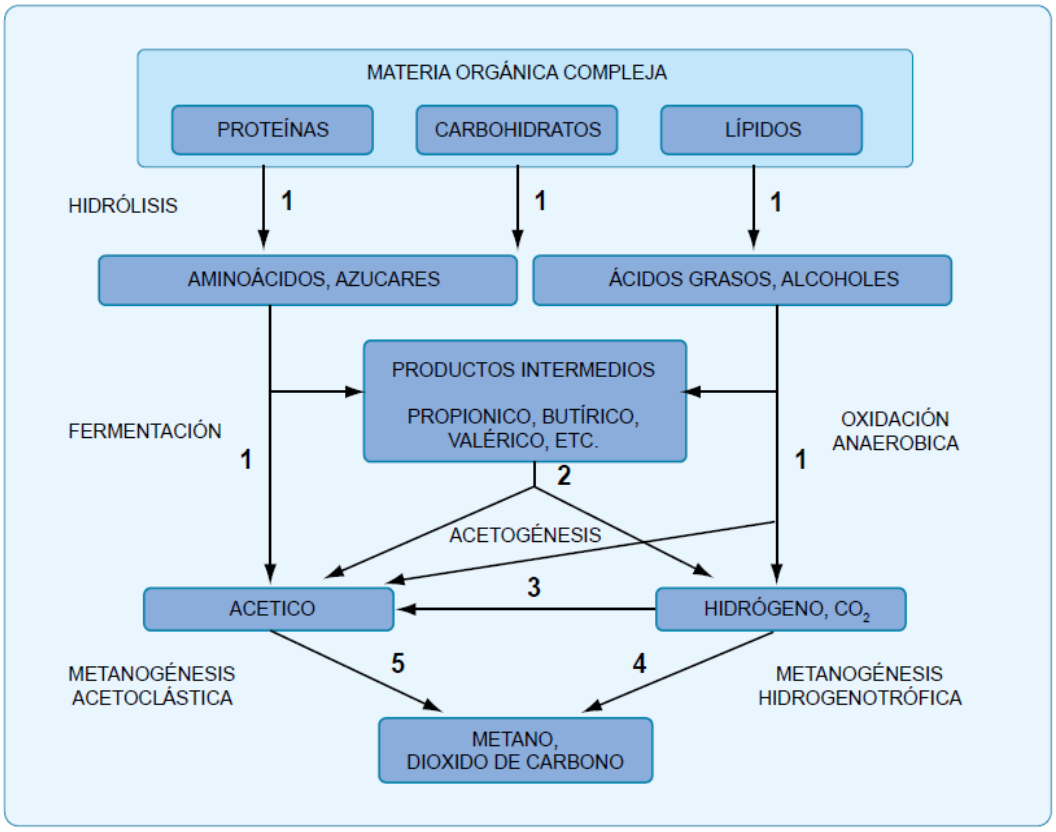
La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzima extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azucares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicos dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios (FAO, 2011).

Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H_2 y CO_2.

Hidrólisis

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por lo tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por los microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.



Fuente. *(Pavlostathis, 1991)*

Figura 1. Esquema de las reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos.

Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por

la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pretratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores (FAO, 2011).

Etapa fermentativa o acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los

grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos (FAO, 2011).

Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum.*

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (FAO, 2011).

Etapa metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2, formiato, metanol y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariotas.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y ácido fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son Methanosarcina y Methanothrix. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior (FAO, 2011).

Tabla 2. Bacterias que participan en el proceso de fermentación durante las cuatro fases.

Taxonomía	Especies	Descripción	Metabolismo
Género: Acetobakteriem	*A. woodii* *A. paludosum*	El género Acetobacter comprenden u grupo de bacilos Gram negativos móviles que realizan una oxidación incompleta de alcoholes, produciendo una acumulación de ácidos orgánicos como productos finales.	Reducen autotróficamente compuestos poliméricos, oligómeros, monómeros y CO2, utilizando el hidrógeno como fuente de electrones. Estos microorganismos hacen posible la descomposición de los ácidos grasos y compuestos aromáticos.
Género: Eubacterium	E*. rectale* *E. Siraeum* *E. Plautii* *E. Cylindroides* *E. Brachy* *E. Desmolans* *E. Callandrei* *E. Limosum*	El género Acetobacter comprenden u grupo de bacilos Gram negativos móviles que realizan una oxidación incompleta de alcoholes, produciendo una acumulación de ácidos orgánicos como productos finales.	La mayoría de las Eubakteria sacaroliticas producen buritato como el principal producto de su metabolismo. Muchas especies son capaces de descomponer sustratos complejos a través de mecanismos especiales. Algunas especies se desarrollan autotróficamente, por lo tanto, son capaces de cumplir funciones específicas en la descomposición anaeróbica.

Fuente: (Isam, 2009).

Bacterias que participan de la hidrólisis

Los microorganismos de muchos géneros son los responsables de la hidrólisis. Entre estos destacan: Bacteroides, Lactobacillus, Propioni-bacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megasphaera, Bifidobacterium (FAO, 2011).

Bacterias que participan de la acidogénesis

La mayoría de los microorganismos acidogénicos también participan de la hidrólisis. El género Clostridium, Paenibacillus y Ruminococcus están presentes en todas las fases del proceso de fermentación, pero son

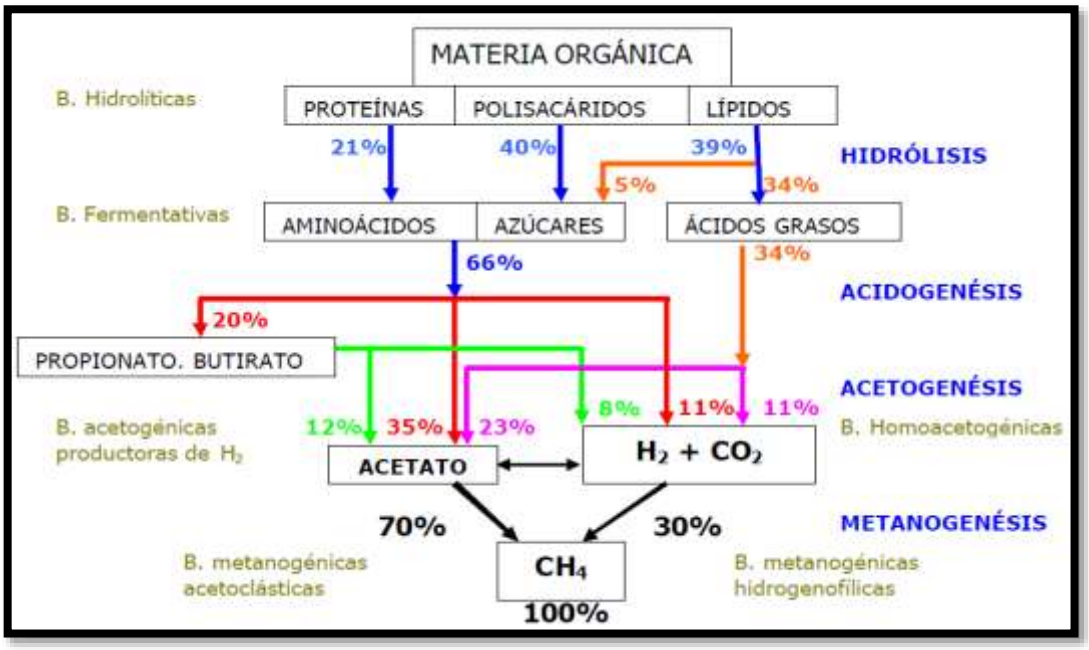
dominantes en la fase acidogénica. El grupo Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides representa el segundo grupo más grande de microorganismos durante las dos primeras fases de la descomposición. Sin embargo, en la fase metanogénica representan menos del 5% del total de microorganismos. Esto indica que estos grupos son los principales responsables de la degradación de compuestos monoméricos (FAO, 2011).

Bacterias que participan de la acetogénesis

Estas bacterias sólo pueden sobrevivir en simbiosis con el género que consume hidrógeno. Todos los microorganismos acetogénicos tienen un período de regeneración de hasta 84h. Las bacterias acetogénicas reductoras de sulfato son capaces de degradar lactato y etanol, pero no son capaces de degradar ácidos grasos y compuestos aromáticos (FAO, 2011).

Bacterias que participan de la metanogénesis

La última fase de la descomposición anaeróbica se encuentra dominada por un grupo especial de microorganismos, las Arqueas metanogénicas. Estas se caracterizan a través del co-factor F420, el cual actúa en presencia de hidrogenasas como transportador de H_2. Este puede detectarse por su autofluorescencia en un microscopio óptico. Las metanogénicas activas aparecen en la segunda fase de la fermentación, la fase de acidogénica. Sin embargo, obviamente el número de Arqueas metanogénicas aumenta en la fase metanogénica Las principales especies están representadas por Methanobacterium, Methanospirillum hungatii, y Methanosarcina (FAO, 2011).



Fuente.(MADIGAN & Mertinko, 1997)

Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia porcentual.

Según la Figura 2 se observa que solamente cerca del 30% de la materia orgánica afluente es convertida a metano por la vía hidrogenofílica, por lo tanto, una condición necesaria para obtener una óptima remoción de la materia orgánica en un sistema anaerobio, es que a la metanogénesis acetoclástica se desarrolle eficientemente.

Tabla 3. Condiciones de funcionamiento típicas en el biodigestor.

Parámetro	Valor
Temperatura adecuada de funcionamiento	20-30 °C
Tiempo de retención	40-100 días
Presión de operación	1 psi g. La alimentación al motor se da por la succión del mismo
Generación de biogás	0.3-0.5 de m^3 de biogás por m^3 de digestor 0.2-0.4 m^3 de biogás por kg de biomasa seca
Producción para una vaca	9 a 15 kg de estiércol/día = 0.4 m^3 gas/día
Producción para un cerdo	2 a 3 kg de estiércol/día = 0.15 m^3 gas/día

Fuente. *(Silva, 2007)*

2.2.3. Determinación de la composición del biogás

La composición del biogás varía dependiendo de la materia orgánica degradada, las condiciones del sistema y procesos utilizados para la producción del mismo. Es por ello que se debe realizar un diagnóstico adecuado de la composición típica de este combustible. Esta etapa es clave en todo proyecto destinado a la generación de electricidad con biogás. La Tabla 4 compara los métodos de medición más adecuados para la determinación de concentración en gases. Para la selección de la mejor alternativa de medición se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- Facilidad para le medición en campo
- Exactitud y precisión
- Medición simultánea de varios componentes
- Bajo costo

Se ha observado que las concentraciones de H_2S en las soluciones de MEA son muy sensibles a la presión y temperatura, lo que hace de los análisis por espectrofotometría o cromatografía no apropiados para esta aplicación, es por ello que no se ha podido reportar la capacidad de absorción de H_2S y CO_2 de la MEA (Huertas, 2010).

Tabla 4. Alternativas de medición de concentración.

Método de medición	Funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Química analítica Titulación con yodo Absorción con azul de metileno	Absorción del gas de interés. Tratamiento del precipitado con solución intermedia. Titulación y medición por cambio de color.	Medición precisa a bajas concentraciones.	Medición en laboratorio. Proceso complicado y lento.
Espectro-fotometría	Medición de la cantidad de luz absorbida de los componentes. Comparación con solución estándar.	Ampliamente utilizado. Precisión y exactitud	Medición en laboratorio.
Cromatografía	Se impulsa la muestra de un gas por medio de un gas portador. La muestra pasa por una columna y se mide el tiempo de retención que es particular para cada gas.	Precisión y exactitud. Separación de los componentes del gas de la muestra.	Altos costos. Medición en laboratorio.
Analizadores Portátiles de gas	Se hace pasar una muestra de gas a través de un sistema de medición. Se toma lectura de la concentración de la muestra.	Método simple de medida. Precisión.	Bajos rangos de medida. Costos moderados.

Fuente. *(Huertas, 2010)*

Por lo mencionado anteriormente podemos decir que la utilización de analizadores portátiles podría ser la mejor opción para el análisis de la concentración típica de biogás antes y después del proceso de reducción del sulfuro de hidrógeno. En el proyecto de investigación se utilizó sensores.



Fuente: *A) Sensor de gas, Seeed Studio B) sensor de CO_2, BENETECH C) sensor de H_2S, PCE Instruments.*

Figura 3. Equipos de medición de concentración de biogás.

Tabla 5. Composición típica, medida y deseada del biogás, en función del sustrato utilizado.

Gases	Desechos agrícolas	Lodos de depuradora	Desechos industriales	Gas de vertedero	Composición deseada
CH_4	50-80%	50-80%	50-70%	46-65%	>90%
CO_2	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%	<10%
Vapor de agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Irrelevante
H_2	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	Irrelevante
H_2S	100 - 70000ppm	0-1%	0-8%	0.5-1000ppm	<100ppm
NH_3	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	Irrelevante
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas	Irrelevante
N_2	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%	Irrelevante
O	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	Irrelevante
Comp. orgánica	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	Irrelevante

Fuente: (Salazar, 2012).

2.2.4. Reactor anaerobio

En términos generales, se registran tres generaciones de reactores anaerobios, las cuales se caracterizan porque en cada generación se reduce el tiempo de retención hidráulico (TRH) y mejora el contacto entre

el lodo y el sustrato, lo cual significa menores volúmenes del reactor, costos más bajos, sistemas más estables y de más fácil operación (Díaz-Báez, 2002; Van, 1994).

Reactores de primera generación: El tiempo de retención celular es igual al TRH, por lo que se requieren TRH muy altos, existe un contacto inadecuado entre la biomasa y la materia orgánica - Lagunas Anaerobias, Tanque Séptico, Tanque Imhoff (Ver Figura 3a).

Reactores de segunda generación: Se caracterizan por el hecho de que tienen mecanismos para retención de los lodos, independizando el tiempo de retención celular del TRH. Los dos mecanismos más aplicados son a) inmovilización del lodo por adhesión a material sólido - Filtros anaerobios de flujo ascendente y descendente; b) separación líquido-sólido del efluente, con el retorno de los sólidos separados al reactor - UASB, el cual usa un sedimentador interno (Ver Figura 3b).

Reactores de tercera generación: Para optimizar el contacto entre el sustrato y la biomasa, esta se adhirió con partículas de arena, alúmina o plástico, las cuales se expanden - Reactores de lecho fluidizado o expandido (Ver Figura 3c).

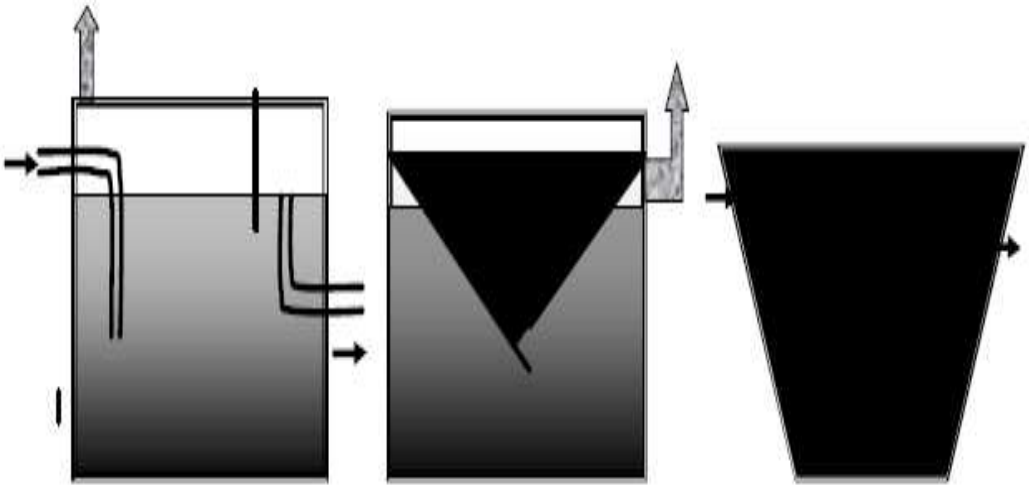


Figura 4. Tanque séptico, tanque imhoff y laguna anaerobia.

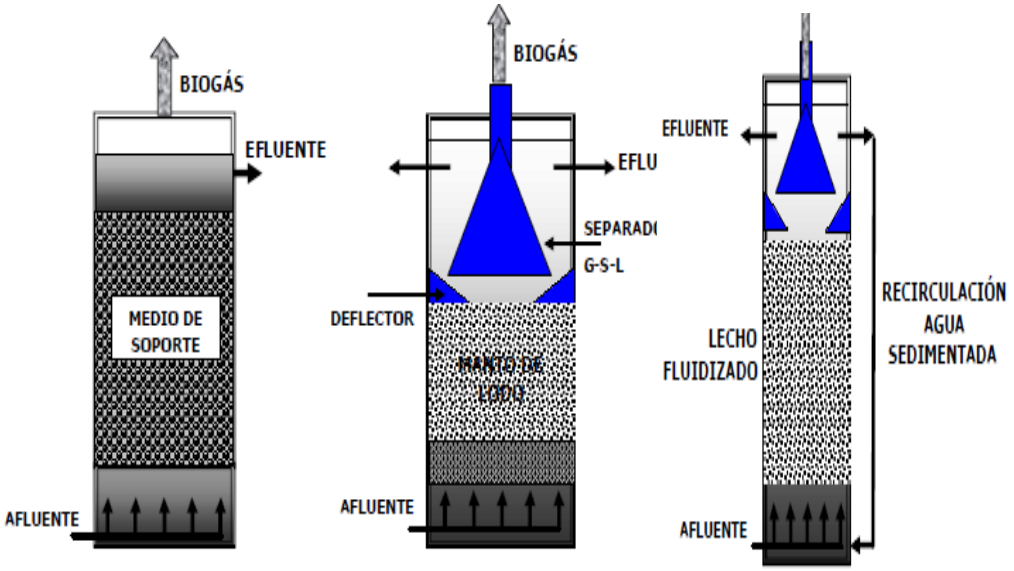


Figura 5. Filtro Anaerobio y UASB y reactor de lecho fluidizado.

2.2.5. Biodigestor

El biodigestor es una alternativa sencilla y práctica que sirve para aprovechar los desechos orgánicos que se producen en las fincas. El proceso permite convertir el estiércol de los animales y algunos rastrojos de cosechas en gas metano para cocinar y en abonos para cultivos, contribuyendo en la economía familiar, al bajar los costos de producción mejorando el ambiente. Existen diferentes tipos de biodigestores; varían según los desechos a tratar, condiciones del terreno, etc. El cual está formado de 5 partes (Dagoberto, 2005):

- **Pila de carga:** Es una pileta pequeña donde se deposita y se mezclan los materiales que alimentan el tanque digestor. Debe estar a mayor altura que el nivel de carga del digestor (tanque totalmente lleno).

- **El digestor:** Es un tanque alargado excavado en la tierra, dentro de él los desechos son descompuestos. Por un extremo se conecta el tubo de pila de carga y por el otro la pila de descarga.

- **Pila de descarga:** Sirve para retirar los residuos provenientes del tanque que fueron digeridos. Está conectado a menor nivel que la pileta de carga.

- **Cubierta plástica:** Se coloca sobre el tanque digestor, cierra la entrada de aire al interior de mismo y almacena el gas producido.

- **Tubería, válvula y llave de paso:** Se conecta una tubería en la parte superior de la cubierta plástica que conduce el gas donde será aprovechado; además, se conecta una sencilla válvula de seguridad que evita la sobre presión interna en la cubierta plástica y elimina el agua condensada en la tubería. También es importante una llave que permita el paso del gas cuando se necesita.

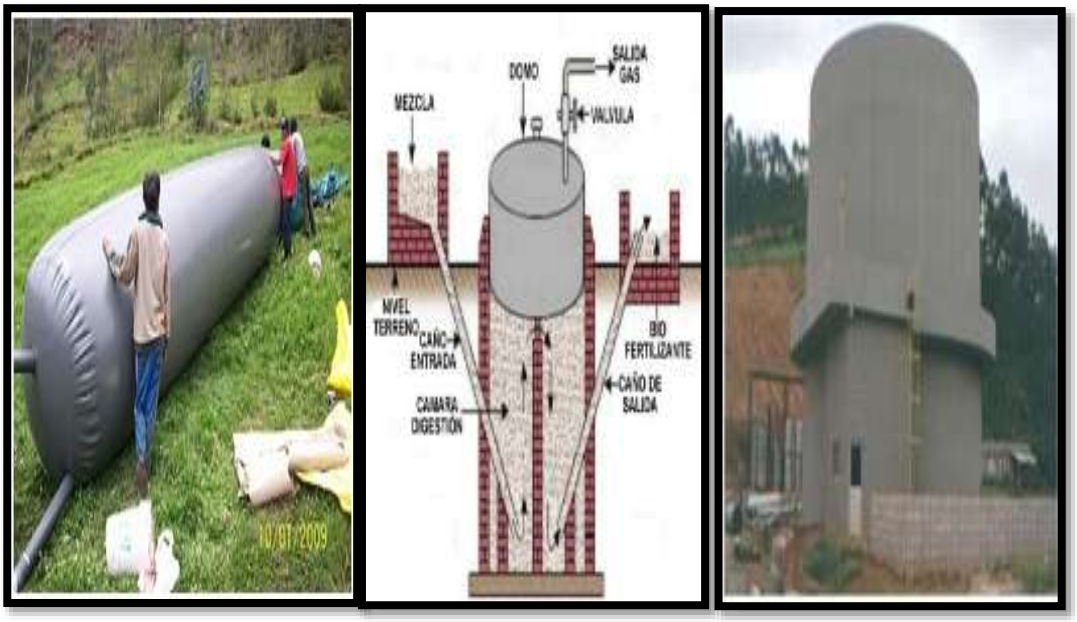
Tipos de biodigestores

La siguiente clasificación es según el periodo de alimentación (Schlaefli, 2010):

- **Sistema Discontinuo**
  Conocidos también como de carga ya que se carga solo una vez en forma total y luego se cierra herméticamente por unos 20 a 50 días, donde se descarga después que deje de producir gas. El modelo tipo Batch es el más conocido de este sistema.

- **Sistema Semicontinuo**
  Son pequeños o de mediana escala, de uso urbano o rural. Presenta buena eficiencia de producción de biogás diaria. Los modelos que destacan en este sistema son del tipo hindú, el tipo chino y otro de menor costo del tipo manga de polietileno.

- **Sistema Continuo**
  Tienen flujo constante de biomasa activa en su interior. Son grandes sistemas sofisticados, donde emplean equipos comerciales para alimentarlo, darles calefacción, agitación y control.



Fuente: (Antonio, 1996)

Figura 6. Modelos de biodigestores. a) Biodigestor continuo horizontal, b) Biodigestor Semicontinuo Hindú, c) Biodigestor discontinuo Batch.

2.2.6. Tecnología húmeda en la purificación del sulfuro de hidrógeno

Según (Víquez, 2010), esta remoción húmeda es otra forma de remover el H_2S en el biogás es utilizando sustratos líquidos. Una de las opciones es el uso de agua, pues el H_2S presenta una capacidad interesante de disolución. Para esto, se utilizan equipos llamados “lavador de gases” (Figura 7), la cual hace pasar la corriente de biogás contra una “lluvia” de agua. Parte de los inconvenientes para su aplicación en granjas agropecuarias es que el biogás debe estar comprimido, por lo que se incrementan los costos de implementación. Adicionalmente, para crear esta “lluvia” de agua, se requieren bombas, lo que incrementa los costos de mantenimiento. Otras sustancias empleadas en la remoción de H_2S son las triazinas selectivas a H_2S. Esta reacción química es sumamente eficiente en la remoción de este gas. Sin embargo, las triazinas también se utilizan como base para la fabricación de herbicidas, dejando al final, luego de su saturación, un volumen importante de tóxico no aprovechable en la finca, pero con grandes riesgos ambientales. (Figura 7). Para esto, se utiliza el mismo concepto de “lavado de gases”; pero en lugar de emplear agua o la

triazinas selectivas a H_2S, se usa agua disuelta en carbonato de calcio. Químicamente, la reacción que ocurre es la siguiente:

Ecuación 1. Reacción química de carbonato de calcio con sulfuro de hidrógeno (Sotirchos, 1998).

$$\mathbf{CaCO_3 + H_2S \rightarrow CaS + CO_2 + H_2O}$$

Lo anterior significa que por cada mol de H_2S, que se quiera filtrar, se requiere de 1 mol de $CaCO_3$. En otras palabras y luego de una serie de cálculos, por cada m^3 de biogás, que contenga 1000 ppmv de H_2S, se necesitan 4,5 g de $CaCO_3$ puro. Para una granja que produzca 23 m^3 de biogás diariamente y que contenga no más de 1000 ppmv de H_2S, en el biogás, se estaría requiriendo 36,5 kg de carbonato de calcio, anualmente. Es una alternativa que ha estado en estudio; sin embargo, el biogás requiere estar en presiones de 200 a 300 psi (libras por pulgada al cuadrado); además de necesitarse equipo para disolver el carbonato de calcio y movilizarlo por el biogás. También se utilizan sustancias líquidas para remover H_2S, a nivel industrial, tales como: lodos de óxido de hierro y zinc, soluciones de hierro quilatado y otros compuestos básicos (NaOH en forma acuosa y de compuestos de endulzamiento).



Figura 7. Lavador de gases de la Universidad EARTH.

Otras formas de remoción de H_2S

Han existido evaluaciones con el uso de microorganismos, que consuman el sulfuro de hidrógeno a su paso, como también la utilización de materiales alternativos como composta, suelo para filtros “secos”, inclusive aditivos, que se le adicionen al biodigestor, para evitar la liberación de H_2S; sin embargo, aún no se tienen experiencias exitosas para granjas agropecuarias. En términos generales, existen cientos de tipos de tecnologías para la remoción del H_2S, en el biogás. Lastimosamente, mucha de esta tecnología ha sido diseñada para la industria petrolera, lo que deja al sector agropecuario fuera del alcance económico y tecnológico. Lo anterior, aplica, en su mayoría, para sustratos líquidos, que requieren de un nivel tecnológico elevado, así como mayores costos de implementación (bombas y sopladores). La buena noticia es que los sustratos sólidos representan una alternativa más viable para el sector agropecuario. En todo caso, para el diseño de un filtro de H_2S, con sustrato sólido, se deben conocer y dominar los siguientes puntos:

- **Flujo de biogás (m^3/hora):** Esto dependerá del equipo que se utilice para aprovechar el biogás. Por ejemplo, una planta de 20 kW, que funcione a plena carga, tendrá un flujo/consumo de 10 m^3/hr, mientras que una cocina pequeña estaría consumiendo unos 300 L/hr.

- **Tiempo de residencia mínima en contacto con sustrato para que ocurra la reacción química:** Toda reacción química requiere de un tiempo mínimo para que ocurra. Por tanto y dependiendo del sustrato, se debe conocer cuál es el tiempo mínimo que el biogás, con cierta cantidad de H_2S, debe estar en contacto con el sustrato para diseñar un filtro.

- **Temperatura:** La temperatura del biogás tendrá un efecto importante sobre la reacción química, además, la misma está involucrada con la Ley ideal de los gases, lo que hace cambiar el

volumen del biogás y esto tendría efecto sobre el tiempo de residencia mínima en el filtro.

- **Altura de la cama de sustrato:** Ésta puede variar, dependiendo del sustrato, por donde fluirá el biogás.

- **Contenido de humedad:** Cada sustrato requiere de diferentes porcentajes de humedad para reacciones químicas adecuadas e ideales.

- **pH:** Cada sustrato requiere de pH diferentes para la reacción química.

- **Presión:** Tiene efecto sobre el volumen de biogás y capacidad de filtración.

- **Contenido de H_2S en el biogás:** La concentración de H_2S en el biogás, es de suma importancia para saber cuántos moles o gramos de H_2S, se deberán remover diaria o anualmente.

La empresa VIOGAZ S.A. ha venido trabajando en el desarrollo e implementación de un filtro, diseñado para remover H_2S en el biogás, utilizando como base el concepto de la ecuación 1. Para este sustrato, ya se conoce y se dominan sus características tanto físicas como químicas, para diseñar un filtro con eficiencias de hasta 95% de remoción del H_2S, en el biogás. Su diseño se basa en flujos, presiones, temperaturas, concentraciones iníciales de H_2S, usos del biogás, entre otros (Víquez, 2010).

2.2.7. Filtros húmedos y secos

La producción de biogás a base de los lodos de la extracción de aceite de palma genera residuos tanto en la extracción de aceite como en

la producción de biogás, estos mismos residuos pueden ser utilizados en la purificación de uno de los gases ácidos del biogás. El sulfuro de hidrógeno contenido en este puede retenerse mediante los filtros húmedo y seco, el primero utiliza el biol con láminas de sésil colocadas en forma de suspensión, el cual es un efluente de los biodigestores, el segundo se encuentra compuesto de escobajo, compost y cenizas. Estos métodos de retención se utilizan de forma conjunta para la purificación del biogás, específicamente para la remoción del sulfuro de hidrógeno. Este sistema de filtrado aprovecha los residuos para la purificación del biogás lo cual disminuye los costos del mismo y actualmente se utiliza en las plantas de producción de biogás de Colombia.

Biofiltros de lecho fijo

Los microorganismos al crecer, forman parte de la biopelícula adherida a la superficie del lecho. Cuando la corriente de aire contaminado pasa a través del lecho, debido al gradiente de concentración entre el aire y la biopelícula, los contaminantes son absorbidos por el lecho. De esta manera la biomasa activa degrada estos contaminantes como fuente de nutrientes y/o energía (Etcharren, 2005).

En los biofiltros, el tipo de biorreactor más común, por lo general se emplean lechos o material de empaque, fabricados de materiales orgánicos (materiales cortados de parques y jardines, turba, corteza, astillas de madera o abono) (EPA, 2004).

El material orgánico cumple la función de entregar soporte (medios sobre los cuales viven los microbios) y en algunos casos proporcionar nutrientes necesarios para los microorganismos (Linarez *et al.,* 2017).

La eficiencia de remoción de partículas, dependerá de varios factores relacionados con el diseño de los biofiltros y las propiedades de los contaminantes presentes en el gas a tratar. El coeficiente de Henry y

las solubilidades en agua son propiedades de los contaminantes que deben considerarse para lograr una remoción eficiente. La eficiencia de remoción del H2S, lograda por los biofiltros oscila entre un 90 y un 100%. La eficiencia de remoción lograda por los compuestos orgánicos volátiles (VOCs), en general oscila entre un 20 a un 90%, incluso con aquellos contaminantes fácilmente biodegradables como el tolueno y la acetona.

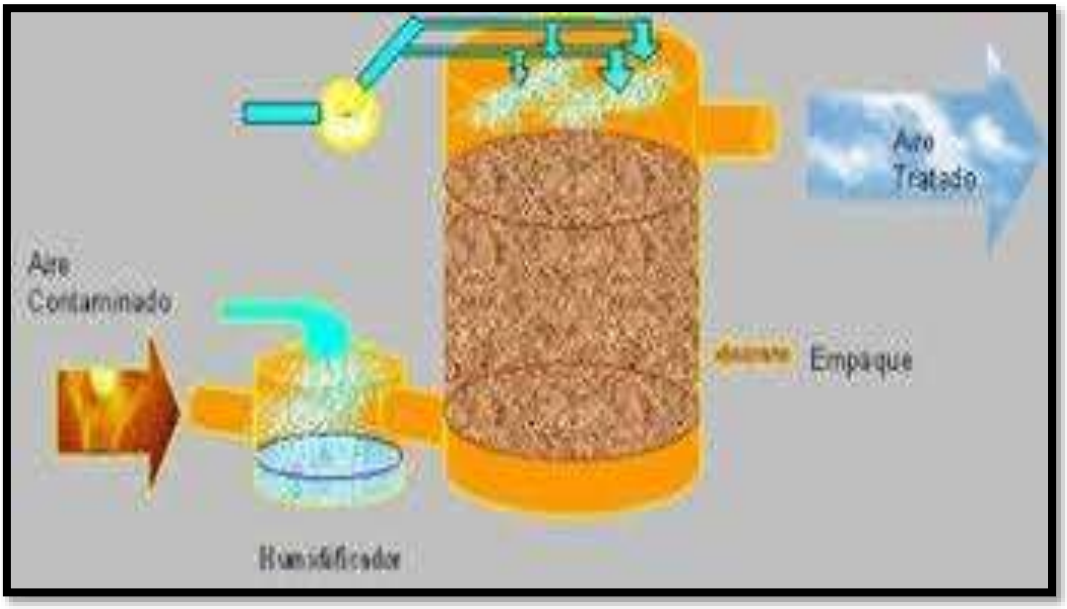


Figura 8. Biofiltro de lecho fijo (Linarez *et al.,* 2017).

2.2.8. Métodos biotecnológicos

Los procesos biológicos enfocados a la purificación de gases son generalmente de oxidación, dando como resultado dióxido de carbono, agua, sulfato y nitrato (Gonzales, 2010).

El uso de microorganismos (Soreanu, 2005) en la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, se basa en la oxidación microbiológica de H_2S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental (S°) o sulfatos (SO_4^{-2}), fijando CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro. De esta forma, se puede lograr un enriquecimiento en metano, al remover CO_2 y eliminar el elemento (H_2S) más corrosivo y limitante respecto a usos posteriores del gas purificado.

Dependiendo de la cepa responsable (Madigan, 2006), se podría convertir sulfuros a azufre o alternativamente a sulfato, como se indica en las ecuaciones siguientes.

Ecuación 2. Reacciones de cepas con el sulfuro de hidrógeno.

$$\mathbf{CO_2 + 2H_2S \rightarrow [CH_2O] + 2S^{\circ} + H_2O}$$

$$\mathbf{2CO_2 + 2H_2S + 2H_2O \rightarrow 2[CH_2O] + H_2SO_4}$$

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación tiene alcance experimental de tipo aplicativo, donde se cuantificó la capacidad de reducción del sulfuro de hidrógeno. Para el filtro húmedo se recirculó el biol proveniente del biodigestor y se variaron las longitudes de las tiras en el mismo y para el filtro seco se han variado las composiciones del relleno de los mismos. Para la cuantificación se utilizó sensores, tanto para las lecturas de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

3.2. UBICACIÓN, POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Ubicación

El estudio se realizó en las instalaciones de la planta extractora de aceite de palma Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A. (INDOLMASA), ubicada en el distrito de Neshuya km. 62 de la C.F.B coordenadas UTM: 502813 ESTE y 9043943.5 NORTE, provincia de Padre Abad.



Figura 9. Ubicación de la empresa INDOLMASA.

3.2.2. Población

La población fue el biogás que produce la planta de extracción de aceite de palma Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A. (INDOLMASA), en cada biodigestor.

3.2.3. Muestra

La muestra fue la cantidad en m^3 de biogás diaria que pasa por los filtros de reducción de sulfuro de hidrógeno, tanto para el filtro húmedo como para el filtro seco, representado por 10 m^3 de biogás, proveniente de los biodigestores instalados en la planta.

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación utilizó el Diseño Completamente al Azar DCA, Experimental de tipo Experimentos Puros con grupo de Control, donde se conjugó las variables de las composiciones de relleno para el filtro seco, la longitud de las tiras (hospedero) para el filtro húmedo con el biogás proveniente de 1 biodigestor, el cual es el más eficiente, distribuidos en 3 tratamientos con 3 repeticiones, haciendo un total de 18 unidades experimentales considerados tanto para el filtro húmedo como en el filtro seco.



Figura 10. Esquema del montaje experimental.

Para conocer los límites de significancia, los resultados fueron sometidos a las pruebas estadísticas de Tukey.

3.4. COMPONENTES DE ESTUDIADOS

3.4.1. Variables Independientes

Filtros: F. húmedo y F. seco.

3.4.2. Variables Dependientes

Reducción de sulfuro de hidrógeno, variación de la concentración de metano.

3.5. MODELO ESTADÍSTICO

El modelo Estadístico adoptado para la investigación fue la siguiente:

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

Y_{ij} = es la observación de la *j-ésima* u.e. del *i-ésimo* tratamiento,
μ_i = es la media del i-ésimo tratamiento,
ε_{ij} = es el error experimental de la unidad ij.

Esquema del ANVA

F. V	Grados Libertad
Tratamiento (t -1)	3
Error (n – t)	8
Total (n – 1)	11

3.6. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Materiales, equipos y herramientas

- Tubos de 4 pulgadas.
- Tapa hembra

- Tapa macho
- Uniones simples
- Unión universal
- Cinta aislante
- Codos
- Pegamento
- Alambre
- Adaptadores
- Tubos de 1 pulgada
- Buyones de 20 litros
- Manguera
- Llave de paso
- CD
- Duchas
- Bolsas de plástico
- Cámara fotográfica
- Tableros
- Grabadora
- Analizador de gases portátil
- Explosímetro

Insumos

- Fibra de mesocarpio de palma
- Cenizas de escobajo
- Humus
- Biol
- Biogás

Equipos

- Laptop e internet
- Software paquete Office
- Impresora
- Papel bond

- Lapiceros

Otros

- Camioneta
- Motocicleta
- Combustible
- Motocarro

3.7. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.7.1. Determinación de la cantidad de H_2S absorbido mediante el empleo del filtro húmedo y seco

Filtro Húmedo

El principio del filtro húmedo fue la absorción biológica del sulfuro de hidrógeno través de bacterias oxidativas del sulfuro de hidrógeno en azufre elemental, se construyó filtros de tubos de 4” de PVC de 120, 100 y 80 cm de longitud, cintas polietileno, manómetros y Biosol.

La torre de desulfuración está internamente rellenadas de cintas de polietileno, material inerte que permitió el crecimiento de las bacterias sulfooxidativas activas de los efluentes del biodigestor (Biosol), estas se distribuyeron a través de un rociador colocado sobre las cintas las cuales permitieron la distribución de la solución bacteriana activa proveniente de los lodos y favorecer el crecimiento de las colonias bacterianas sobre estas cintas; el biogás ingresó por la parte inferior del filtro y recorrió a través de las cintas cubiertas con las bacterias y en contracorriente con el fluido de biol, recibiendo de esta manera, doble tratamiento, por oxidación producido por las bacterias sulfooxidantes y lavado por contracorriente; en la parte superior está ubicada la salida del biogás tratada. Los controles de concentración de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás y el control depresión con los manómetros se realizó a la entrada y salida del filtro

húmedo.

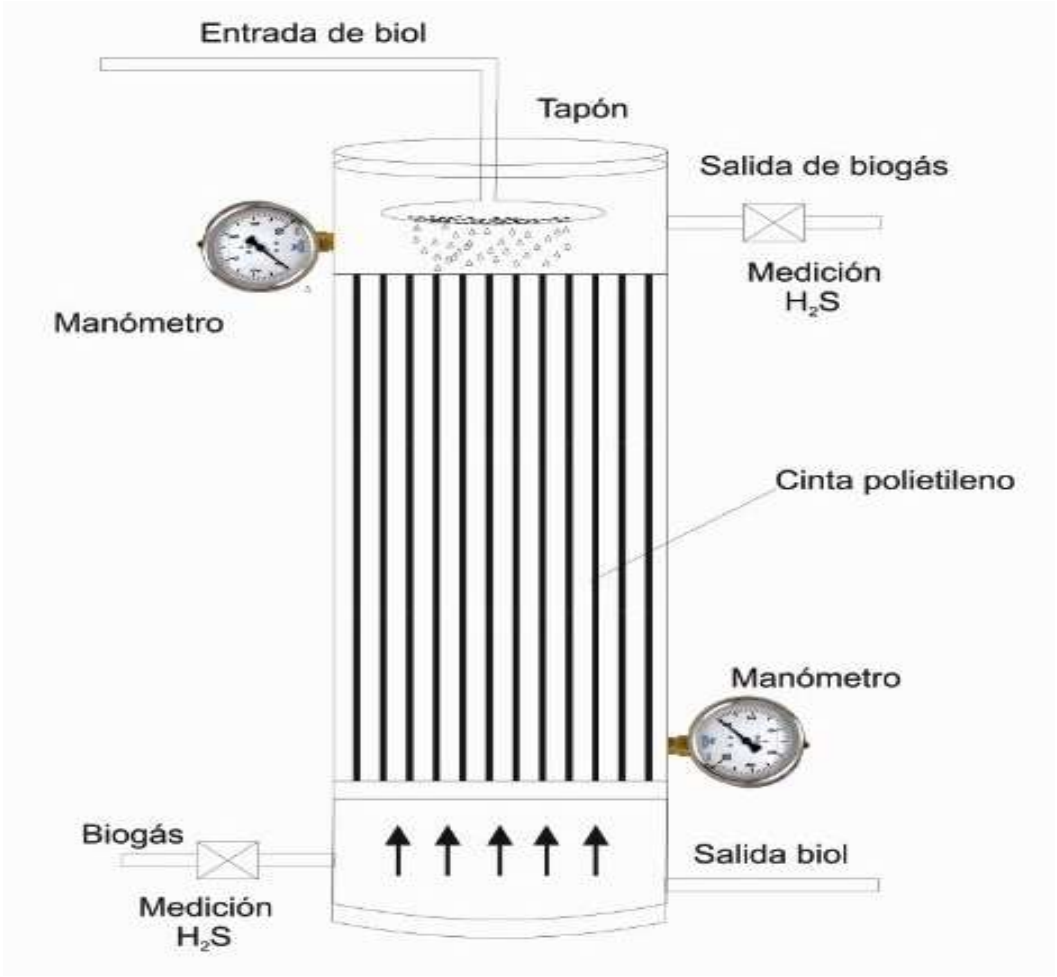


Figura 11. Prototipo del filtro húmedo desulfurador del biogás.

Filtro Seco

La retención del sulfuro de hidrógeno se fundamentó en la actividad microbiana presente en el sustrato, los componentes del filtro seco están constituido por residuos sólidos de la planta extractora de aceite de palma, cada biofiltro está compuesto por la siguiente fórmula: biofiltro 1 (25:25:50), biofiltro 2 (25:50:25) y biofiltro 3 (50:25:25), de los siguientes componentes: escobajo, compost y ceniza respectivamente. El filtro está construido de tubo PVC de 4” con una longitud de 1.2 metros, malla plástica de 4” tapón PVC de 4”.

El prototipo de la torre de desulfuración seca internamente está rellenada por los biofiltros orgánicos, estas se colocaron a 20 cm de la base del tubo sostenida por la base con malla plástica y tiene una longitud de 1m, de textura esponjosa y húmeda (pH >7, temperatura 25-30 °C y una humedad de 40 a 80%), el ingreso del biogás fue por la base, esta a su vez pasó a través del sustrato orgánico (biofiltro) siendo retenido el sulfuro de hidrógeno por los microorganismos Sulfooxidantes presentes y compuestos químicos del sustrato; en la parte superior se ubica la válvula de salida del biogás tratada. Los controles de concentración del sulfuro de hidrógeno presente en el biogás y el control de presión con los manómetros se realizó a la entrada y salida del filtro seco.

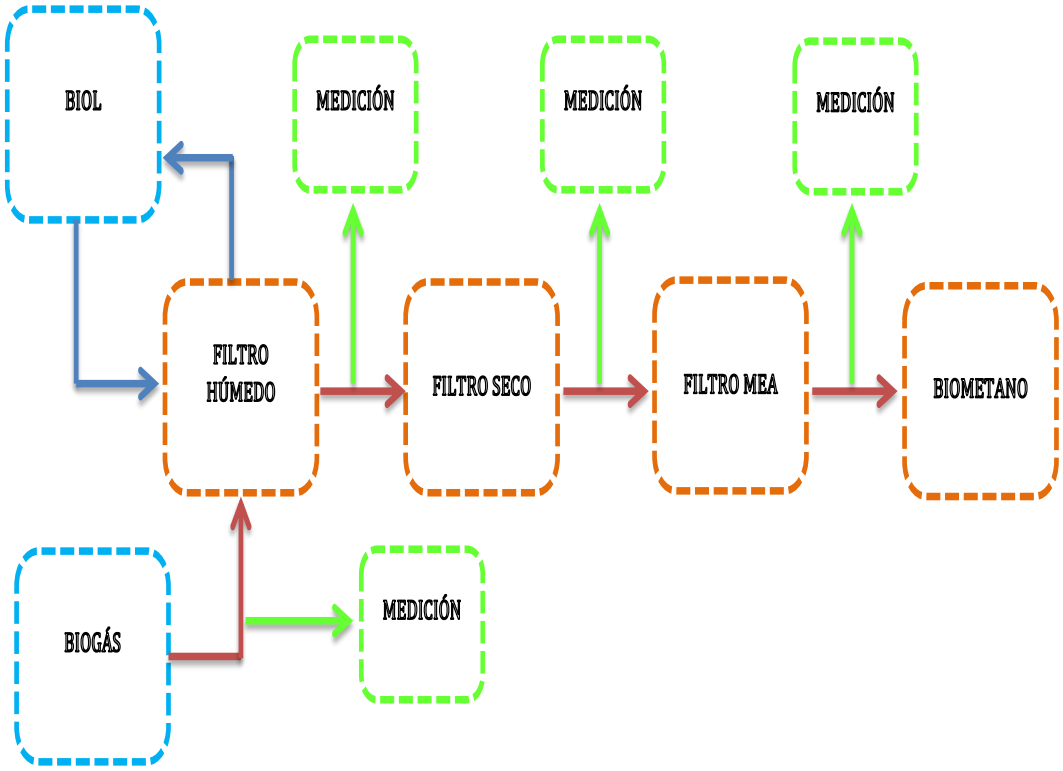


Figura 12. Línea de reducción del sulfuro de hidrógeno del flujo de biogás.

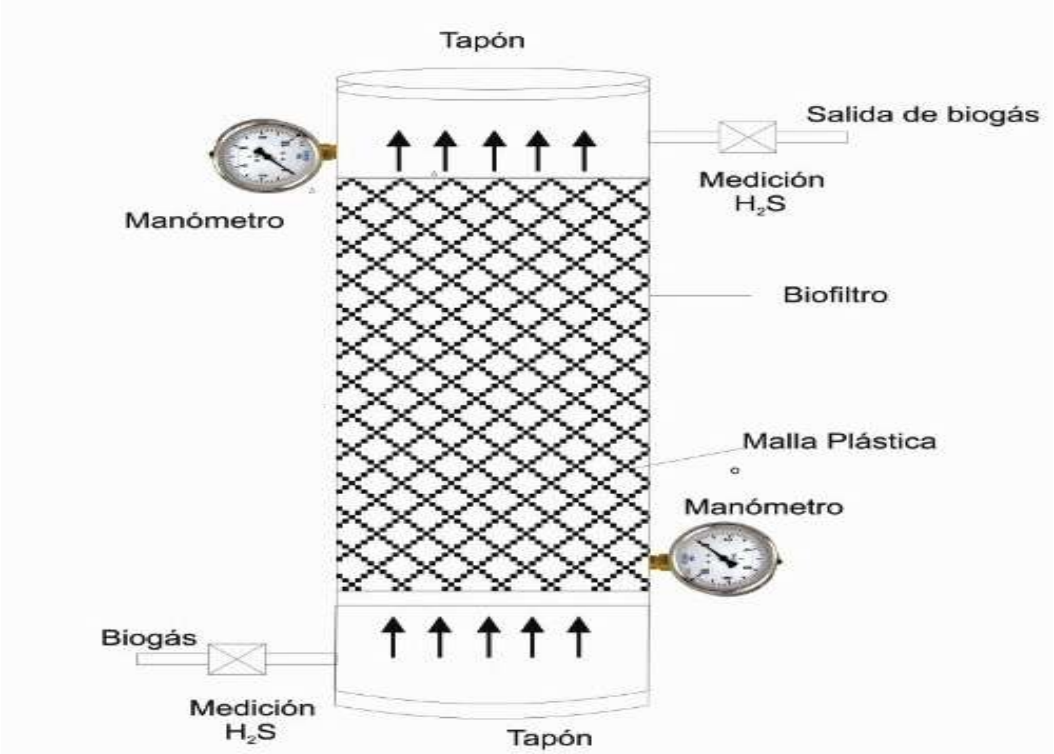


Figura 13. Prototipo del filtro seco desulfurador del biogás.

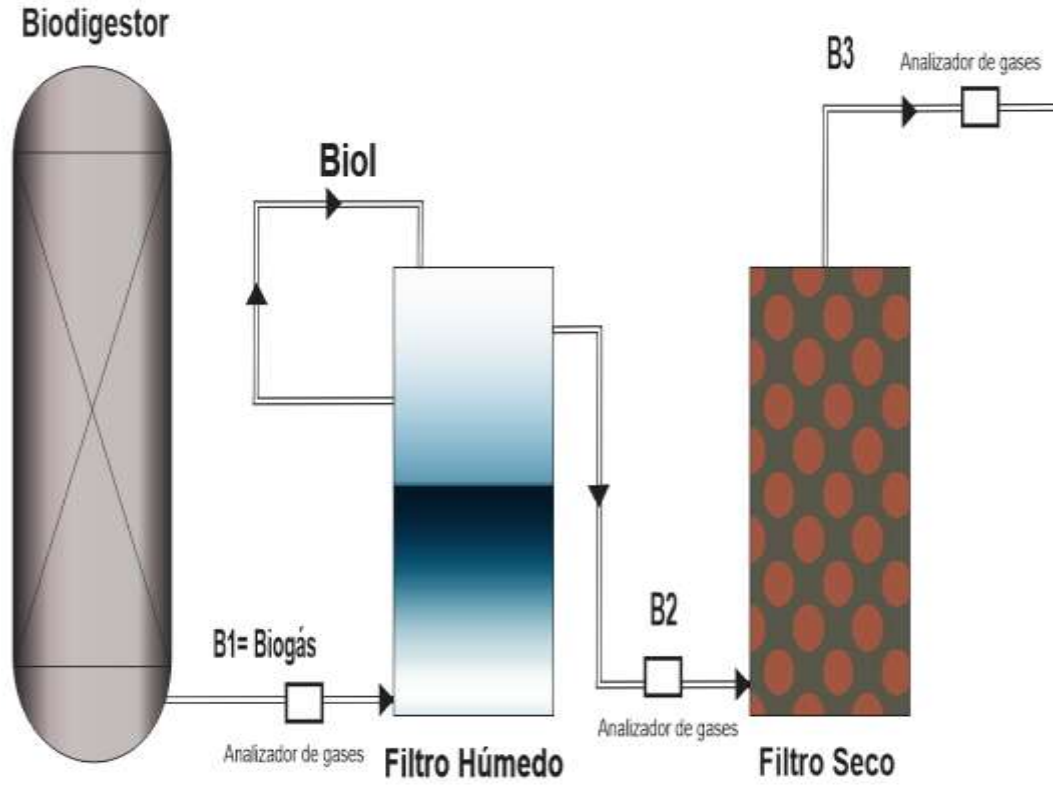


Figura 14. Sistema de purificación.

3.7.2. Evaluación del comportamiento de los filtros húmedos y secos en el proceso de absorción de sulfuro de hidrógeno del biogás

El comportamiento de los filtros desulfuradores se evaluó de acuerdo a su naturaleza; el filtro húmedo y seco se dividió en dos etapas: la primera; acondicionamiento y adaptación biológica, y la segunda el tratamiento propio del biogás.

En la primera etapa del filtro húmedo y seco, se realizó la evaluación de la fuente microbiana activa, estos fueron los afluentes del biodigestor, la mismas que se analizó la presencia de los **SO_4** presentes como producto de la degradación del sulfuro de hidrógeno (antes y después del tratamiento del biogás con el filtro), asimismo la caracterización microbiológica (bacterias heterótrofas y mesófilas) antes del tratamiento, asimismo el conteo de **UCF** de las bacterias sobre las cintas, que corresponde a la evaluación del crecimiento microbiano bajo las condiciones del filtro. Adicionalmente en los filtros secos se realizó un análisis de la composición físico químico de los sustratos antes y después de filtrado el biogás, de esta manera poder explicar los procesos y reacciones químicas y biológicas producidas en la desulfuración del biogás.

3.7.3. Determinar la concentración de CH_4 presente en el flujo de biogás obtenido a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma, “Industrias Oleaginosas Monte Alegre” S.A. (INDOLMASA)

La concentración de metano se determinó mediante el sensor de metano y análisis de caracterización de gases del biogás, el sensor se colocó en la entrada y en la línea de salida tanto del filtro húmedo como del filtro seco, el biogás fue succionado de los biodigestores, luego pasa por los filtros y es suministrado en los recipientes correspondientes. Este gas purificado fue almacenado en un contenedor de fibra de carbono para su

mejor manipulación y fueron inyectadas a estos contenedores con un trasegador de gases, las mismas que facilitaron el transporte para su posterior análisis y pruebas del poder calorífico en la generación de energía eléctrica y cocina.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CANTIDAD DE H_2S QUE SE ABSORBE MEDIANTE EL EMPLEO DEL FILTRO HÚMEDO Y SECO DEL BIOGÁS

Los resultados encontrados entre la evaluación inicial y final en el empleo de los filtros desulfuradores húmedo y seco mostraron diferencias estadísticas significativas en la concentración del sulfuro de hidrógeno $p<0.05$ (Ver Tabla 6 y Figura 15), donde se observa que en la evaluación inicial el sulfuro alcanzó 1,384.75 ppm de H_2S, bajando esta concentración a la evaluación final hasta 628.51 ppm de H_2S, disminuyendo la concentración en promedio al 61% del sulfuro presente en el biogás, con un máximo de 69.45% de remoción en el biofiltro 2 (25:50:25/escobajo /compost/ceniza).

Tabla 6. Comparación de medias entre la evaluación inicial y final en la concentración de sulfuro de hidrógeno.

Evaluación	Medias	n	E.E.	
Final	628.51	540	5.94	A
Inicial	1384.75	540	5.94	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

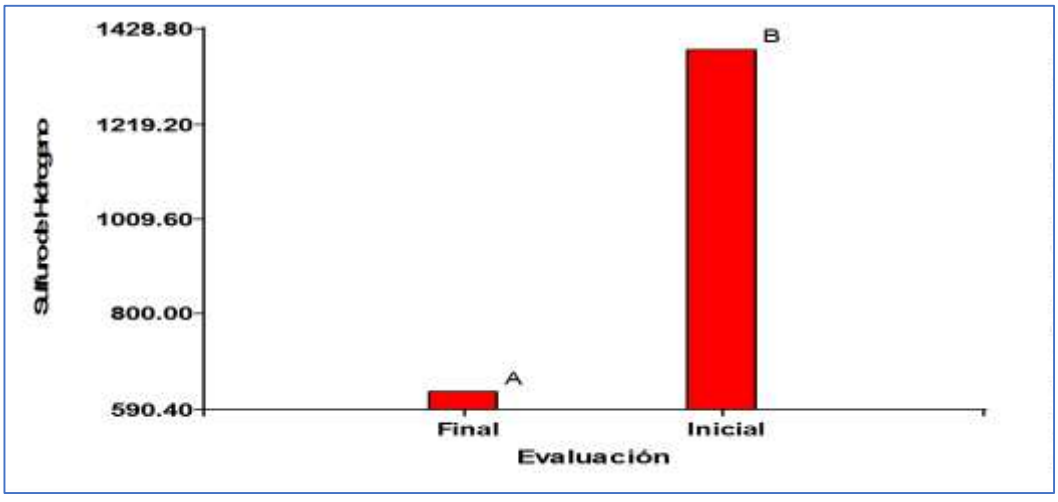


Figura 15. Evaluación inicial y final en la concentración de sulfuro de hidrógeno.

De los análisis realizados entre los dos tipos de filtro podemos indicar que entre el filtro húmedo y seco existen diferencias estadísticas significativas $p<0.05$ para la concentración de sulfuro de hidrógeno, mostrándonos que ambos filtros cumplen la función de remoción del sulfuro de hidrógeno, sin embargo, el filtro seco remueve o filtra en mayor cantidad el sulfuro de hidrógeno (55.04%), (Ver Tabla 7 y Figura 16).

Tabla 7. Comparación de medias entre los tipos de filtros húmedo y seco en la concentración de sulfuro de hidrógeno.

Evaluación	Medias	n	E.E.	
Húmedo	53.09	270	0.42	A
Seco	55.04	270	0.42	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

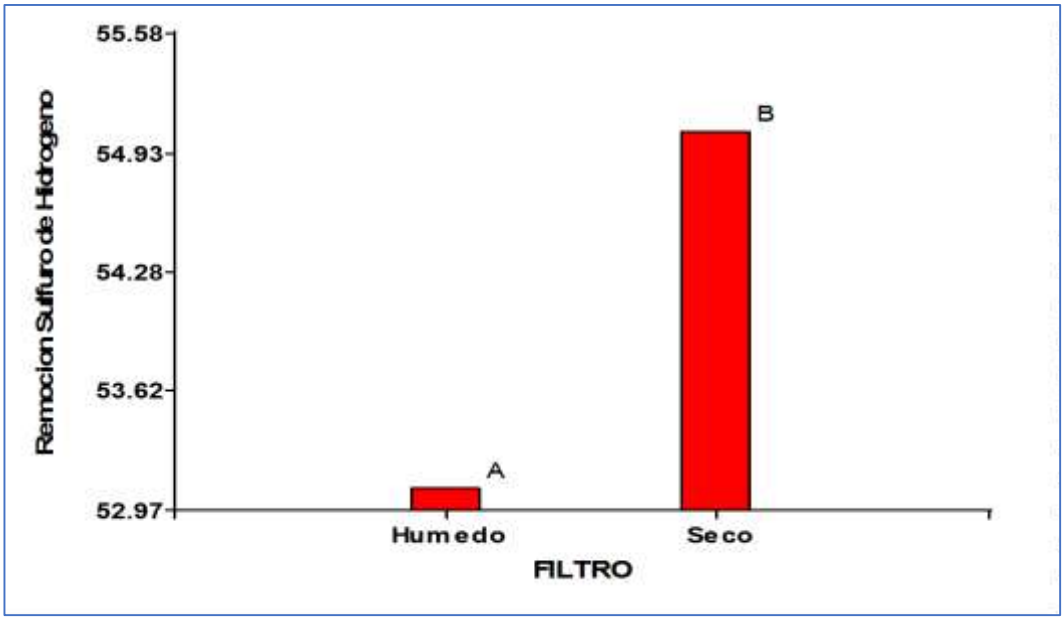


Figura 16. Evaluación por tipos de filtros húmedo y seco en la concentración de sulfuro de hidrógeno.

Los análisis realizados entre los prototipos de filtros húmedos y seco podemos indicar que existen diferencias estadísticas altamente significativas $p<0.01$ para la remoción de sulfuro de hidrógeno, observando que el prototipo de filtro seco, en especial el biofiltro 3 (50:25:25 escobajo/compost/ceniza) y biofiltro 2 (25:50:25 escobajo/compost/ceniza)

alcanzaron los mayores porcentajes de remoción de sulfuro de hidrógeno, (Ver Tabla 8 y Figura 17).

Tabla 8. Comparación de medias entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (biofiltro 1, biofiltro 2 y biofiltro 3) en la remoción de sulfuro de hidrógeno.

Evaluación	Medias	n	E.E.				
Biof. 1	51.42	90	0.70	A			
100 cm	51.85	90	0.70	A	B		
120 cm	52.95	90	0.70	A	B		
80 cm	54.46	90	0.70		B	C	
Biof. 2	56.33	90	0.70			C	D
Biof. 3	57.38	90	0.70				D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05).

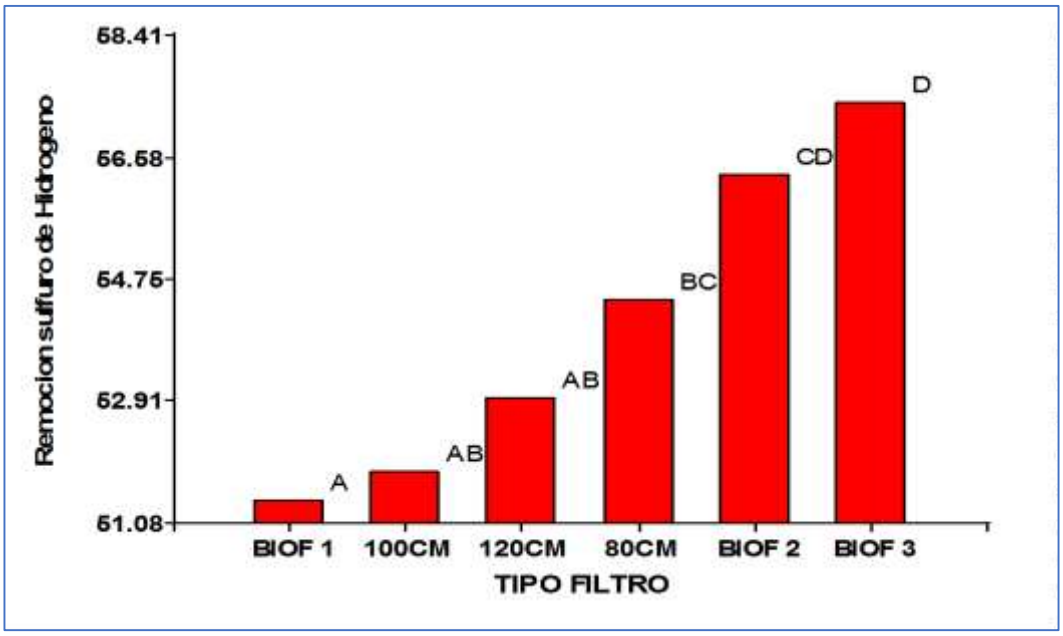


Figura 17. Evaluación entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (Biof. 1, Biof. 2 y Biof. 3) en la remoción de sulfuro de hidrógeno.

En diversas partes del mundo se están realizando trabajos para la remoción del sulfuro de hidrógeno H_2S del biogás, debido a que este gas a pesar de representar menos del 1% de la composición, en presencia del agua reacciona y se convierte en Ácido Sulfúrico, sustancia altamente corrosible capaz de destruir las partes metálicas del motor; el más usado

para la remoción del H_2S es la viruta de hierro que puede llegar hasta un máximo de 56% en condiciones adecuadas como óxido de hierro - F_2O_3; al respecto, la universidad EARTH en Costa Rica (Botero *et al*., 2009); consiguió remoción máxima de 97.7% de sulfuro de hidrógeno empleando materiales orgánicos como el EM-compost y lombricomposta con un filtro de 200 cm, y concluyen que a mayor longitud del filtro la retención aumenta; asimismo, el EM-compost presentó mayor capacidad de retención de H_2S. Nuestro experimento reporta remoción de hasta máximo 69.45% de H_2S en el biofiltro 2 conformado por una mezcla orgánica de 25:50:25/escobajo/compost/ceniza, respectivamente, con una longitud de 120 cm, sin embargo todos los filtros tanto húmedo como seco en sus distintos prototipos superaron la remoción del H_2S por más del 50%.

Existen diversos métodos de desulfuración del biogás como son los químicos, físicos y biológicos, cada uno con diferente tecnología, costo operativo y porcentaje de remoción distinta; el carbón activado adsorbe el H_2S, actúa como catalizador y oxida el H_2S a azufre elemental, el sistema de adsorción está formado por un lecho de carbón a presión donde el gas pasa a través de él hasta salir purificado (Llaneza, 2010). La desventaja del carbón activado radica en la adsorción de sustancias no polares como el metano (Ramírez, 2007).

Existe aún mucho trabajo para definir qué bacterias o conjunto de estos son las más eficientes en la remoción del H_2S, en comparación con otros sistemas de desulfuración; (Pérez y Villa, 2005), indican que las ventajas del uso biológico con respecto a los sistemas fisicoquímicos es la inexistencia de contaminantes secundarios, bajos costos de inversión y de operación, consumo de reactivos bajos, trabaja a temperatura ambiente y altas eficiencias de degradación del sulfuro de hidrógeno.

La remoción del sulfuro de hidrógeno del biogás mediante el uso de microorganismos se basa en la oxidación microbiológica a azufre elemental principalmente o sulfatos, fijando simultáneamente al CO_2, de esta forma se puede lograr el enriquecimiento del metano al remover ambos gases el

CO_2 y eliminar el elemento más corrosivo (H_2S), que limita el uso del biogás (Soreanu *et al.,* 2008).

4.2. COMPORTAMIENTO DE LOS FILTROS DESULFURADORES EN EL PROCESO DE ABSORCIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO DEL BIOGÁS

El filtro húmedo por la naturaleza del prototipo, emplea biol como fuente de microorganismos que aporta al sistema la carga bacteriana necesaria para el arranque del proceso oxidativo del sulfuro de hidrógeno en azufre elemental, para ello se emplean cintas de polietileno como hospedero para el desarrollo de las colonias bacterianas sulfooxidativas. En este proceso el biogás ingresa por la parte inferior del filtro y asciende hacia la parte superior en contacto muy íntimo con las colonias bacterianas produciendo la oxidación del sulfuro de hidrógeno, asimismo, este gas es lavado en contracorriente por el biol que ingresa por la parte superior en forma de rocío, en este filtro el biogás recibe doble tratamiento: la oxidación bacteriana y el lavado del biogás por el flujo de agua del biol.



Figura 18. Colocación de tiras de polietileno en el filtro húmedo.

Antes del ingreso del biogás al filtro, este fue sometido a un proceso de adaptación biológica por una semana, donde se realizó la aplicación del biol a través del sistema (filtro), con ello asegurar que las colonias de bacterias se desarrollen sobre el plástico.

Singh y Mandal, 2011, indica que en los biofiltros se deben colocar los cultivos de microorganismos (bacterias) puras o mixtos que permita asegurar la colonización y la desulfuración del biogás; ello dependiendo de la cepa responsable, se podría convertir sulfuros a azufre o alternativamente a sulfato (Madigan *et al.,* 2006).



Figura 19. Distribución del biol en el filtro húmedo.

Revah y Ortiz (2004), indica que los microorganismos necesitan de un soporte donde se puedan realizar los procesos metabólicos y los sistemas más empleados son los biolavadores, biofiltros de lecho fijo y biofiltros de lechos escurrido; el primero presenta dos etapas de desarrollo: en la primera se realiza un proceso de absorción, los contaminantes se extraen con agua en una torre de aspersión o columna; en la segunda etapa, el líquido recircula al biofiltro biológico en donde se produce la oxidación, por bacterias que pueden encontrarse libres o inmovilizados.

El biofiltro de 80 cm de longitud fue la que mayor porcentaje removió al sulfuro de hidrógeno del biogás con 54.46% seguido del biofiltro de 120 y 100 cm (Ver Figura 17).



Figura 20. Sustratos orgánicos para la colocación en el filtro seco.

El segundo biofiltro seco está constituido por sustratos orgánicos como el escobajo, compost y ceniza, mezclados en distintas proporciones, estas mezclas son humedecidas con biol, quien aportará la carga bacteriana (microorganismos), encargados de realizar los procesos de oxidación del H_2S presentes en el biogás, esto se inicia con la entrada del biogás por la parte inferior del filtro y pasando en íntimo contacto por el filtro poroso y fibroso dado por el escobajo, y que a su paso por este, es adsorbido por las bacterias presentes en el substrato.



Figura 21. Colocación de los filtros húmedo y seco.

Los sustratos empleados como soporte puede ser la turba, el compost, el bagazo de caña, los desechos de madera, las cáscaras de cacahuate, entre otros (Morgan-Sagustume y Noyola, 2006). En similar trabajo Revah y Ortiz (2004), indican que el biogás debe pasar por Biofiltros de lecho fijo, el cual debe contener un material de soporte fijo, poroso y húmedo, lugar donde se desarrollará la película de microorganismos, el contaminante (sulfuro de hidrógeno) es transferido desde el gas a la biopelícula húmeda en donde es transformado en anhídrido carbónico y agua, siendo estos compuestos arrastrados a la salida.

Varnero *et al.,* (2012), menciona que, en el año 2005, más de 300 biofiltros se instalaron y quedaron operativos en USA para el tratamiento de emisiones contaminantes gaseosas provenientes de plantas de tratamiento de aguas sanitarias.

El biofiltro seco prototipo 3 compuesto por 50:25:25 escobajo/compost/ceniza, respectivamente fue la que removió el 57.38% de sulfuro de hidrógeno del biogás, (Ver Figura 17).

4.3. CONCENTRACIÓN DE METANO PRESENTE EN EL FLUJO DE BIOGÁS

Los resultados obtenidos entre la evaluación inicial y final, donde podemos indicar que existen diferencias estadísticas significativas para la concentración de metano $p<0.05$ (Ver Tabla 9 y Figura 18), donde la evaluación final de los filtros desulfuradores llego al 53.21% de metano.

Tabla 9. Comparación de medias entre la evaluación inicial y final en la concentración de metano.

Evaluación	Medias	n	E.E.		
Inicial	49.17	540	0.07	A	
Final	53.21	540	0.07		B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$).

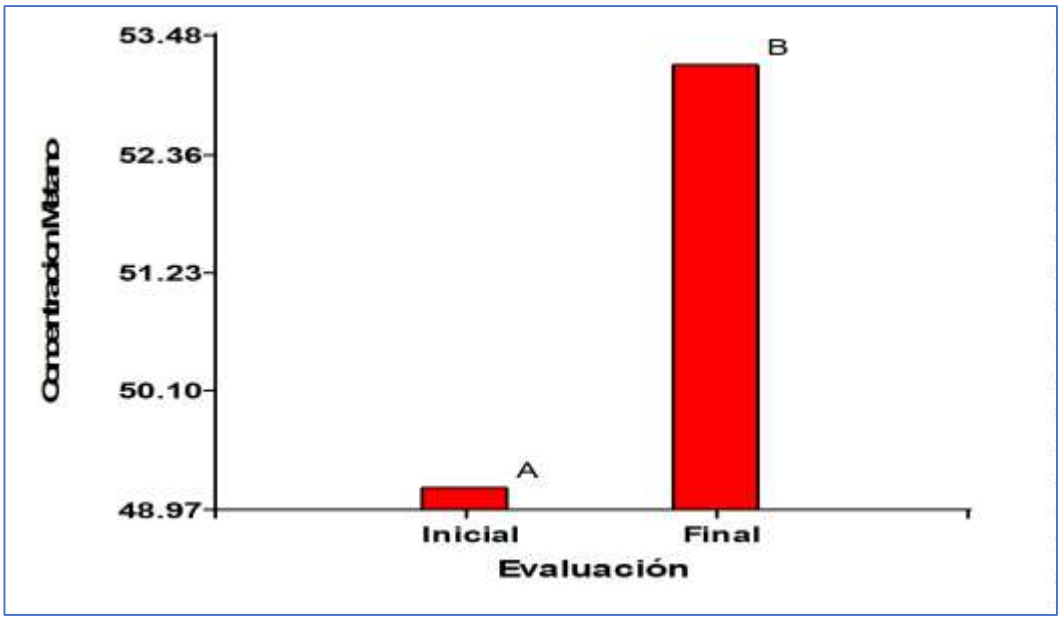


Figura 22. Evaluación inicial y final en la concentración de metano.

Los resultados encontrados entre los filtros húmedos y seco, podemos decir que existen diferencias estadísticas significativas $p<0.05$, donde el filtro húmedo muestra mayor concentración de Metano, (Ver Tabla 10 y Figura 19).

Tabla 10. Comparación de medias entre tipos de filtros húmedo y seco en la concentración de metano.

Evaluación	Medias	n	E.E.	
Seco	50.72	540	0.11	A
Húmedo	51.66	540	0.11	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

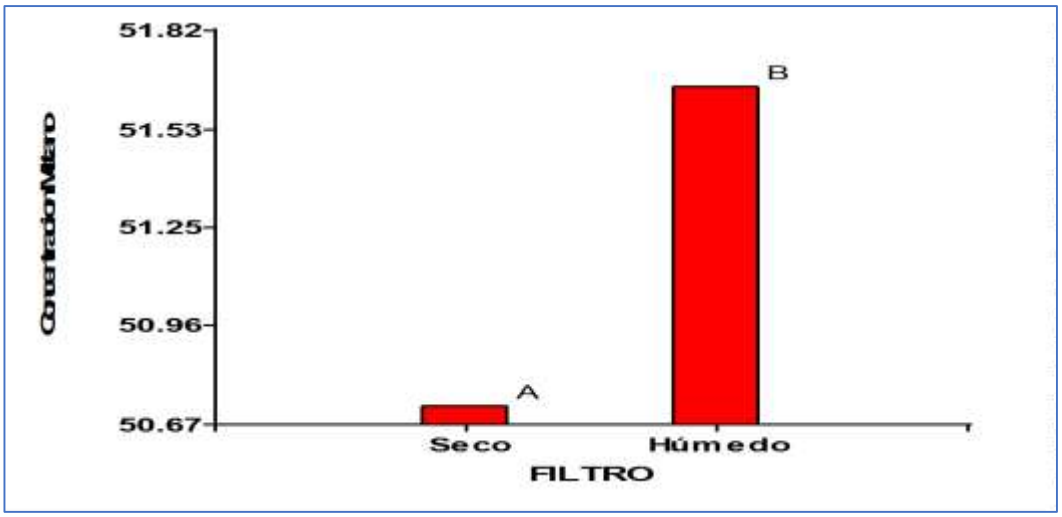


Figura 23. Evaluación por tipos de filtros húmedo y seco en la concentración de metano.

Finalmente, sobre los resultados obtenidos entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (Biof. 1, Biof. 2 y Biof. 3), podemos indicar que existen diferencias estadísticas p>0.05, asimismo, el filtro seco por su característica sólida (sustratos) retienen el metano (biofiltro 1 con 49.57%) y el prototipo 1 del filtro húmedo (de 80 cm de longitud) alcanzó el más alto porcentaje con 52.15% de metano, los filtros secos le dan mayor resistencia al paso del metano en comparación de los filtros húmedos que son lavados en contracorriente, (Ver Tabla 11 y Figura 20).

Tabla 11. Comparación de medias entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (biof 1, biof 2 y biof 3) en la concentración de metano.

Evaluación	Medias	n	E.E.	
Biof 2	49.57	180	0.19	A
Biof 1	50.78	180	0.19	B
120 cm	51.41	180	0.19	B C
100 cm	51.42	180	0.19	B C
Biof 3	51.81	180	0.19	C
80 cm	52.15	180	0.19	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p>0.05).

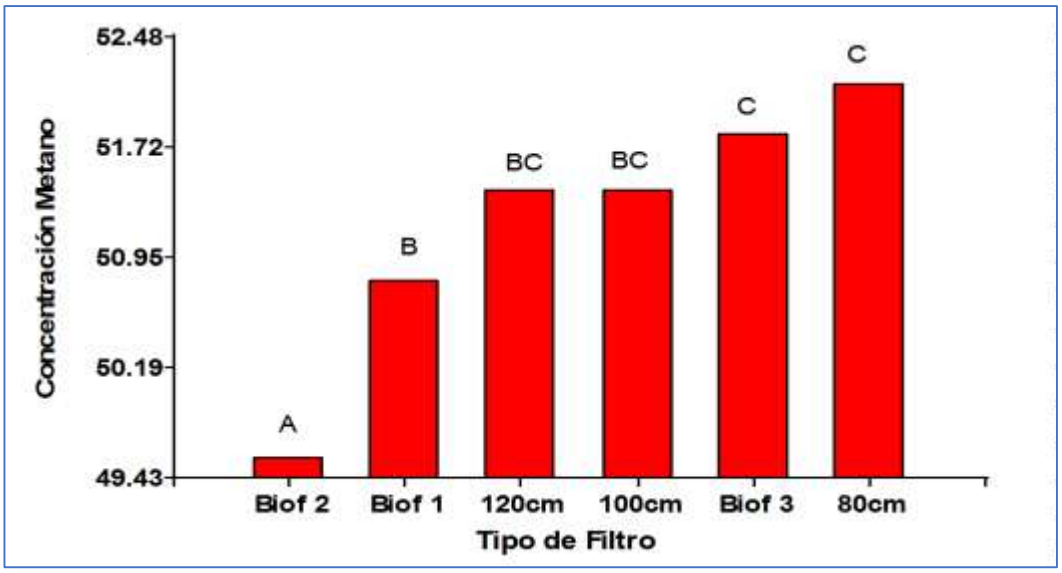


Figura 24. Evaluación entre los prototipos de filtros húmedo (80 cm, 100 cm y 120 cm) y secos (Biof 1, Biof 2 y Biof 3) en la concentración de Metano.

Nuestra investigación buscó remover el sulfuro de hidrógeno con microorganismos sin que este afecte la concentración del metano; sin embargo, ambo filtros también remueven el CO_2 del biogás, (Soreanu *et al.,* 2008), en menor medida que al sulfuro de hidrógeno, favoreciendo el enriquecimiento del biogás.

Los biofiltros colocados en serie pueden remover hasta en un 90% del sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, siendo esta combinación el filtro húmedo de 80 cm con el biofiltro seco 3 (50:25:25 escobajo/compost/ceniza), siendo una clave la porosidad del filtro por su alto contenido de escobajo. La empresa oleaginosa “Manuelita”, ubicada en el municipio de Villavicencio en la provincia del Meta en Colombia dentro de su proceso de desulfuración del biogás utiliza un complejo sistema que combina el biológico y físico, llegando a remover hasta un 100% del H_2S presente en su biogás.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El filtro con mayor porcentaje de remoción fue el biofiltro 3 (50:25:25 escobajo/compost/ceniza) con 57.38% de sulfuro de hidrógeno.

- El prototipo 1 del filtro húmedo (longitud de 80 cm), fue el de mayor concentración de Metano, con 52.15%.

- El filtro seco es el que mejor comportamiento tiene en la desulfuración del biogás, a mayor porosidad mejora la desulfuración debido a que existe un mejor contacto del biogás contaminado (H_2S), con las bacterias sulfooxidativas.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas con sustancias alcalinas para remover el H_2S en contracorriente (lavado) dentro de los biofiltros húmedos.

- Realizar las pruebas con otros sustratos orgánicos abundantes de nuestra región como son la cascarilla de arroz y el aserrín para obtención de nuevos resultados.

- Utilizar el prototipo 1 del filtro seco (80 cm) para una mejor desulfuración y mayor sea la producción del metano, el CO2 y el sulfuro desciende, logrando de esta manera un Biogás con menos H2S y mayor incremento de Poder Calorífico.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Aboudheir, A. (2003). “Kinetics of the reactive absorption of carbon dioxide in high CO2-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions". En C. E. Science, Chemical Engineering Science (págs. 5195 – 5210).

Antonio, G. (1996). Producción de Gas y Saneamiento de Efluentes. En G. Antonio, DISEÑO DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS RURALES (págs. 1-80). Lima-Perú: Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud.

Arenillas, A. (2006). Separación de H2 y CO2 por adsorción. Instituto Nacional del Carbón, CSIC.

Brundick, W. (2010). Sulfatreat estimated performance sheet. Chesterfield, Missouri, USA: s.n.: Mi Swaco.

Carrillo, L. (2003). Mcrobiologa Agrícola. Universidad Nacional de Salta, Argentina, ISBN 987-9381-16-5.

Cengel, Y. & Boles, A. (2008). Thermodynamics. An Engineering Approach. New York, USA: McGraw- Hill. doi: ISBN 9780073305370: 6th edición.

Chakravarti, S. (2001). Advanced Technology for the Capture of Carbon Dioxide. Praxair Technology, Inc.Washington, DC: First National Conference on Carbon Sequestration.

Cosmos, O. (1995). “Etanolamina (monoetanolamina)”. Recuperado el 15 de marzo de 2017, de “Etanolamina (monoetanolamina)”: https://www.cosmos.com.mx/wiki/cz4p/etanolamina-monoetanolamina

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. Universidad EARTH. Las Mercedes de Guácimo, Limón, Costa Rica. Revista Tierra Tropical, 3 (2): 129 – 138.

Dagoberto, E. (2005). El biodigestor. Costa Rica: ACCS.

Díaz, A. (2011). Percepción de los Estudiantes de Ingeniería Industrial y Comercial de la USIL sobre Desarrollo Sostenible y el Uso de Tecnologías Limpias aplicadas en Proyectos Peruanos. Recuperado de http://textos.pucp.edu.pe/pdf/1118.pdf

Díaz-Báez, M. (2002). Digestión Anaerobia una Aproximación a. Bogotá, Colombia.

Dugas, R. (2006). “Pilot Plant Study of Carbon Dioxide Capture by Aqueous Monoethanolamine”. Tesis. Texas, Universidad de Texas, 9- 11.

Dupart, M. (1993). “Corrosion Behavior reactive absorption of carbon dioxide in high CO2-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions”. En C. E. Science, Chemical Engineering Science (Pp. 10169–10179).

Etcharren, P. (2005). Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fábrica “Lubascher y Krausse” Temuco. Tesis Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Temuco, Chile. 162.

Etcharren, P. (2005). Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fábrica “Lubascher y Krausse” Temuco. Tesis Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Temuco, Chile. 162.

Forsich, C. (2004). Characterization of laser-induced ignition of biogas-air. Ingeniería e Investigación, Vol. 27, No. 3. 299-312.

Gaete, C. (2007). Tratamiento de agua con elevado contenido de sulfato en un reactor EGSB, utilizando el biogás producción para la remoción de H2O. Temuco, Chile. 94 p.: Tesis Ingeniero Ambiental. Universidad de La Frontera, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración.

González, A. (2006). Estudio de la oxidación biológica de compuestos reducidos de azufre por un consorcio alcalófilo en un biorreactor. Tesis Doctor en Ciencias Ingeniería Química. México DF. 90 p: Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

Gosh, D. (2007). Wet H_2S cracking problem in oil refinery processes – material selectionand operation control issues. USA: Indian Oil Corporation.

Harasimowicz. (2007). Journal of Hazarous Materials, En Harasimowicz, Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment, (Pp. 415-422).

Hernández, R. (2007). “Análisis de las Tecnologías De Reducción Efectiva De Las Emisiones". Memoria de Ingeniería Energética. Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, 35 - 94.

Horikawua, M. (2001). Purificação de Biogás. Universidade Estadual de Maringá, 45-46.

Huertas, J. (2010). Filtración de H2S y CO2 presentes en el biogás usado en plantas eléctricas de potencia. Toluca: Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz.: (Informe final del proyecto MOPESA).

Isam. (2009). Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. En Microbes at work. From wastes to resources (Pp. 1-34). Heidelberg, Dordrecht, London, New York.: Springer.

Lender, J. (2015). Agua caliente. UNU vol 2 N 2, 12 / 18.

Llaneza, H.; Morís, A.; Gonzáles, L. & Gonzáles, E. (2010). Caracterización, purificación y control de biogás. Estudio de la viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. doi: PS-120000-2007-6.

Maddox, R. (1985). Amine Processes. En: Gas Conditioning and Processing. Estados Unidos, Campbell Petroleum Series: 3° ed.

Madigan, M.; Martinko, J.; Parker, J. Brock. (2006). Biología de los microorganismos. Pearson Educación, S.A. 10º Ed., Madrid, España, 1089 p.

Madigan, M. & Mertinko, J. (1997). Biology of Microorganisms. New Jersey, USA: Prentice Hall.

Marchaim, U. (1992). Biogas processes for sustainable development. Israel: MIGAL Galilee Technological Centre Kiryat Shmona-ISBN 92-5-103126-6.

Mitzlaff, K. (1988). Engines for biogas. Germany: GATE. Deutsches Zentrum fur.

Morero, B. (octubre de 2009). Biogás obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos: revisión de las principales tecnologías de purificación. Recuperado el 14 de marzo de 2017, de Biogás obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos: revisión de las principales tecnologías de purificación.: http://www.ambiente-augm.ufscar.br/uploads/A2-026.pdf

Mps. (2000). Desulfurización del biogás. Recuperado el 14 de marzo de 2017, de Desulfurización del biogás: http://www.mspesp.com/pdf/environtec_general.pdf

Mora, M.; López, L.; Lafuente, J.; Pérez, J.; Kleerebezem, R.; Van Loosdrecht, M.C.; Gamisans, S.; Gabriel, D. (2016). Respirometric characterization of aerobic sulfide, thiosulfate and elemental sulfur oxidation by S-oxidizing biomass. Water Research. 2016, vol. 89, p. 282-292. doi: 10.1016/j.watres.2015.11.061.

Muñoz, C. (2008). Tecnologías de captura y secuestro de CO2. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Iee3372 Mercados Eléctricos.

Noyola, A.; Morgan, J. & López, J. (2006). Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. Reviews in Environmental Science and Bio/Technoly, 5: 93 - 114.

Ontiveros, J. (2004). Destilación, fundamentos. Universidad de los Andes. Recuperado de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/jesusf/OP3-001DestilacionFundamentos.pdf

Ortega Viera, Lianys, Rodríguez Muñoz, Susana, Fernández Santana, Elina, & Bárcenas Pérez, Liuver. (2015). Principales métodos para la desulfuración

del biogás. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 36(1), 45-56. Recuperado en 25 de febrero de 2019, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000100004&lng=es&tlng=es.

Pacheco, H. (2000). Formación de espuma en plantas de aminas. Recuperado de http://biblioteca.iapg.org.ar/iapg/ArchivosAdjuntos/Aminas/TrabajoPacheco.pdf

Pérez, L. (2005). “Evaluación de la Sección de Lavado de CO2 de la Planta de Amoníaco de Pequiven-Morón”. Memoria de Ingeniero Químico. Valencia, Universidad de Carabobo, Escuela de Ingeniería Química, 14 - 33.

Pérez, M.; Cuesta, M.; Núñez, S. & Cabrera, J. (2008). Utilización de biogás en pilas de combustible. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España, 68 p.

Pérez, H. y Villa, P. (2005). Desulfuración biológica: una alternativa para el tratamiento de emisiones de gases a la atmosfera. Agua Latinoamericana. Vol. 5 (3): 17-20.

Porpatham, E. (2008). Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine. Fuel, Vol. 87 No. 8-9, 1651-1659. .

Rainforest. (6 de octubre de 2012). Wild papaya, Papailla, Papaya caspi: Rainforest expedition. Recuperado el 14 de Enero de 2019, de sitio web de Rainforest expedition: http://amazonwiki.org/index.php?title=Wild_papaya,_Papailla,_Papaya_caspi

Ramirez, J. (2012). Evaluación de la eliminación de CO2 y H2S por endulzamiento del biogás usando soluciones acuosas de alcanolaminas. Tacna-Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman-Tacna.

Revah S. y Ortíz 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 Ed. El Colegio Nacional México. Pp. 625- 658.

San Martín, M. (2013). Estudios de corrosión y degradación de monoetanolamina en planta productora de dióxido de carbono. Santiago de Chile.

Sánchez, J. (2006). Planta para la recuperación del dióxido de carbono de los gases de combustión. Barcelona, España: (Informe del proyecto para la captación del 98% del CO_2 producido en una planta industrial de cogeneración para su posterior purificación y venta).

Schlaefli. (2010). Tratamiento de Residuos Orgánicos del comedor universitario de la UNALM en un biodigestor semi-continuo para la producción de biogás y biol. Lima-Perú.: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Silva, J. (2007). Tecnología del biogás. Recuperado de http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf

Subhasish, M. (2015). A Technical Report on Gas Sweetening by Amines. Ltd, Mumbai, India: DOI: 10.13140/RG.2.1.2061.9360.

Svida, D. (2010). Analyza vnitřní termodynamiky spalovacího motoru. Recuperado de http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2006/2006_002_01.pdf.

Soreanu, G. *et al.,* (2008). Laboratory pilot scale study for H2S removal from biogas in an anoxic biotrickling filter". Water Sci. Technol. 57 (2), 201-207.

Tecnologías de captura y almacenamiento de CO2 (s.f.). Recuperado de: http://www.fundacionenergia.es/PDFs/Carb%C3%B3n%20Futuro/Cap%C3%ADtulo%206.1.pdf

Tecnologías de captura y secuestro de CO_2. (25 de Mayo de 2008). Recuperado el 13 de Marzo de 2017, de Tecnologías de captura y secuestro de CO2: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno08/co2capture/Informe%20captura%20y%20secuestro%20de%20 CO2.pdf.

Tec Provider. (2002). Nociones elementales sobre el biogás. Recuperado de http://es.scribd.com/doc/86348175/elmejor.

Thomsen, H. (2005). “Recovery of CO2 from exhaust gasses – another way to improve the economical and environmental aspects of CHP-Plants”. Union Engineering a/s.

Valderrama, A.; Flores, J.; Bejar, M. & Quispe, C. (2009). Desgaste en los sistemas de inyección dies 2el por efecto del elevado contenido de azufre en petróleo diesel. Revista de Investigación de Física. Vol. 12 N° 2, 30-37.

Varnero, T.; Margarita, C.; Galleguillos, K. y Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. Información Tecnológica Vol. 23 Nº 2 - 2012 31.

Zapata, A. (1998). Biogás Utilization for Electricity Generation. Cali: CIPAV.

ANEXOS

ANEXO 1

TABLA DE RESULTADOS

Tabla 12. Matriz de datos de la evaluación inicial por tipo de filtro.

item	Evaluacion	FILTRO	TIPO	REPETICIÓN	TIEMPO/SEGUNDO	H2S	CO2	CH4
1	1	1	1	1	30	1027	1021	1025
2	1	1	1	1	60	1025	1019	1023
3	1	1	1	1	90	1027	1021	1025
4	1	1	1	1	120	1006	1000	1004
5	1	1	1	1	150	1017	1012	1015
6	1	1	1	1	180	1014	1008	1012
7	1	1	1	1	210	1012	1006	1010
8	1	1	1	1	240	995	989	993
9	1	1	1	1	270	997	999	1000
10	1	1	1	1	300	995	997	999
11	1	1	1	1	330	989	991	993
12	1	1	1	1	360	982	984	985
13	1	1	1	1	390	987	989	991
14	1	1	1	1	420	985	987	989
15	1	1	1	1	450	969	971	972
16	1	1	1	1	480	980	982	984
17	1	1	1	1	510	976	978	980
18	1	1	1	1	540	972	974	976
19	1	1	1	1	570	969	971	972
20	1	1	1	1	600	969	971	972
21	1	1	1	1	630	965	963	969
22	1	1	1	1	660	965	963	961
527	1	2	6	3	2310	1554	1386	1389
528	1	2	6	3	2340	1561	1382	1386
529	1	2	6	3	2370	1578	1380	1384
530	1	2	6	3	2400	1580	1375	1378
531	1	2	6	3	2430	1569	1382	1386
532	1	2	6	3	2460	1558	1386	1382
533	1	2	6	3	2490	1563	1373	1369
534	1	2	6	3	2520	1569	1378	1375
535	1	2	6	3	2550	1578	1375	1371
536	1	2	6	3	2580	1580	1363	1360
537	1	2	6	3	2610	1598	1360	1356
538	1	2	6	3	2640	1587	1352	1349
539	1	2	6	3	2670	1591	1347	1343
540	1	2	6	3	2700	1587	1343	1339

Tabla 13. Matriz de datos de la evaluación final por tipo de filtro.

item	Evaluacion	FILTRO	TIPO	REPETICIÓN	TIEMPO/SEGUNDO	H2S	CO2	CH4	Concentraci	Remocion
541	2	1	1	1	30	549	649	761	53.97	46.52
542	2	1	1	1	60	548	647	765	54.18	46.52
543	2	1	1	1	90	549	647	763	54.11	46.52
544	2	1	1	1	120	538	645	759	54.06	46.52
545	2	1	1	1	150	544	645	758	54.03	46.52
546	2	1	1	1	180	542	643	758	54.10	46.52
547	2	1	1	1	210	541	643	758	54.10	46.52
963	2	2	5	3	1890	551	649	765	54.10	65.48
964	2	2	5	3	1920	540	647	761	54.05	66.45
965	2	2	5	3	1950	546	647	760	54.02	66.11
966	2	2	5	3	1980	544	645	760	54.09	66.36
967	2	2	5	3	2010	543	645	760	54.09	66.38
968	2	2	5	3	2040	534	642	765	54.37	66.97
969	2	2	5	3	2070	539	642	757	54.11	66.78
986	2	2	5	3	2580	508	618	736	54.36	69.16
987	2	2	5	3	2610	508	615	734	54.41	69.13
988	2	2	5	3	2640	507	617	730	54.19	69.19
989	2	2	5	3	2670	507	614	727	54.21	69.43
990	2	2	5	3	2700	509	612	725	54.23	69.45
991	2	2	6	1	30	649	725	815	52.92	45.95
1046	2	2	6	2	1680	509	619	737	54.35	64.50
1047	2	2	6	2	1710	509	616	735	54.40	64.50
1048	2	2	6	2	1740	508	618	731	54.19	64.34
1049	2	2	6	2	1770	508	615	728	54.21	64.48
1050	2	2	6	2	1800	510	613	726	54.22	64.66
1062	2	2	6	3	2160	532	639	755	54.16	63.65
1063	2	2	6	3	2190	535	637	754	54.21	64.30
1064	2	2	6	3	2220	534	631	761	54.67	64.84
1065	2	2	6	3	2250	525	635	756	54.35	54.95
1066	2	2	6	3	2280	531	628	751	54.46	66.03
1067	2	2	6	3	2310	529	634	751	54.22	65.96
1068	2	2	6	3	2340	527	633	749	54.20	66.25
1069	2	2	6	3	2370	525	632	748	54.20	66.73
1070	2	2	6	3	2400	525	627	745	54.30	66.77
1071	2	2	6	3	2430	523	630	749	54.31	66.66
1072	2	2	6	3	2460	519	621	747	54.61	66.68
1073	2	2	6	3	2490	718	625	740	54.21	54.07
1074	2	2	6	3	2520	517	626	743	54.27	67.04
1075	2	2	6	3	2550	514	622	741	54.37	67.43
1076	2	2	6	3	2580	507	617	735	54.36	67.91
1077	2	2	6	3	2610	507	614	733	54.42	68.28
1078	2	2	6	3	2640	506	616	729	54.20	68.12
1079	2	2	6	3	2670	506	613	726	54.22	68.20
1080	2	2	6	3	2700	508	611	724	54.23	68.00

ANEXO 2

PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 25. Construcción de filtros desulfuradores.



Figura 26. Filtro seco.



Figura 27. Filtro húmedo con rociadores.



Figura 28. Instalación de filtro húmedo.



Figura 29. Instalación de filtro seco.



Figura 30. Sensor portátil.



Figura 31. Evaluación de los filtros húmedo y seco.