

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA MONOETANOLAMINA EN LA REDUCCIÓN DE CO₂ Y H₂S EN FLUJOS DE BIOGÁS A PARTIR DEL EFLUENTE DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA, “INDUSTRIAS OLEAGINOSAS MONTE ALEGRE” S.A. (INDOLMASA), NOVIEMBRE-2018.

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

ROBERT MARTIN SORIANO MUNARRIZ

PUCALLPA-PERÚ

2019

"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"



UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI



FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N° 91

En el auditorio de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la UNU, siendo las 13.50 horas de día miércoles 17 de abril del presente año, se reunieron los miembros del jurado evaluador designado con memo múltiple 062-2019-UNU-FCFyA-CGT, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Carlos Panduro Carbajal	Presidente
Ing. Mg. David León Moreno	Miembro
Ing. MSc. Edwin Poquioma Yuimachi	Miembro

Para evaluar la sustentación de tesis titulada: "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA MONOETANOLAMINA EN LA REDUCCIÓN DE CO₂ Y H₂S EN FLUJOS DE BIOGÁS A PARTIR DEL EFLUENTE DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA, "INDUSTRIAS OLEAGINOSAS MONTE ALEGRE" S.A. (INDOLMASA), NOVIEMBRE-2018", presentado por el bachiller Robert Martin Soriano Munarriz, asesorado por el Dr. Grober Panduro Pisco. Terminada la sustentación, se procedió a realizar las preguntas por parte el jurado evaluador, siendo absueltas satisfactoriamente por el sustentante, por lo que el jurado evaluador aprobó por **MAYORÍA**, dado que el tercer miembro no se presentó; obteniendo el calificativo de **BUENO**. En consecuencia el sustentante se encuentra apto para obtener el título de Ingeniero Ambiental, previamente subsanando las observaciones hechas por el jurado evaluador.

Siendo las 14:58 horas del mismo día, se da por concluida el acto académico.


Dr. Carlos Panduro Carbajal
Presidente


Ing. Mg. David León Moreno
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 Panduro Carbajal



Presidente

Ing. Mg. David León Moreno



Miembro

Dr. Grober Panduro Pisco



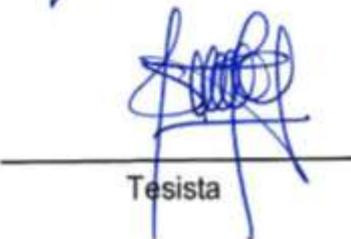
Asesor

Ing. Jesus Cotrina Barrueta



Co-asesor

Bach. Robert Martin Soriano Munarriz



Tesista



Constancia

N° 193

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:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA MONOETANOLAMINA EN LA REDUCCIÓN DE CO₂ Y H₂S EN FLUJOS DE BIOGÁS A PARTIR DEL EFLUENTE DE LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA, "INDUSTRIAS OLEAGINOSAS MONTE ALEGRE" S.A. (INDOLMASA) NOVIEMBRE-2018

Cuyo autor es: **SORIANO MUNARRIZ, ROBERT MARTIN**

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 10%.

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: 11/06/2019


UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
DIRECCION GENERAL DE PRODUCCION INTELECTUAL
Firma: **DINA DINA PARI QUISPE**
Direc. Genl. Prod. Intelect.



REPOSITORIO DE TESIS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo, Robert Martín Soriano Munarriz

Autor de la TESIS titulada:

Evaluación de la eficiencia de la monoetanolamina en la reducción de
CO₂ y H₂S en flujos de biogás a partir del efluente de la planta
extractora de aceite de palma, "Industrias Oleaginosas Monte Alegre"
S.A (INDOOLITASA), Noviembre-2018.

Sustentada el año: 2019

Con la asesoría de: Dr. Graber Panduro Pirco

En la Facultad de: Ciencias Forestales y Ambientales

Carrera Profesional de: Ingeniería 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,

- 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: 13 / 06 / 2019

Email: robertmartinsoriano@munarriz@gmail.com

Teléfono: 934 169 184

Firma: 

DNI: 62431272

DEDICATORIA

A mi madre, Dalila Munarriz Noriega, la persona que me motiva día a día a salir adelante, inculcándome buenos valores, como el respeto hacia lo demás y la solidaridad a nuestro prójimo.

A mi padre, José Soriano Cuzcano, quién contribuyó con mi formación profesional y humanitaria, cuidando cada uno de mis pasos y aconsejándome siempre, pasando a veces momentos difíciles pero siempre unidos.

A mis hermanos en general por inculcarme por el buen camino, apoyándome en momentos decisivos de vida, a ellos debo gran parte de mi formación humanitaria.

A Dios que siempre ilumina mi camino y me protege a donde quiera que vaya, por traer a mi vida paz y tranquilidad, enseñándome a compartir lo poco que tengo.

AGRADECIMIENTO

A mi asesor, Dr. Grober Panduro Pisco, por la oportunidad de participar en su proyecto y poder realizar mi tesis, su consideración hacia mi persona y por sus buenos deseos de superación personal y profesional.

A la Empresa investigación e innovación tecnológica Negocios Amazónicos Sustentables-NEGASUS EIRL, por el financiamiento de mi tesis y por haberme seleccionado para participar en el desarrollo de su proyecto de innovación en bioenergías.

A mi Co-asesor Ing. Jesús Cotrina Barrueta, por sus enseñanzas y deseos de aprendizaje, mostrándome diferentes alternativas y herramientas para resolver problemas.

A la Universidad Nacional de Ucayali, por ser mi alma mater y el lugar donde aprendí no solo a crecer profesionalmente sino también a ser alguien con valores, que a pesar de las adversidades uno debe mostrar siempre compromiso y respeto hacia los demás.

A los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Ambiental, por compartir sus conocimientos y experiencias, por enseñarme a poner en práctica todo lo aprendido y formarme con habilidades de liderazgo.

A la empresa Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A., por abrirnos sus puertas para el desarrollo de la tesis.

A mis compañeros del proyecto de biogás, por estar ahí compartiendo sus conocimientos y apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	x
AGRADECIMIENTO.....	vii
RESUMEN	xiv
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.PROBLEMÁTICA DEL PROBLEMA.....	3
1.1.FORMULACION DEL PROBLEMA.....	4
1.1.1. Problema General.....	4
1.1.2. Problemas Específicos.....	5
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. ANTECEDENTES.....	6
2.2. BIOGÁS.....	7
2.2.1. Características del biogás.....	7
2.3.GENERACIÓN DE BIOGÁS.....	8
2.3.1. Hidrólisis.....	9
2.3.2. Etapa fermentativa o acidogénica.....	11
2.3.3. Etapa acetogénica.....	12
2.3.4. Etapa metanogénica.....	13
2.3.5. Caracterización del biogás.....	17
2.3.6. Reactor anaerobio.....	19
2.3.7. Biodigestor.....	21
2.3.8. Efecto de la presencia de H ₂ S.....	23
2.3.9. Causas de la concentración CO ₂	26
2.3.10. Biogás y otras fuentes energéticas.....	28
2.3.11. Tecnologías de purificación de gases.....	29
2.3.12. Tecnologías de purificación de biogás.....	41
2.3.13. DEGRADACIÓN DE LA MONOETANOLAMINA.....	57
CAPITULO III. METODOLOGIA.....	61
3.1. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
3.2. UBICACIÓN, POBLACIÓN Y MUESTRA.....	63
3.2.1. Ubicación.....	63
3.2.2. Población.....	63
3.2.3. Muestra.....	64

3.3. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	64
3.3.1. Selección del lugar de instalación.....	64
3.3.2. Diseño y construcción del equipo experimental.....	65
3.3.3. Instalación del equipo experimental.....	67
3.3.4. Monitoreo de la concentración de CH ₄ , CO ₂ y H ₂ S.....	67
3.3.5. Determinación de la concentración de metano.....	70
3.4. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	71
3.4.1. Materiales	71
3.4.2. Herramientas y equipos.....	71
3.4.3. Insumos	72
3.5. PROCESAMIENTO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS	72
3.6. TRATAMIENTO DE DATOS	73
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
4.1. EFICIENCIA DE ABSORCIÓN DE LA MONOETANOLAMINA	74
4.1.1. Composición Volumétrica Del Biogás.....	74
4.1.2. Absorción De Mea-CO ₂	76
4.1.3. Absorción De Mea-H ₂ S.....	77
4.1.4. Absorción Porcentual Total.....	78
4.2. COMPORTAMIENTO DE LA MEA EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN ..	80
4.2.1. Comportamiento CO ₂ – Mea.....	80
4.2.2. Comportamiento De H ₂ S - Mea	81
4.3. CONCENTRACIÓN DE METANO EN EL FLUJO DE BIOGÁS.....	82
CAPITULO V. CONSLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
5.1. CONCLUSIONES	85
5.2. RECOMENDACIONES	86
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	88
ANEXOS	93
ANEXO 1.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición del biogás derivado de diversas fuentes.....	8
Tabla 2. Bacterias que participan en el proceso de fermentación durante las cuatro fases.....	14
Tabla 3. Condiciones de funcionamiento típicas en el biodigestor.....	17
Tabla 4. Métodos de caracterización de biogás	18
Tabla 5. Porcentaje de composición del biogás, en función del sustrato utilizado en la producción	19
Tabla 6. Equivalencias energéticas entre el biogás y el biometano	28
Tabla 7. Alternativas para remover el CO ₂ de flujos de biogás	37
Tabla 8. Alternativas para la remoción de H ₂ S.....	38
Tabla 9. Características de la monoetanolamina	49
Tabla 10. Resumen de remoción de gases ácidos	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de las reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.....	10
Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia porcentual	16
Figura 3. Equipos de medición de concentración de biogás proyectadas por fuente 2017. Fuente. A) sensor de gas, Seeed Studio, B) sensor de CO ₂ , BENETECH, C) sensor de H ₂ S, PCE Instruments.	19
Figura 4. Sistemas Anaerobios de Primera, Segunda y Tercera Generación	20
Figura 5. Modelos de biodigestores.	23
Figura 6. Efectos del H ₂ S en los componentes del motor. Válvula de escape, corrosión en la corona del pistón, ataque químico sobre la superficie.....	26
Figura 7. CO ₂ gas de efecto invernadero	27
Figura 8. Absorción química y sus procesos.....	32
Figura 9. Sistema de purificación con membranas	35
Figura 10. Diagrama de las tecnologías para purificación de biogás.....	41
Figura 11. Proceso Rédox.	43
Figura 12. Mecanismo de adsorción por medio de carbón activado.	44
Figura 13. Estructura química de alcanolaminas empleadas en el proceso de captura de CO ₂	45
Figura 14. Clasificación de las alcanolaminas según el número de cadenas enlazados al nitrógeno	46
Figura 15. Estructura química de la monoetanolamina.	47

Figura 16. Mecanismo de reacción termolecular para la formación de carbonato según Crooks y Donnellan	52
Figura 17. Representación del gas ácido en dos medios (vapor y líquido). 56	
Figura 18. Mecanismo de abstracción de electrón en la degradación oxidativa de la monoetanolamina	59
Figura 19. Prototipo de purificación del biogás con temperatura regulada .62	
Figura 20. Ubicación de la empresa INDOLMASA.....	63
Figura 21. Esquema del montaje experimental.	72
Figura 22. Plano Distribución General Biogás.....	64
Figura 23. Equipo experimental.	66
Figura 24. Ubicación del equipo experimental en la casa de fuerza.	67
Figura 25. Estructura de analizador de gases portátil.	68
Figura 26. Determinación de concentración de gases en biogás.....	68
Figura 27. Prueba de fuga en el analizador de gases portátil.	68
Figura 28. Equipo analizador de gases portátil terminado.	68
Figura 29. Composición de biogás a partir de aguas residuales de la extracción de aceite de palma.....	74
Figura 30. Eficiencia de absorción del dióxido de carbono por diferentes concentraciones de la monoetanolamina en flujos de biogás. ...	76
Figura 31. Eficiencia de absorción del dióxido de carbono por diferentes concentraciones de la monoetanolamina en flujos de biogás. ...	77
Figura 32. Absorción de CO ₂ a diferentes concentraciones de monoetanolamina.....	78
Figura 33. Absorción de H ₂ S a diferentes concentraciones de monoetanolamina.....	79

Figura 34. Comportamiento de dióxido de carbono en el proceso de absorción de gases ácidos.....	80
Figura 35. Comportamiento del sulfuro de hidrógeno en el proceso de absorción de gases ácidos.....	81
Figura 36. Concentración de metano en biogás después de la purificación.....	83
Figura 37. Filtros de sulfuro colocados de forma vertical por donde pasa el biogás y llega a los gasómetros.....	94
Figura 38. Dispositivo de medición del sistema arduino.....	94
Figura 39. Sensor cubierto con pintura epóxica con el fin de evitar corrosión.....	94
Figura 40. Sensor cubierto con pintura epóxica con el fin de evitar corrosión.....	94
Figura 41. Equipo de medición de los gases ácidos en el proceso de purificación.....	95
Figura 42. Biodigestores del proyecto bioenergía ejecutado por NEGASUS.....	95
Figura 43. Gasómetros para cada biodigestor colocados de forma suspendida y con sus respectivas conexiones.....	95

RESUMEN

El trabajo de investigación tuvo como finalidad demostrar que el uso de alcanolaminas para la purificación del biogás a partir de aguas residuales de una industria de extracción de aceite de palma es una alternativa eficiente, por ello se realizaron mediciones del dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano y el tiempo de composición inicial del biogás y final, después de su purificación a través de sensores conectados a un sistema arduino. Los tratamientos estuvieron conformados por diluciones de la monoetanolamina en concentraciones de 23.5%, 24%, 24.5%, 25%, 25.5% y 26%, obteniendo como resultados que la mejor eficiencia de absorción de los gases ácidos es a una concentración de monoetanolamina de 24%, con remociones de hasta el 90% para el CO₂ y el 93% para el Sulfuro de Hidrogeno-H₂S. Con concentración de 23.5% se alcanza una remoción del 94% de sulfuro de hidrógeno-H₂S presente en el biogás; siendo el porcentaje que reduce el riesgo de corrosión por uso de este combustible en partes metálicas del equipo en donde se efectuará su combustión.

Palabras Claves: Biogás, monoetanolamina, alcanolaminas, adsorción, biometano.

SUMMARY

The purpose of the research work was to demonstrate that the use of alkanolamines for the purification of biogas from wastewater from a palm oil extraction industry is an efficient alternative, therefore measurements of carbon dioxide, hydrogen sulfide, methane were made and the time of initial composition of the biogas and final, after its purification through sensors connected to an arduino system. The treatments were made up of dilutions of the monoethanolamine in concentrations of 23.5%, 24%, 24.5%, 25%, 25.5% and 26%, obtaining as a result that the best absorption efficiency of the acid gases is at a concentration of monoethanolamine. 24%, with removals of up to 90% for CO₂ and 93% for Hydrogen Sulfide-H₂S. With a concentration of 23.5%, a 94% removal of hydrogen sulfide-H₂S present in the biogas is achieved; being the percentage that reduces the risk of corrosion due to the use of this fuel in metallic parts of the equipment where its combustion will take place.

Keywords: Biogas, monoethanolamine, alkanolamines, adsorption, biomethane.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía para cubrir las necesidades básicas de la población, la mayoría de ellas de fuentes no renovables, contribuyen de alguna u otra forma al calentamiento global y por ende a la búsqueda y desarrollo de fuentes de energías renovables, es el caso del uso del biogás en industrias como las plantas extractoras de aceite de palma, las cuales vienen produciendo biogás a partir de sus aguas residuales industriales, mediante sistemas simples de digestión o complejos.

El biogás compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y en cantidades muy pequeñas de sulfuro de hidrógeno, presenta bajo poder calorífico debido a la concentración de CO_2 presente en el biogás, y por otro lado la concentración en ppm de sulfuro de hidrógeno corroe las partes metálicas del equipo donde se realiza la combustión. Por todo lo mencionado anteriormente ha sido necesario realizar el proceso de purificación, siendo las alcanolaminas compuestos químicos eficiente para lograr la remoción de CO_2 y H_2S .

El estudio estuvo conformado por diluciones de la monoetanolamina en concentraciones de 23.5%, 24%, 24.5%, 25%, 25.5% y 26%, los cuales se encuentran en un equipo burbujeador diseñado para tal fin, a través de este, pasa el biogás del biodigestor más eficiente del proyecto “Generación de Energía eléctrica y bioabono a partir de los Lodos de planta extractora de aceite de palma, distrito de Neshuya, Provincia de Padre abad”, financiado por INNOVATE Perú del Ministerio de la Producción y Negocios Amazónicos Sustentables E.I.R.L. – NEGASUS.

El objetivo general del trabajo de investigación ha sido Evaluar la eficiencia de la monoetanolamina en la reducción de CO_2 y H_2S en flujos de biogás a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma, “Industrias Oleaginosas Monte Alegre” s.a. (INDOLMASA), en noviembre del 2018, y cuantificando la cantidad de CO_2 y H_2S absorbido por la monoetanolamina, que permitió determinar la concentración de CH_4 presente en el flujo de biogás.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El biogás, combustible proveniente de fuentes naturales renovables, es utilizado como tal para generar energía, y, si este pasa a través de una purificación y sistemas de aprovechamiento eficiente, puede incluso hasta competir con el gas natural y tener múltiples usos. No obstante, el uso de este combustible renovable en cualquiera de sus aplicaciones no es eficiente por la gran presencia volumétrica de dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno (Salazar, 2012).

El poder calorífico depende de la concentración volumétrica de CH_4 y se recomienda que esté a una concentración mayor al 90% (Harasimowicz, 2007). Llegar a esa concentración abarca actividades como la absorción del volumen de los gases ácidos presentes en el biogás, los cuales para el caso del dióxido de carbono debe estar menor al 10% ya que este por su mayor concentración volumétrica en el biogás reduce el poder calorífico de este, y la reducción del sulfuro de hidrógeno menor a 100ppm (Marchaim U. , 1992) lográndose de esa forma que el H_2S no pueda corroer las partes metálicas del equipo en el que se utilice o se realice la combustión.

Para la purificación del biogás encontramos diferentes métodos, algunos de ellos son eficientes reduciendo H_2S , mientras que otros remueven fácilmente el CO_2 , como también encontramos algunos sin complejidad de instalación, por otro lado otros cuentan con sistemas que necesitan mucha inversión monetaria.

Para realizar, y de hecho muy importante, la aplicación del método y su selección como la más eficiente dentro del tratamiento, en este caso del biogás, debemos tener en consideración el flujo de biogás, caracterización del biogás y sus concentraciones, remoción de excedentes y contaminantes, la reutilización del reactivo a emplear o los costos de regenerarlo, cuántas veces se puede recuperar el reactivo o como esta va perdiendo su eficiencia (Salazar, 2012).

Por otro lado, existen empresas o personas individuales que usan biogás con el fin de producir energía eléctrica, que sólo se preocupan por la remoción del H₂S el cual reduce el tiempo de vida de los motores de combustión interna, sin tener en cuenta las consecuencias de la liberación de CO₂ al medio ambiente.

En efecto, teniendo en cuenta la información bibliográfica encontrada sobre purificación de biogás, donde usan soluciones de alcanolaminas y luego de una selección de métodos para tratar al biogás se opta por el uso de la monoetanolamina para la remoción del dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. La monoetanolamina tiene la propiedad de eliminar gases ácidos del biogás, e incluso se pueden recuperar, por todo lo mencionado anteriormente se propone a la MEA como propuesta de investigación para la purificación de biogás.

1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA

1.1.1. Problema General

- ¿Cuál es la eficiencia de absorción de la solución acuosa de monoetanolamina en la reducción de CO₂ y H₂S en flujos de biogás

a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma,
“Industrias Oleaginosas Monte Alegre” S.A. (INDOLMASA)?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿qué cantidad de CO_2 y H_2S se podrá absorber con la monoetanolamina en el proceso de endulzamiento del biogás a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma, “Industrias Oleaginosas Monte Alegre” S.A. (INDOLMASA)?
- ¿cuál es el comportamiento de la monoetanolamina en el proceso de endulzamiento del biogás a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma, “Industrias Oleaginosas Monte Alegre” S.A. (INDOLMASA)?
- ¿cuál es la concentración de CH_4 presente en el flujo de biogás a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma, “Industrias Oleaginosas Monte Alegre” S.A. (INDOLMASA)?

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Las proporciones de concentración del dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno en las diluciones de las alcanolaminas son susceptibles a cambios de temperatura como de presión, tales condiciones dificultan el análisis de cuantificación con los métodos convencionales. Por lo que suficiente información sobre la eficiencia de absorción o purificación de los gases ácidos CO₂ y H₂S con las aminas no se encuentra, como también su capacidad de absorción cuando la solución es regenerada y en qué cantidades se deben suministrar monoetanolamina inicial en el caso en que la solución recuperada disminuya su concentración.

Se encontraron dos proyectos con respecto a este tema, los cuales fueron citados como referencia y acceso a la información, uno de ellos realizado por Salazar (2012), el cual al mismo tiempo tuvo información del proyecto “Filtración de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno presentes en el biogás utilizado en las plantas eléctricas de potencia-MOPESA”, realizado en el país de México, con la asociación clave del Tecnológico de Monterrey y del Consejo Mexiquense de la Ciencia y la Tecnología-COMECYT, como también la participación de una empresa también clave, la empresa de origen mexicana Motores Power S.A., durante el año 2010. El proyecto mencionado tenía como propósito diseñar, elaborar y evaluar cierto filtro para el biogás utilizando disoluciones de alcanolaminas en diferentes concentraciones, cuya ventaja era la recuperación del reactivo. El presente trabajo de investigación

cita y analiza los resultados obtenidos en el proyecto MOPESA, con respecto a la purificación de biogás utilizando las alcanolaminas al finalizar la ejecución del proyecto, el cual fue desarrollado por CIMA, en donde se viene investigando últimamente la eficiencia de absorción del CO₂ y el H₂S con la intención de efectuar una publicación científica. El cual permitirá el desarrollo de esta investigación y encontrar la eficiencia de absorción en soluciones recuperadas de MEA.

2.2. 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 directamente proporcional al volumen de metano presente en él o su concentración. Para su uso como combustible renovable en motores cuya combustión es interna, se recomienda que el metano esté a una concentración mayor al 90% (Harasimowicz, 2007). Sin embargo el CO₂ 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 U. , 1992).

2.2.1. Características del biogás

La tabla siguiente resume la composición promedio del biogás según la fuente. El valor calorífico varía entre 17 y 34 MJ/m³ según el contenido del metano.

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 ₂ O	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	corrosivo
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	combustible
H ₂ S	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

Fuente.(Carrillo, 2003)

2.3. 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:

1. Hidrolisis
2. Etapa fermentativa o de acidogénesis

3. Etapa acetogénica

4. Etapa metanogénica

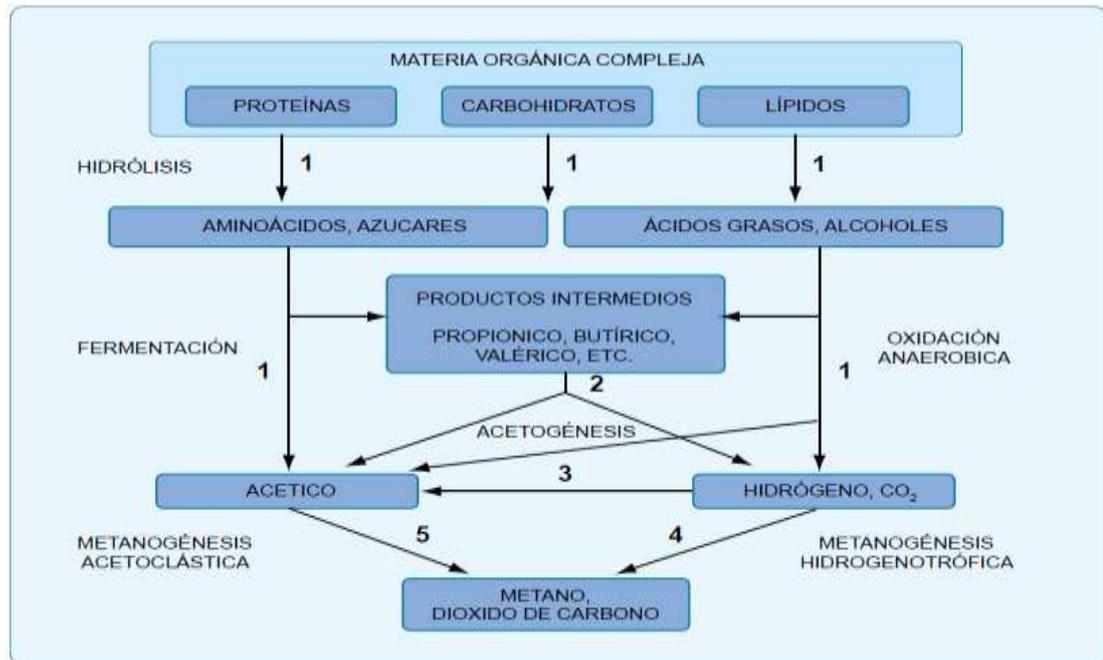
La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares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

2.3.1. 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.

2.3.2. 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, H₂) 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.

2.3.3. Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH₃COO⁻) e hidrógeno (H₂), 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 H₂/ CO₂) 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.

2.3.4. 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 , formato, 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 H₂/CO₂ y 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 H₂ 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.

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

Taxonomía	Especies	Descripción	Metabolismo
Género: <i>Acetobacterium</i>	<i>A. woodii</i> <i>A. paludosum</i>	El género <i>Acetobacter</i> comprenden un 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 CO ₂ , utilizando el hidrógeno como fuente de electrones. Estos microorganismos hacen posible la descomposición de los ácidos grasos y compuestos aromáticos.
Género: <i>Eubacterium</i>	<i>E. rectale</i> <i>E. siraeum</i> <i>E. plautii</i> <i>E. cylindroides</i> <i>E. brachy</i> <i>E. desmolans</i> <i>E. callandrei</i> <i>E. limosum</i>	El género <i>Eubacterium</i> consiste en un grupo de bacterias anaeróbicas obligadas Gram – positivas.	La mayoría de las <i>Eubacteria</i> sacarolíticas producen butirato 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

- **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.

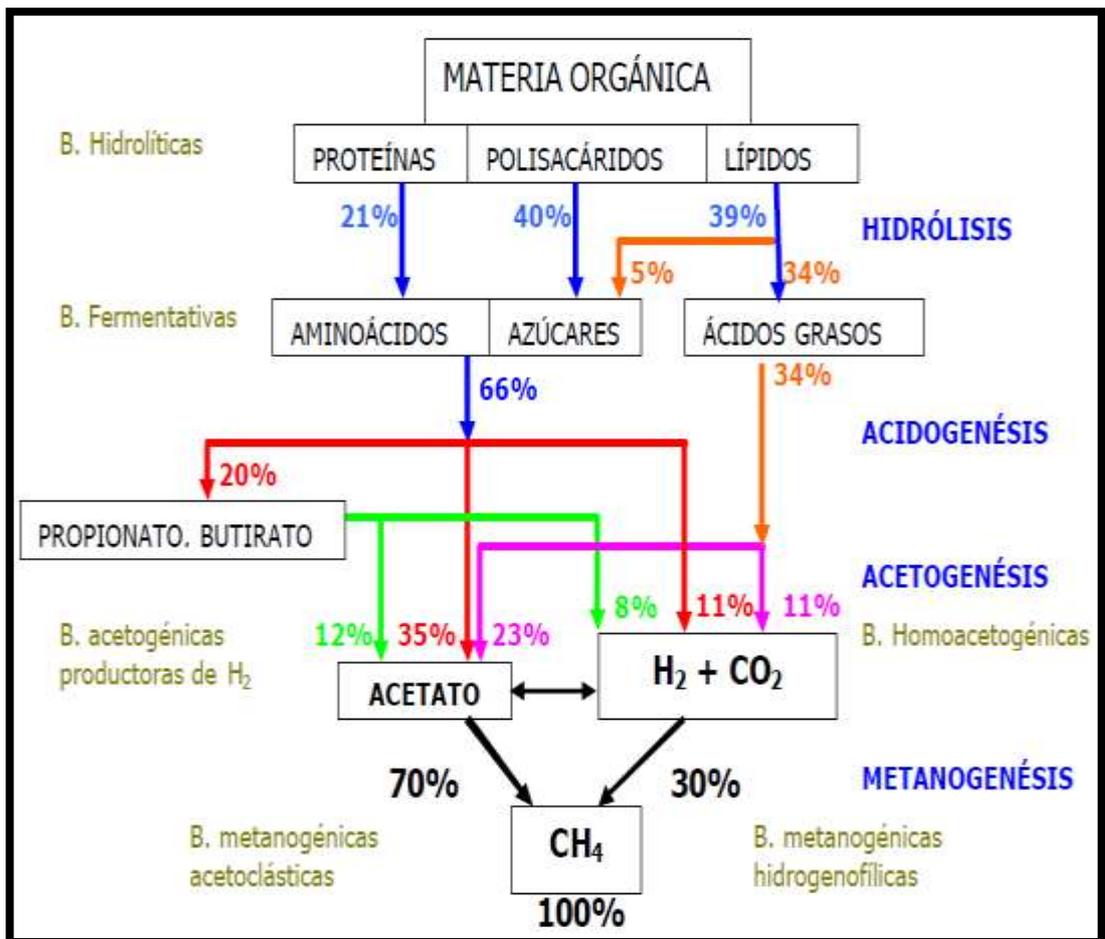
- **Bacterias que participan de la acetogénesis**

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.

- **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 H₂. 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*.



Fuente: (MADIGAN & Mertinko, 1997).

Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia porcentual.

Según a 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 al metanogénesis acetoclástica se desarrolle eficientemente.

Tabla 3. Parámetros típicos en la operación de biodigestores.

Parámetro	Valor
Temperatura adecuada de funcionamiento	20-30°C
Tiempo de retención	40-100 días
Presión de operación	1 psi g. El suministro al motor de combustión se efectúa por la succión propia.
Producción de biogás	0.3 - 0.5 de m ³ 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 - 3 kg de estiércol por día = 0.15 m ³ gas/D

Fuente: (Silva, 2007).

2.3.5. Caracterización del biogás

La concentración de gases en el biogás depende de la materia prima degradada o de la que procede, la tecnología utilizada y condiciones para la producción de este. Por lo que se debe efectuar un diagnóstico adecuado de la concentración típica del biogás. Este criterio es clave y decisivo en los proyectos cuyo objetivo es la generación de electricidad con este combustible.

En la Tabla 4 se comparan varios métodos de cuantificación más eficientes para determinar la composición de gases en el biogás. Por lo mencionado anteriormente se debe tener en cuenta algunos criterios antes de la selección, con el fin de obtener la mejor alternativa, los cuales son:

- Condiciones favorables de medición en el campo
- Buena exactitud, precisión y coherencia
- Medición propicia de componentes
- Costos aceptables

Según los análisis presentado por Salazar (2012), menciona que la concentración de sulfuro de hidrógeno en las disoluciones de aminas, estas son sensibles a la presión como a la temperatura, lo que convierte a los análisis de espectrofotometría y cromatografía no recomendados para su aplicación, es por ello que no se ha reportado la eficiencia de absorción de CO₂ y H₂S efectuado por las aminas.

Tabla 4. Métodos de caracterización del biogás.

Técnica de medición	Proceso	Ventajas	Desventajas
Química analítica Titulación con solución de yodo Absorción con azul de metilo	Absorción de un gas a purificar. Proceso del precipitado con solución intermedia. Titulación por cambio de color con medición.	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	La muestra del gas de interés es impulsado por medio de un gas portador. Esta muestra ingresa a una columna y se mide el tiempo en donde el gas es retenido, y este es particular para cada uno.	Precisión y exactitud. Separación de los componentes del gas de la muestra.	Altos costos. Medición en laboratorio.
Analizadores Portátiles de gas	Ingresa una muestra del gas de interés a un sistema de medición. Posteriormente se realiza de medición del biogás.	Método simple de medida. Precisión.	Bajos rangos de medida. Costos moderados.

Fuente: (Huertas, 2010).

En el presente proyecto de investigación se utilizará sensores.



Fuente: A) sensor de gas, Seeed Studio, B) sensor de CO₂, BENETECH, C) sensor de H₂S, PCE Instruments.

Figura 3. Equipos de medición de concentración de biogás proyectadas por fuente 2017.

Tabla 5. Porcentaje de composición del biogás, en función del sustrato utilizado.

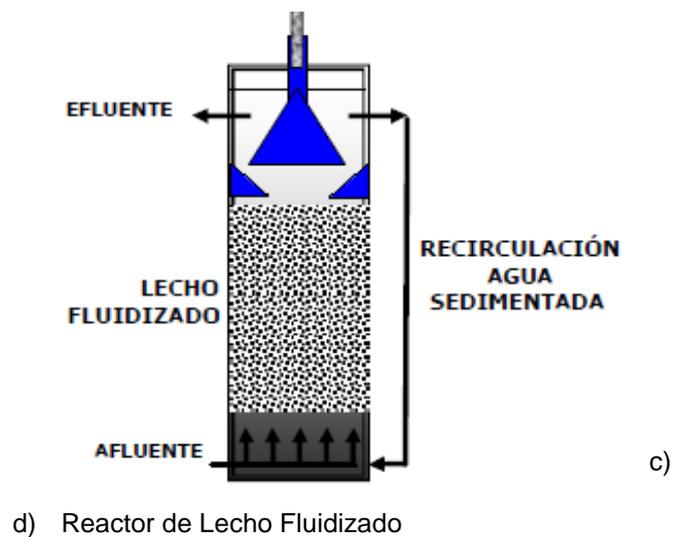
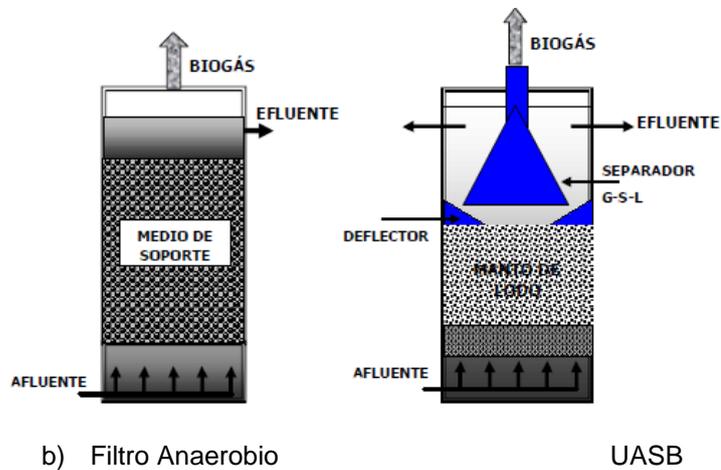
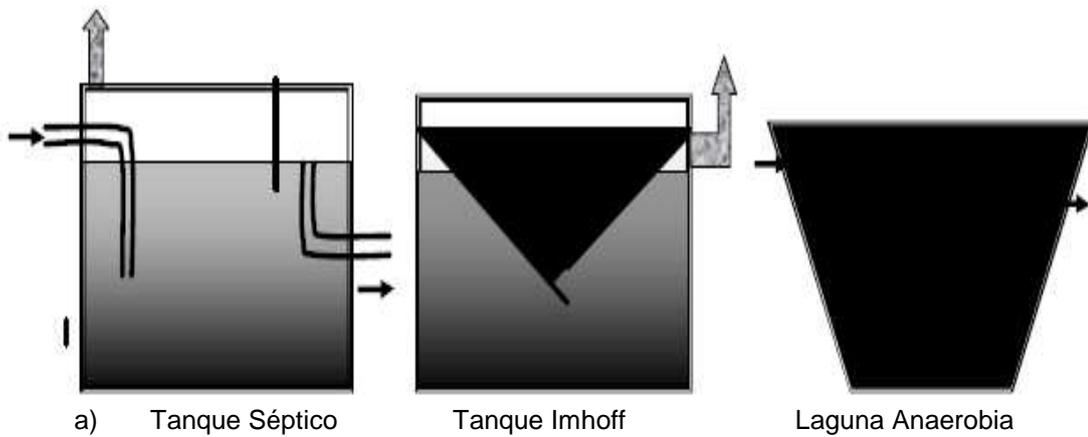
Gases	Desechos agrícolas	Lodos de depuradora	Desechos industriales	Gas de vertedero	Composición deseada
CH ₄	50-80%	50-80%	50-70%	46-65%	>90%
CO ₂	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%	<10%
Vapor de agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Irrelevante
H ₂	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	Irrelevante
H ₂ S	100 - 70000ppm	0-1%	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)

2.3.6. 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, lo cual significa menores volúmenes del reactor, costos más bajos, sistemas

más estables y de más fácil operación (DÍAZ-BÁEZ,2002; van HAANDEL, 1994).



Fuente: (Carrillo, 2003).

Figura 4. Sistemas Anaerobios de Primera, Segunda y Tercera Generación.

2.3.7. 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 clases 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

2.3.7.1. Tipos De Digestores Anaeróbicos

A continuación se presenta a clases de biodigestores según la frecuencia de alimentación (Schlaefli, 2010):

- **Discontinuo**

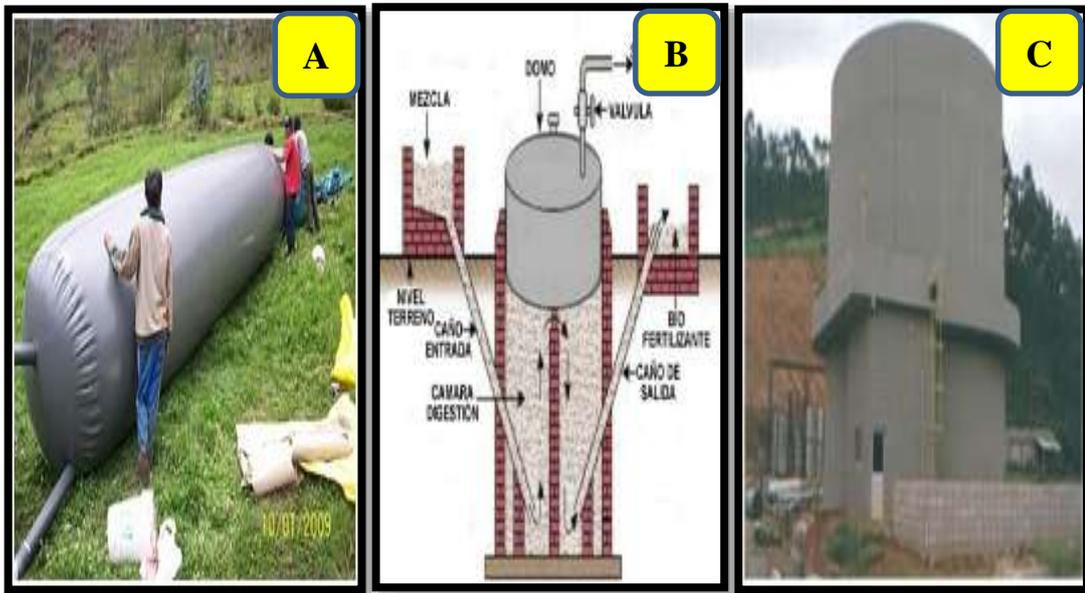
Aquellos biodigestores que después de cargado el sustrato, ya no se puede retirar a suministrar otro. Conocido por otro lado como de carga, por lo que se efectúa por una sola vez y luego se cubre o cierra herméticamente durante 20 - 50 días, y se realiza la descarga después que la producción de biogás descienda.

- **Semicontinuo**

La carga del sustrato se realiza de forma diaria, la cual representa al total del volumen calculado. Entre los modelos más notorios en esta clasificación son del tipo Chino, tipo Hindú, y otro de costo bajo que es el tubular hecho de polietileno.

- **Sistema Continuo**

Muestra flujo constante de biomasa al inicio y salida en su interior. Son grandes tecnologías compactas, con recirculación necesaria, donde se utilizan equipos adicionales para alimentarlo, darles condiciones de calefacción, agitación específica y control de producción.



Fuente: (Antonio, 1996).

Figura 5. Modelos de biodigestores. a) Biodigestor continuo horizontal, b) Biodigestor Semicontinuo Hindú, c) Biodigestor discontinuo Batch.

2.3.8. Efecto de la presencia de H₂S

La exposición industrial límite recomendado son de 8 a 10 ppm por 8 horas de trabajo al día por semana (Horikawua, 2001).

El alto contenido de H₂S (~3500 ppm) causa corrosión en las partes metálicas en el interior del motor. El H₂S es un ácido inorgánico que ataca a la superficie de los metales cuando estos son expuestos en contacto directo.

Se ha encontrado que el H₂S disminuye el tiempo de vida de los motores entre 10 a 15% (Horikawua, 2001). El ácido sulfhídrico contenido en el biogás (de 0.1 a 0.5%), es altamente corrosivo. Los fabricantes de motores especifican un valor máximo permisible de 0.15% en volumen, es decir 1500 ppm (Mitzlaff, 1988).

La presencia de ácido sulfhídrico en el biogás, aun cuando puede ser inferior al 1%, resulta una dificultad cuando se trata de utilizar el biogás en

motores, refrigeradores, calentadores u otros dispositivos metálicos que pueden ser afectados por este gas corrosivo (TÉLLEZ, 2008).

La corrosión producto de la concentración de sulfuro de hidrógeno se manifiesta cuando el metal alcanza el contacto con el gas ácido H_2S y su reacción forma sulfuros de hierro como también hidrógeno elemental. El flujo de hidrógeno resultante de la corrosión del sulfuro húmedo aumenta como también disminuye el pH desde este hasta casi al rango neutral. La corrosión a los valores de pH más bajos (más ácidos) es causada por mayores concentraciones de H_2S en el agua, mientras que la corrosión a los valores de pH más altos (más alcalinos) es causada por mayores concentraciones del ion bisulfuro en el agua, causando desgaste sobre la pieza metálica, opacando su color y formando grietas en la superficie (Gosh, 2007).

Un producto de combustión de H_2S es el SO_2 , lo que hace que los gases de escape sean muy corrosivos (ácido sulfúrico) y contamine el medio ambiente (lluvia ácida). La sangre se vuelve de color marrón a color verde oliva. El H_2S es muy venenoso (comparable al cianuro de hidrógeno): con un límite tóxico inferior de 10 ppm. 1,2 - 2,8 mg de H_2S por litro de aire (0,117%) mata instantáneamente, 0,6 mg de H_2S por litro de aire (0,05%) mata dentro de 30 minutos a una hora. El transporte de oxígeno se ve obstaculizado. La persona se sofoca "internamente". Los síntomas son irritación de las mucosas (incluyendo los ojos), náuseas, vómitos, dificultad para respirar, cianosis (decoloración de la piel), delirio y calambres, luego parálisis respiratoria y paro cardíaco. En concentraciones mayores, la parálisis respiratoria inmediata y el paro cardíaco son los únicos síntomas. Incluso si una persona sobrevive a la

intoxicación, el daño a largo plazo al sistema nervioso central y al corazón puede permanecer (Marchaim U. , 1992).

La presencia de gas H_2S en el biogás lo hace corrosivo para las piezas metálicas: el hierro y las piezas galvanizadas están sujetas a ataque superficial, aunque no a corrosión mayor. El efecto sobre los metales no ferrosos en componentes, tales como reguladores de presión, medidores de gas, válvulas y montajes, es mucho más grave. El producto de la combustión, SO_2 se combina con el vapor de agua y corroe mal el lado de escape de los quemadores, de las lámparas y de los motores de gas. La combustión de biogás en estufas y calderas también puede dañar la chimenea. El ácido que se forma corroe las partes del motor en la cámara de combustión, el sistema de escape y en varios cojinetes. Esto se ve reforzado por los arranques frecuentes, tiempos cortos de funcionamiento y las temperaturas relativamente bajas al arrancar y después de cortar el motor. El sistema de refrigeración por agua también proporciona los medios (agua necesaria para formar ácido sulfúrico) para la corrosión. El funcionamiento de los motores con gas que contiene H_2S puede reducir el tiempo de servicio a la primera revisión general en un 10-15%. El contenido de azufre del biogás utilizado en los motores de gas acorta el tiempo entre los cambios de aceite y las revisiones.

El SO_2 de la combustión y el vapor de agua se disuelven en el aceite lubricante. El aceite se vuelve ácido, y sus propiedades cambian, perdiendo su capacidad de lubricar y a veces corroer componentes metálicos. En condiciones de funcionamiento continuo, el intervalo entre los cambios de aceite se reduce a 200 - 250 horas. Si el biogás se quema para la cocción y la iluminación en cuartos mal ventilados, los ocupantes serán cargados por

SO₂ en el aire. Los indicadores son tos, irritación de las membranas mucosas, riego de los ojos y la corrosión de las superficies metálicas. Una vez generado el biogás no puede utilizarse directamente, sin la apropiada remoción del H₂S, ya que el directo uso no es posible como combustible, no es posible (Gaete, 2007).



Fuente: (Valderrama, Flores, Bejar, & Quispe, 2009)

Figura 6. Efectos del H₂S en los componentes del motor. Válvula de escape, corrosión en la corona del pistón, ataque químico sobre la superficie, mostrados de izquierda a derecha.

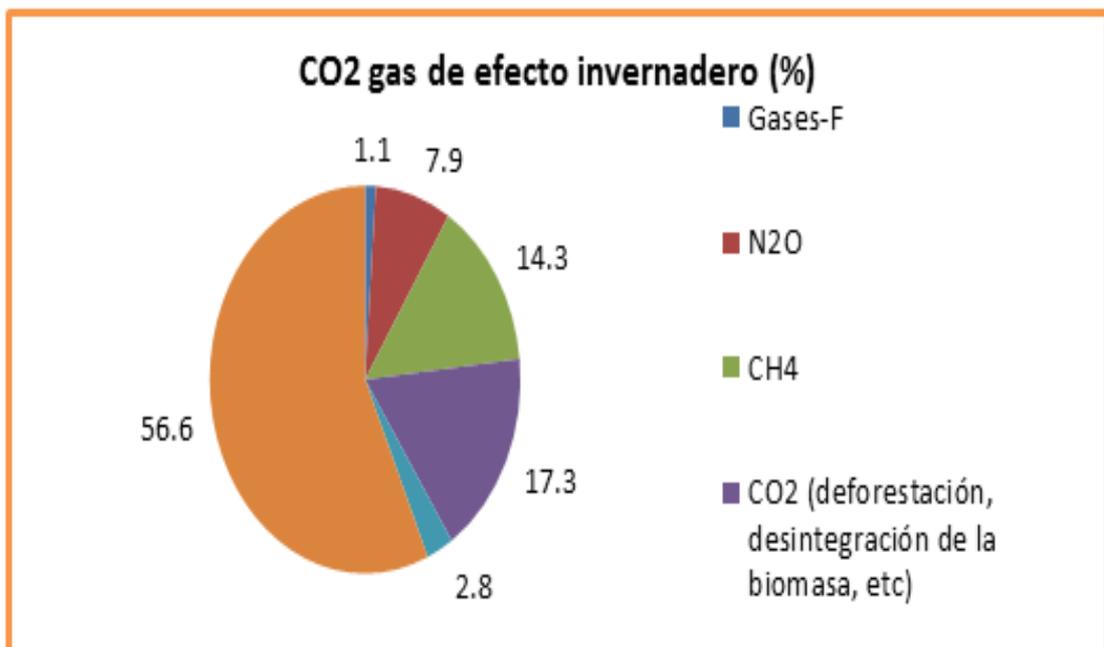
2.3.9. Causas de la concentración CO₂

El biogás utilizado como combustible presenta una baja densidad de energía en base volumétrica, comparada con otros combustibles debido al alto contenido de CO₂ su velocidad de deflagración es menor comparada con otros gases como gas licuado del petróleo y gas natural; así mismo presenta una mayor temperatura de autoignición y un intervalo de inflamabilidad menor. Estas diferencias se presentan debido a que la concentración de CO₂ en el biogás ocasiona efectos térmicos y cinéticos que afectan las propiedades de

combustión del biogás con respecto a las del metano, ocasionando que se disminuya las posibilidades de aplicación como combustible en diferentes tecnologías (Forsich, 2004; Porpatham, 2008; Walsh, 1988).

Con considerados contaminantes el sulfuro de hidrogeno ya que produce daños a la salud, efectos ambientales adversos y corrosión en la maquinaria industrial y dióxido de carbono que disminuye poder calorífico de la mezcla gaseosa (González, 2006; Etcharren, 2005).

El CO₂ siendo este un gas inerte, cuyo poder calorífico es cero, el cual reduce el poder calorífico del biogás, contribuye con su volumen presente en el biogás a reducir el poder calorífico de este. Dicha reducción influye en su potencia como combustible en un sistema de generación de energía. Por otro lado al ser el CO₂ un gas inerte es liberado a la atmósfera y como resultado se contribuye al calentamiento global, por lo que es necesario disminuir este en concentraciones menores al 10% (Salazar, 2012).



Fuente: (IPCC, 2007).

Figura 7. CO₂ gas de efecto invernadero; Fuente. (IPCC, 2007).

2.3.10. Biogás y otras fuentes energéticas

La utilización de biogás no podría reemplazar a otro combustible como por ejemplo al gas natural o el gas licuado de petróleo (GLP) en escalas proporcionales, por lo que necesitamos efectuar cálculos para determinar la capacidad calorífica, su comportamiento, composición y otras características propios de los combustibles para poder determinar las equivalencias (TecProvider,2002).

Tabla 6. Equivalencias energéticas del biogás y del biometano.

Clase de combustible	Cantidad equivalente
1 m ³ biogás purificado o de gas natural	Equivale 1.32 L - GLP
	Equivale 0.94 L - Diésel
	Equivale 1.10 L - gasolina
1 L - GLP	Equivale 0.75 m ³ - gas natural
1 m ³ - biogás	0.61 L - petróleo
	Equivale 0.58 L - alcohol
	Equivale 0.9 kilogramos de carbón
	1.7 kW/h – eficiencia <30%
	Equivale 0.5 kilogramos - kerosén
	Equivale 1.3 kilogramos - madera
	Equivale 1.2 kilogramos - bosta seca
	Equivale 0.65 L gas-oil
	Equivale 0.8 L - gasolina
	Equivale 1.5 kilogramos de carbón

Fuente: (TecProvider, 2002).

2.3.11. Tecnologías de purificación de gases

Existen tres tipos básicos de captura de CO₂; en Pre-combustión, en Post-combustión (o Secuestro de CO₂) y en Oxi-combustión. El uso de cada uno de las tecnologías de purificación dependerá de parámetros tales como cantidad concentrada de CO₂, condiciones de presión y el que clase de combustible se utilizará. A continuación se profundiza con mayor detalle cada uno de éstos procedimientos de manera de captar virtudes y defectos en la aplicación de cada uno de ellos (Tecnologías de captura y secuestro de CO₂, 2008).

- **Precombustión**

Este sistema está muy relacionado con la producción de hidrógeno, el cual es un agente muy importante en distintos procesos, entre los cuales se incluyen:

- Generar energía eléctrica o calor (produciéndose únicamente vapor de agua).
- La síntesis de amoníaco.
- La producción de fertilizantes.
- Los hidroprocesamientos en las refinerías de petróleo.

Básicamente consiste en producir, a partir de gas natural o gas sintético (proveniente de la gasificación de carbón u otros hidrocarburos), una mezcla gaseosa compuesta principalmente del hidrógeno mencionado H₂ y

CO₂ para posteriormente separar estos dos gases. La separación se basa en la descarbonización del combustible antes de la combustión mediante técnicas de gasificación del carbón o reformado del gas natural.

- **Post-Combustión**

En este sistema, el CO₂ se ha separado de los gases de escape producidos durante la combustión (principalmente N₂) con aire de un combustible (carbón, gas natural etc.). Para su captura posterior, entre los procesos más viables se encuentran el ciclo de Calcinación – Carbonatación y la absorción química con aminas. El resto de las opciones es menos utilizado ya sea por su bajo desarrollo o por los altos costos que implican. Dentro de ellas se encuentran la adsorción física, la destilación criogénica y las membranas.

- **Oxi-Combustión**

Este proceso se realiza durante la combustión y tiene un largo recorrido como tecnología aplicada. Básicamente consiste en la utilización de oxígeno en lugar de aire para la combustión, de ahí que los gases de escape están compuestos principalmente de H₂O y CO₂, que puede separarse fácilmente del vapor de agua mediante condensación.

La aplicación de estas líneas de purificación del biogás dependerá de la cantidad volumétrica de dióxido de carbono, las condiciones de presión del gas combustible y el combustible a emplearse a utilizarse (Muñoz, 2008). Estas líneas de ejecución también se pueden emplear para capturar o reducir otros tipos de gases, como es el caso del sulfuro de hidrógeno, reemplazando

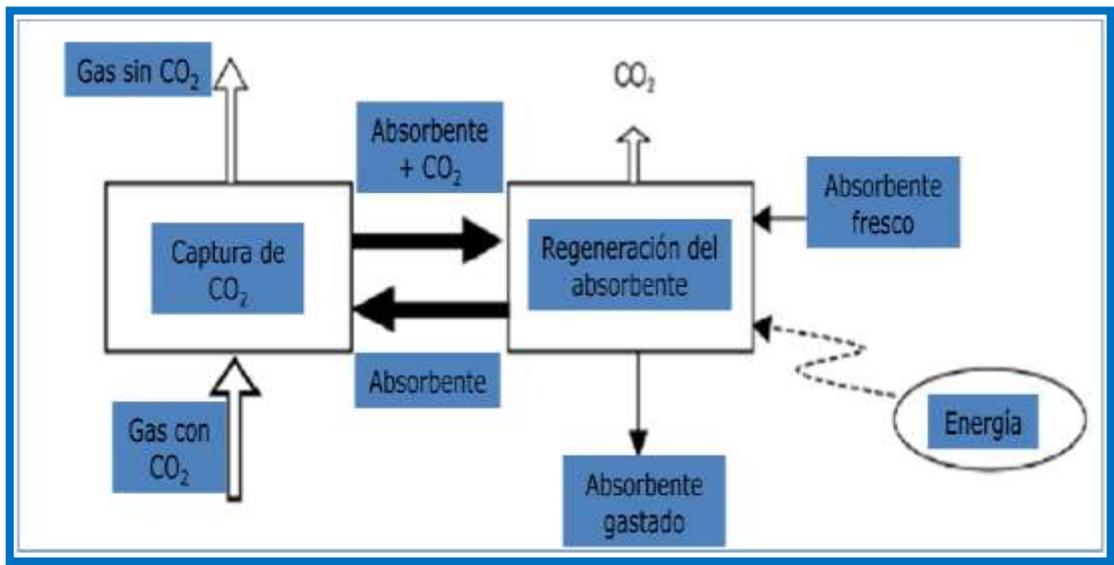
o cambiando la solución a utilizar, acoplándose las torres donde se efectuará la absorción o seleccionando soluciones adecuadas que tengan eficiencia en la remoción de dos clases de gases (o más) en el mismo proceso. Los métodos aplicados en la purificación de gases aún se vienen desarrollando para aumentar su eficiencia o reducir el consumo de energía. Entre los más usuales en la industria tenemos:

A) Absorción química con compuestos líquidos

La absorción química trata de la separación de los componentes que conforman una mezcla gaseosa, ayudándose de un solvente líquido, con el que alcanzará una solución. Estos procesos de absorción química conforman la tecnología más utilizada en la industria de la separación de CO₂ de un flujo de gases, siendo un método conveniente en los procesos de purificación de gas natural. Como base de todos estos procesos es una relación de base alcalina, comúnmente las amoníacas, en una solución acuosa con flujo de gas ácido. La mayoría de todos los procesos industriales de absorción presentan una reacción química, lo cual ayuda a aumentar la velocidad de la transferencia de masa y aumentar la capacidad del absorbente en la corriente del gas (Chakravarti, 2001).

La absorción de un gas físicamente contaminante de una corriente de gas por medio de un líquido absorbente, se manifiesta por movimientos turbulentos de contraflujo, donde la especie de interés se transfiere hacia la interfase gas líquido. Cerca de la interfase, el movimiento es esencialmente laminar por lo tanto, el contaminante se verá obligado a recorrer la distancia restante por procesos difusivos. Después de que el contaminante se difunde

en dirección al volumen principal de la corriente del líquido, recorre una distancia dentro de la corriente y nuevamente por procesos turbulentos la especie se adentra al interior del volumen principal del líquido ((Brundick, Sulfatreat estimated performance sheet, 2010), (Wark, 2000)). La gran mayoría de los absorbentes químicos tienen la ventaja de poder ser regenerados con la variación de la temperatura o la presión.



Fuente. (Muñoz, 2008).

Figura 8. Absorción química y sus procesos.

B) Absorción de tipo físico con el uso de líquidos

Esta tecnología es conocido también con el nombre de fregado o limpieza húmeda. El agua es utilizada como absorbente, el cual entra en contacto con el biogás en proceso de purificación (rellenas o no) donde tiene lugar la transferencia de masa del CO_2 y H_2S al agua que fluye a contracorriente. El rango de temperatura en la operación suele ser de 5 a 10 °C, aunque también se puede operar a temperatura ambiente, siendo las presiones de trabajo mayores de 1726 kPa. En este sistema se necesita

regenerar el agua cargada de CO_2 y H_2S , lo que se realiza utilizando una torre donde, de forma instantánea, el CO_2 y H_2S pasan al aire circundante, reincorporando el agua al proceso de absorción; siendo necesario reponer entre 10 y 20% de ésta. Esta es una metodología poco eficiente por las temperaturas y altas presiones de trabajo, encareciendo los costos de operación.

Esta ley infiera que la cantidad o el volumen de gas que podemos disolver va aumentando proporcionalmente con la presión parcial del gas e inversamente con el parámetro de temperatura (Tecnologías de captura y secuestro de CO_2 , 2008).

Entre los absorbentes físicos conocidos tenemos el metanol (MeOH) y el glicol etileno (EG) (Sánchez, 2006).

C) Absorción física en sólidos

Consiste en capturar específicamente las impurezas del gas de interés con el apoyo de materiales sólidos granulados, como consecuencia a los intercambios con su porosidad y con la superficie de las partículas (Fernández & Montalvo, 2004). La mayoría de los procesos de adsorción fueron utilizados con el fin de remover el dióxido de carbono del gas de síntesis para obtención de hidrogeno elemental, sin embargo aún no se ha alcanzado un nivel comercial para el uso de este método (Arenillas, 2006).

Con esta tecnología el proceso trabaja en condiciones casi isotérmicas y consta de dos etapas, una de ellas es la adsorción, que se efectúa a altas presiones, esto se realiza con el fin de que la presión parcial

del gas que será absorbido empieza a elevarse, y en la etapa de recuperación, que se efectúe a presiones menos elevadas, con el fin de liberar y reutilizar lo absorbido (Sánchez et al, 2006).

D) Métodos de condensación

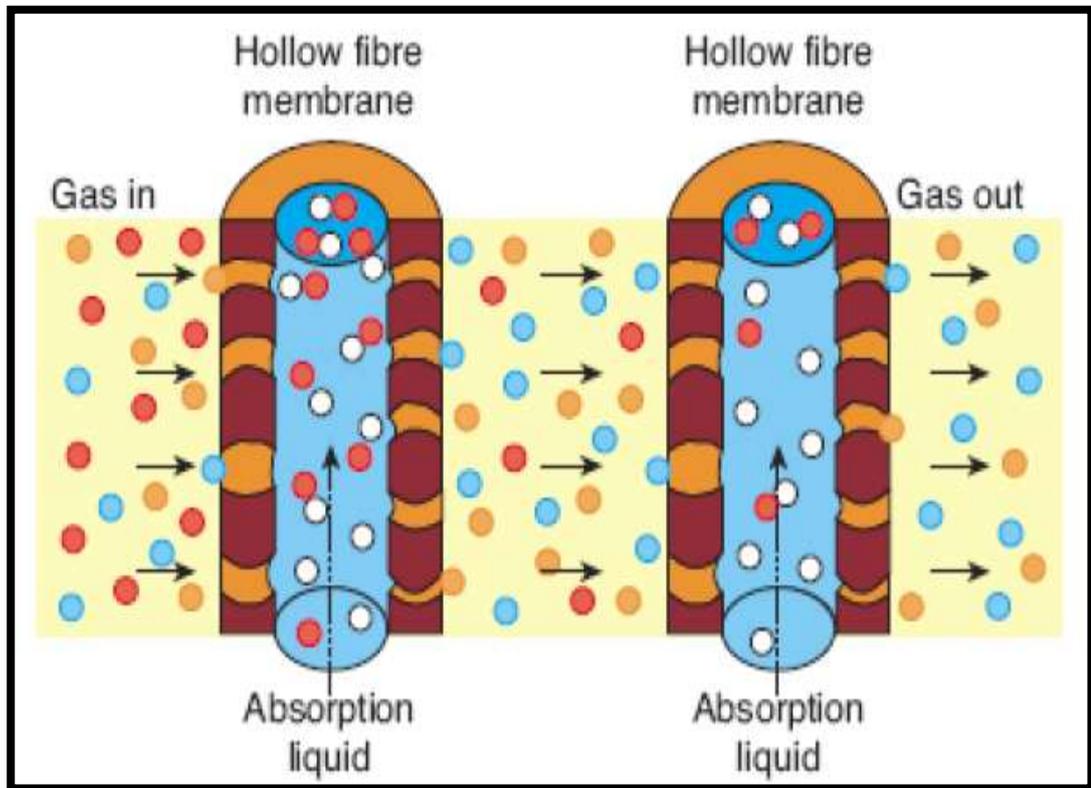
Es el proceso de convertir un gas en un líquido reduciendo la temperatura y / o aumentando presión. La condensación se produce cuando la presión parcial de la sustancia en el gas es menor que la presión de vapor de la sustancia pura a una temperatura dada (Llaneza, Morís, Gonzáles, & Gonzáles, 2010).

E) Purificación con membranas

La tecnología de permeación de un gas a través de una membrana polimérica no rugosa es un proceso complejo que puede involucrar varios pasos entre ellos tenemos a la adsorción del gas en una interfase de la membrana, la solución del gas en la membrana en esa interfase, difusión activada del gas en, y a través de la membrana, desprendimiento del gas de la solución por la interfase opuesta, desorción del gas de la última interfase. El transporte de cada componente se debe a la diferencia de presión parcial sobre la membrana y depende ampliamente de la permeabilidad del componente en el material de la membrana (Morero, 2009).

La permeabilidad del gas a través de la membrana es función de la solubilidad y difusividad del gas en el material de la misma (Llaneza et al, 2010). Para alta purificación de metano, la permeabilidad debe ser alta. Las membranas selectivas las podemos clasificar en dos tipos: las que son

orgánicas y las inorgánicas. Las de tipo orgánicas son adecuadas en la separación de dióxido de carbono del nitrógeno elemental.



Fuente: (Muñoz, 2008).

Figura 9. Sistema de purificación con membranas.

F) Tecnología por incineración

Consiste en la combustión de la materia orgánica en una atmósfera con exceso de aire. En el interior del horno se alcanzan temperaturas de 500 °C que llegan a descomponer la materia orgánica. Toda esta cantidad de calor generada es aprovechada para la obtención de electricidad. La incineración requiere de instalaciones de purificación de los gases de escape para limitar las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Los contaminantes más peligrosos son los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno (Brundick, 2010).

La incineración se emplea con frecuencia en situaciones donde el flujo volumétrico del gas residual de un proceso es grande, en donde el porcentaje de gas contaminante es reducido, siendo esta una tecnología eficiente en el control de contaminantes (Cengel & Boles, 2008).

G) Tecnología biológica

La gran ventaja que presentan estas técnicas, respecto de los sistemas fisicoquímicos es la carencia de contaminantes secundarios, menores costos de inversión y operación por el bajo consumo de reactivos, menor consumo energético al poder trabajar a temperatura ambiente, altas eficiencias de degradación, biomasa inmovilizada en el sistema. Sin embargo, el procedimiento es lento, siendo necesario buscar nuevos microorganismos que reduzcan los tiempos de residencia y hagan más competitivo el proceso a nivel industrial.

Son especialmente útiles en el control de compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y compuestos que emanen fuertes olores (Coto, 2007). Las principales ventajas y desventajas de los métodos biológicos son (Salazar, 2012):

- Capacidad de degradación de contaminantes a productos menos nocivos a temperatura y presión ambiente y costes de inversión moderados.
- Altos rendimientos de degradación en el tratamiento de un elevado número de contaminantes atmosféricos y necesidad de una etapa de acondicionamiento de la corriente de entrada.
- Ciertos compuestos pueden ser letales a los microorganismos.
- Elevada sensibilidad de éstos ante cambios en presión, temperatura y pH.

Tabla 7. Alternativas para remover el CO₂ de flujos de gas.

Método	Opción	Ventajas	Desventajas
Absorción con agua		Alta eficiencia (>97 CH ₄). Eliminación simultánea de H ₂ S cuando H ₂ S<300 cm ³ /m ³ . Capacidad ajustable para cambios de presión o temperatura. Bajas pérdidas de CH ₄ (<2%), tolerante para impurezas.	Inversión y operación cara, obstructor debido al crecimiento de bacterias, posible formación de espuma, baja la flexibilidad hacia la variación de entrada de gas.
Absorción con polietilenglicol		Alta eficiencia (> 97% CH ₄), la eliminación simultánea S, H ₂ S, NH ₃ , HCN y H ₂ O, más energético y favorable que el agua, regenerativo, bajas pérdidas de CH ₄	Inversión y operación costosa, operación difícil, Regeneración incompleta cuando es expuesto / vacío (ebullición Requerido), operación reducida cuando la dilución de glicol es con agua
Absorción química con aminas		Alta eficiencia (> 99% CH ₄). Operación barata, regenerativo, más CO ₂ disuelto por unidad de volumen (Comparado con el agua), muy bajo Las pérdidas de CH ₄ (<0,1%)	Inversión costosa, calor necesario para la regeneración, Corrosión, descomposición y envenenamiento de las aminas por O ₂ u otros productos químicos precipitación de sales, posible espuma
PSA/VSA	Tamices de carbón molecular Tamices de zeolita molecular Silicatos de alúmina	Altamente eficiente (95 - 98% de CH ₄), H ₂ S se elimina, bajo consumo de energía: alta Presión, técnica compacta, también para pequeñas capacidades, tolerante a Impurezas	Inversión y operación costosa, proceso extenso control necesario, pérdidas de CH ₄ por el mal funcionamiento de las válvulas
Tecnología Membrana	Gas/gas Gas/líquido	H ₂ S y H ₂ O se eliminan, simple Construcción, operación simple, Alta confiabilidad, pequeños flujos de gas tratados de forma proporcional. Aumento de costos. -Gas/gas: eficiencia de eliminación: <96% CH ₄ (1 paso) o >96%, se elimina CH ₄ y H ₂ O. -Gas/líquido: eficiencia de remoción >96%, CH ₄ , inversión y operación barata, se puede obtener CO ₂ puro.	Baja selectividad de la membrana: Compromiso entre la pureza de CH ₄ y la cantidad de Biogás, múltiples pasos necesarios (sistema modular) para alcanzar niveles altos pureza, pérdidas de CH ₄
Separación criogénica		Se puede alcanzar 90-98% CH ₄ , CO ₂ Y CH ₄ en alta pureza, bajo extra Costo de la energía para alcanzar el líquido Biometano (LBM)	Inversión y operación costosa. El CO ₂ puede permanecer en El CH ₄
Eliminación biológica		La eliminación de H ₂ S y CO ₂ , Enriquecimiento de CH ₄ , no productos finales	Adición de H ₂ experimental, no a gran escala

Fuente: (Ryckebosch, 2011).

Tabla 8. Alternativas para la remoción de H₂S.

	Alternativa	Rango de aplicación	Ventajas	Desventajas
Regenerativo	Rédox	0.5-15 ton/día of H ₂ S	Alta eficiencia en la eliminación de S elemental formado. Uso de soluciones de baja toxicidad	Requiere una supervisión especializada, producto de baja calidad
	Amina	Altas concentraciones de H ₂ S que 30 ppm y flujos de gas mayores que 10000 m ³ /día	Eficiencia alta en eliminación de CO ₂ y H ₂ S	Costos
	Óxido férrico	Baja escala	Más usado. Eficiencia alta de eliminación (>99%)	Inapropiado para su aplicación a mediana escala. Venta del reactivo
	Carbón Activado	Baja escala	Formación de S elemental	Absorción de CH ₄
No regenerativo	Reactivos sólidos Óxido de zinc Óxido de hierro Nitrato de sodio	0.3-500 kg / día de H ₂ S	Bajos costos, alta selectividad operacional, flexibilidad baja de CO ₂	Disposición saturada del reactivo
	Solventes Lavado cáustico Soluciones de permanganato Agua	0.300 ppm concentración de H ₂ S	S elemental formado, bajos cotos, baja eficiencia de eliminación de CO ₂ y H ₂ S	Dificultades operacionales. Disposición de solución saturada
	Biológico	50-20000 kg/día de H ₂ S	S elemental formado, posible alta eliminación (>97%), costos bajos operacionales	Absorción incompleta de H ₂ S, se necesita un tratamiento adicional. Requiere un control estricto de las condiciones bacterianas

Fuente: (Ryckebosch, 2011).

2.3.12. Tecnologías de purificación de biogás

Una vez identificados los métodos con el que se iniciará el tratamiento de gases, debemos reconocer cuál de estas sería la más adecuada para la purificación del biogás relacionado con la problemática que se planteó frente al uso del biogás. Los métodos y tecnologías usados para purificar los gases ácidos del biogás se muestran en la Figura 10.



Fuente: (Salazar, 2012).

Figura 10. Esquema de tecnologías para la remoción de gases ácidos en el biogás.

Estas tecnologías mencionadas en la figura 10 las describiremos y desarrollaremos a continuación, realizando un estudio sobre su uso en el biogás.

A) Óxidos de hierro

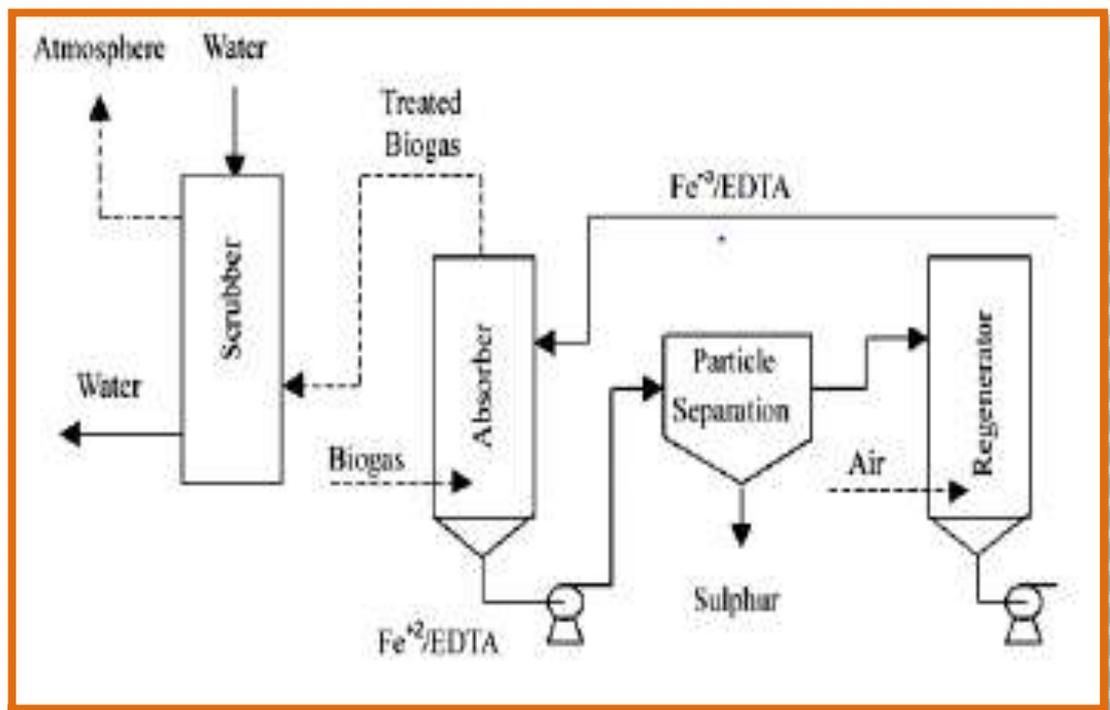
Se utiliza a pequeña escala en la purificación de gases, cuya función específica es la remoción del sulfuro de hidrógeno. Su aplicación es generalmente en gases cuya concentración es bajo a medio (300 ppm) de sulfuro de hidrógeno o mercaptanos (González, 2010). No remueve el dióxido de carbono y su aplicación es selectiva. El material que absorbe el sulfuro de hidrógeno debe encontrarse en forma de óxidos, hidróxidos u óxidos hidratados (Muche & Zimmermann, 1985).

El proceso opera a distintas presiones, logrando eliminar eficientemente el H₂S a temperatura ambiente o superiores, con un contenido de humedad de las limallas entre 30 y 60 %, debiendo realizarse la operación a pH entre 7,5 y 8,5. Es posible emplear óxido de hierro (III) hidratado para la purificación del biogás, adición de cloruro de hierro (III), utilización de pellets de hierro, utilización de residuos de la extracción de níquel, lavado con solución de hidróxido de sodio, así como también, otros sustratos "secos" tales como óxido de zinc, sólidos alcalinos, entre otros. También se ha utilizado hierro quelatado en fase líquida para la absorción del H₂S presente en el biogás (Ramírez, 2007).

B) Proceso REDOX

El proceso de óxido-reducción se basa en la transformación activa del sulfuro de hidrógeno a azufre en composición elemental, donde se utilizan soluciones acuosas con hierro y soluciones quelantes. En el transcurso de este proceso el sulfuro de hidrógeno es absorbido en agua, en donde reacciona posteriormente con las soluciones de hierro generando la formación de azufre en estado elemental.

En la Figura 11 se esquematiza el proceso de purificación de gases por medio del proceso óxido-reducción.



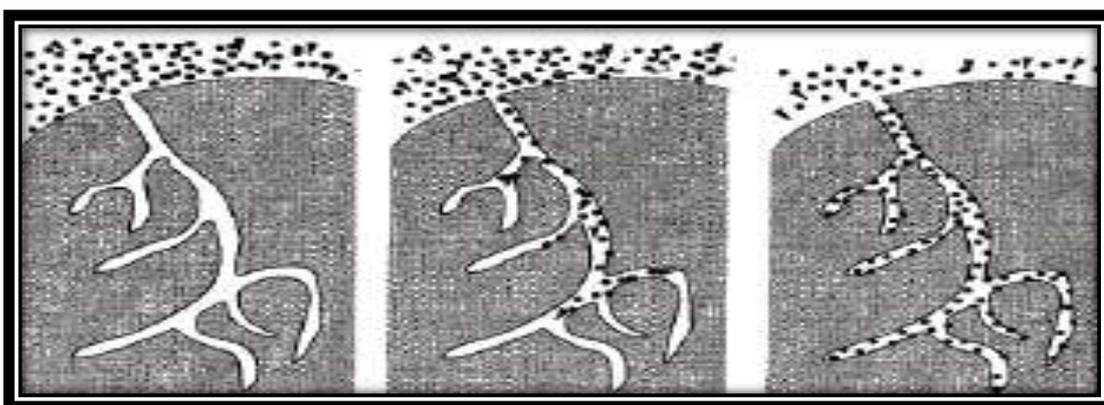
Fuente. (Horikawua, 2001).

Figura 11. Proceso Óxido-Reducción. En el proceso de purificación el biogás inicialmente circula a una columna de absorción en ingresa a contracorriente con una respectiva solución acuosa con el hierro. Posteriormente de la saturación, la solución se regenera en aire y retoma la recirculación.

C) Carbón activado

El proceso de adsorción que requiere menos energía es cuando se utiliza carbón activado, porque opera con temperatura y presiones menores, donde la reacción se realiza en los poros y el sulfuro de hidrógeno reacciona con el oxígeno produciendo azufre y agua. El azufre donde el sulfuro de hidrógeno queda ocluido en los poros del carbón.

Los lechos de carbón activado son generados químicamente en un ambiente de altas temperaturas de vapor para producir una extensa red de poros impregnados. Estos poros proporcionan los sitios para la adsorción física de H_2S (además de agua, CO_2 y compuestos halogenados). Estos son más usados para pulir gases después de otro tratamiento ya que los altos costos de reemplazo/regeneración y la disposición del carbón gastado hacen que tales esquemas sean muy caros para la valoración del biogás. En los lechos de carbón activado el biogás es adsorbido a alta presión, luego es despresurizado y tanto el metano como el dióxido de carbono son desorbidos a diferentes velocidades lo que permite hacer una separación (Llaneza, 2010).



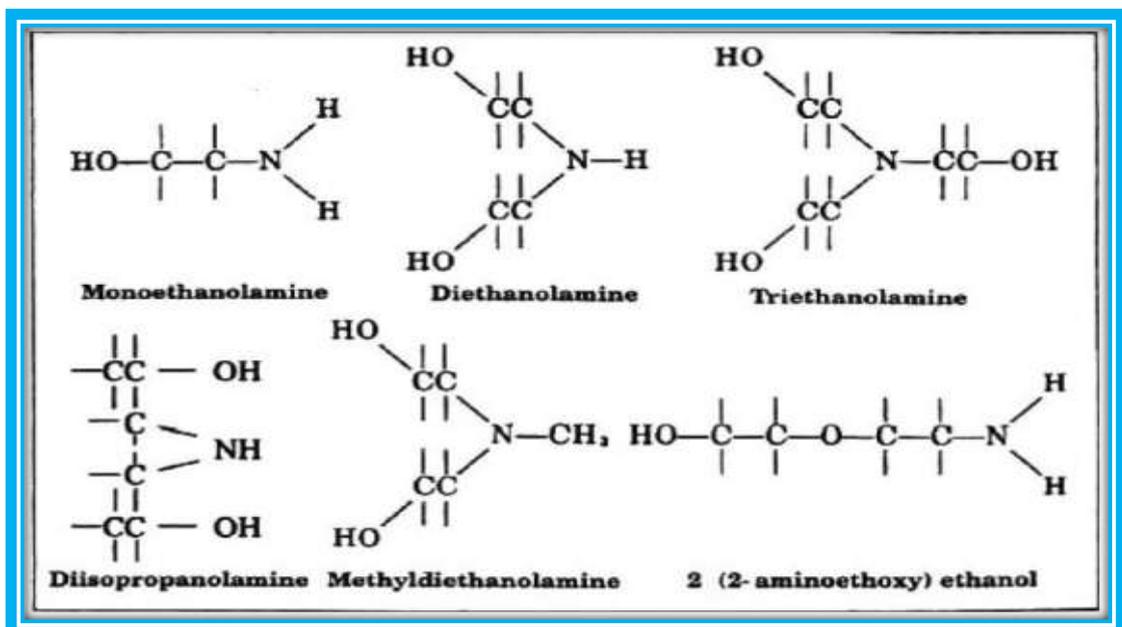
Fuente: (Garetto, 2000).

Figura 12. Proceso de absorción con la tecnología del carbón activado. El agente no deseado (contaminante) se dispersa en dirección a la superficie del carbón activado; el agente no deseado se desplaza a los poros del material absorbente y da lugar a la formación de una capa delgada o monocapa, el cual refleja y da lugar a la saturación del carbón activado.

Posterior a la saturación del carbón activado, el material absorbente debe ser reemplazado por uno nuevo o regenerar al mismo a una temperatura aproximada de 400°C. La adsorción utilizando la tecnología del carbón activado es desarrollada, conocida y utilizada a escala industrial en diferentes procesos para la captura de gases ácidos, incluyendo el dióxido de carbono (Arenillas, 2006). Entre las desventajas del carbón activado, la principal se podría decir, se encuentra en la adsorción de componentes no polares como es el caso del metano (Ramírez, 2007) sin embargo la gran versatilidad de los carbones activos y la fácil disponibilidad de obtenerlos a precios muy cómodos lo convierte en una tecnología muy interesante a ejecutar como opción a la absorción de dióxido de carbono en el rubro energético (Arenillas, 2006).

D) Tecnología Aminas

Esta tecnología utiliza las soluciones acuosas de alcanolaminas para purificar a los gases ácidos tales como el CO₂ y el H₂S.



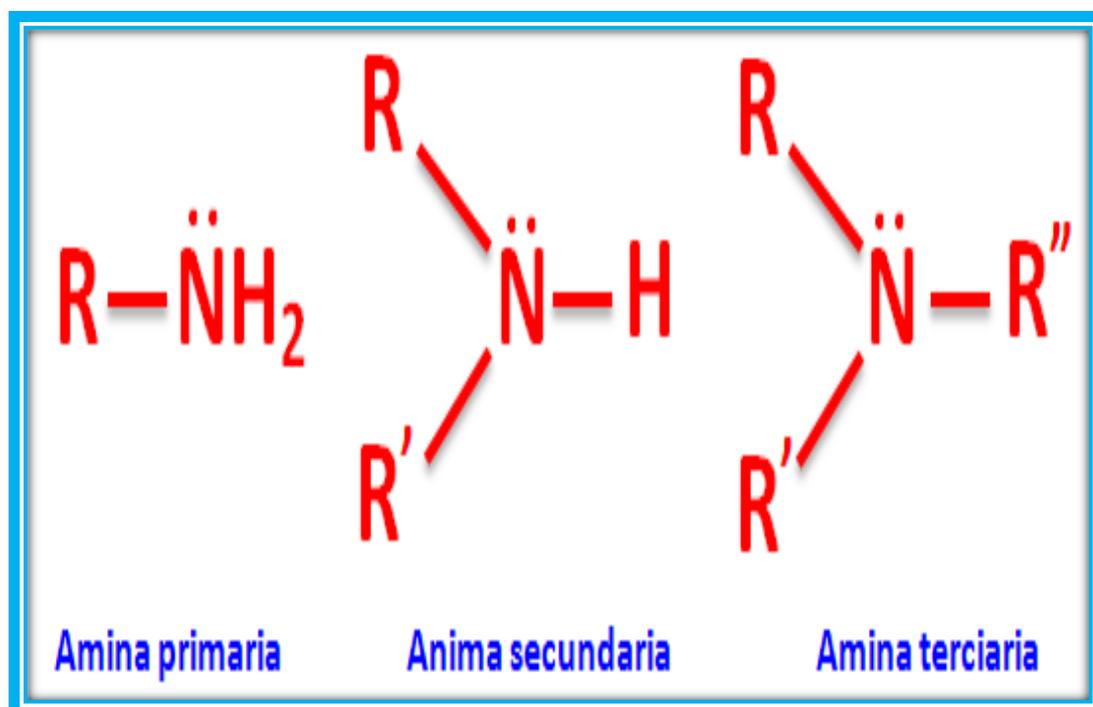
Fuente: (HERNÁNDEZ, 2007).

Figura 13. Estructura química de alcanolaminas empleadas en el proceso de captura de CO₂.

Las alcanolaminas presentadas en la figura 12, pueden ser clasificadas según el número de átomos de nitrógeno que se encuentran enlazados al nitrógeno, así se tiene que (HERNÁNDEZ, 2007):

- Las aminas que tienen dos átomos de hidrógeno unidos directamente a un átomo de nitrógeno, como es el caso de la monoetanolamina, se denominan aminas primarias y son generalmente las más alcalinas.
- Dietanolamina y diisopropanolamina presentan solo un átomo de hidrógeno directamente enlazado al nitrógeno y son denominadas aminas secundarias.
- Trietanolamina y metildietanolamina tienen completamente sustituido el átomo de nitrógeno, sin ningún átomo de hidrógeno unido a él. Son denominadas aminas terciarias.

En la figura 14 se resume la clasificación antes descrita.



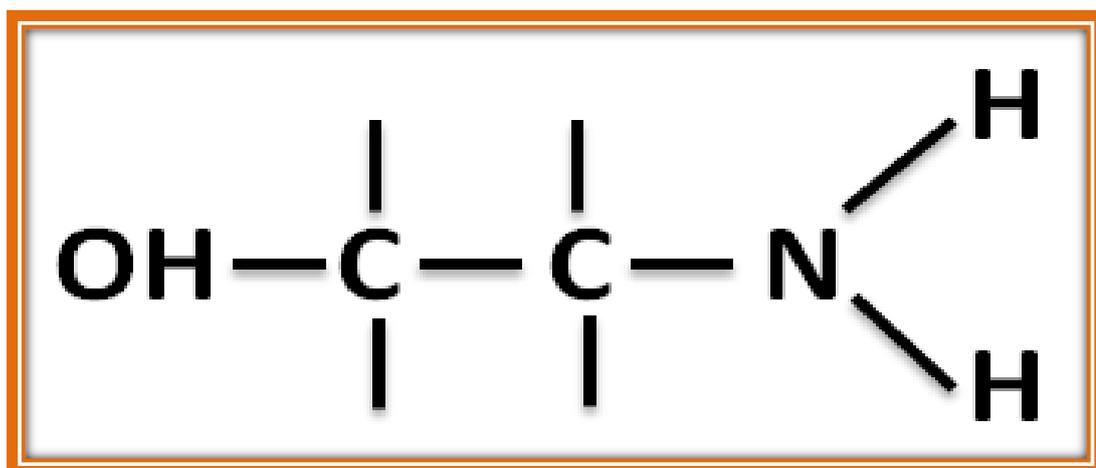
Fuente: (PÉREZ, 2005).

Figura 14. Clasificación de las alcanolaminas según el número de cadenas enlazadas al nitrógeno.

Como característica final (MADDOX, 1985), las alcanolaminas son consideradas solventes químicamente estables, debido a que pueden ser calentadas hasta su punto de ebullición sin descomponerse (la trietanolamina es una excepción a este hecho, debido a que se descompone a una temperatura de 360°C, menor que su punto de ebullición).

Las soluciones acuosas de monoetanolamina presentan una mayor madurez en comparación con otras alcanolaminas; han sido empleadas como absorbentes dentro del proceso, utilizándose comúnmente en concentraciones que oscilan entre 10% y el 20% en peso de la solución. Su probada fiabilidad, respalda su uso para la captura de este gas, logrando una recuperación de dióxido de carbono de aproximadamente 98% (YANG H., 2008; PÉREZ, 2005; MADDOX, 1985).

La monoetanolamina se produce a partir de la reacción de amoníaco con óxido de etileno, ambos productos químicos económicos. Como resultado, la monoetanolamina es relativamente más económica que otras etanolaminas (DUGAS, 2006).



Fuente: (HERNÁNDEZ, 2007).

Figura 15. Estructura química de la monoetanolamina.

La monoetanolamina presenta un carácter alcalino mayor, en comparación a las otras aminas antes mencionadas, razón por la que reacciona rápidamente con gases ácidos. Sin embargo, este hecho puede generar un problema dentro del proceso, debido a que la amina no es selectiva entre el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono, pudiendo capturar cualquiera de estos dos gases ácidos (SAN MARTÍN, 2013)

La monoetanolamina es la molécula más pequeña dentro de las alcanolaminas (con el peso molecular más bajo) y, además, posee la mayor capacidad de absorción de gases ácidos, lo que se traduce en menor cantidad de solvente circulando por el sistema para remover una determinada cantidad de gas ácido. Por otro lado, la regeneración de la monoetanolamina puede realizarse fácilmente por ser un solvente químicamente estable, minimizando la degradación de la solución (MADDOX, 1985; PÉREZ, 2005).

La monoetanolamina posee una presión de vapor mayor en relación a otras alcanolaminas. Esto puede provocar significantes pérdidas de solución a través de vaporización. Este problema puede ser resuelto mediante un lavado con agua en la parte superior del absorbedor en la corriente de gases libres de dióxido de carbono (DUGAS, 2006).

El hecho de que la monoetanolamina posea la mejor capacidad de absorción, también provoca que se necesite una mayor cantidad de energía térmica para regenerar la solución de amina, debido a su mayor afinidad por los gases ácidos. Por otro lado, la amina puede dar lugar a reacciones químicas no deseadas, formándose productos que degradan la solución e incrementan la corrosión en estos sistemas (HERNÁNDEZ, 2007).

La monoetanolamina puede degradarse por reacciones con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y oxígeno presentes en los gases de combustión, lo que induce a una elevada tasa de renovación del absorbente (YANG H., 2008).

De la literatura se encontraron datos que indican que la velocidad de consumo de este solvente es tan baja como 0,5 [kg/MT de CO₂] y que, para efectos de costos, una pérdida de 1,5 [kg/MT de CO₂] es el máximo recomendado. La totalidad del solvente debe ser remplazado cuando existe una alta acumulación de impurezas, las que no pueden ser removidas mediante un filtro de carbono o mecánico. La velocidad de acumulación de contaminantes es una función de la composición de los gases de combustión y de las condiciones de operación. La presencia de óxidos de azufre en los gases de combustión puede incrementar el consumo del solvente, por cuanto estos reaccionan de forma irreversible con la monoetanolamina (THOMSEN H., 2005). En la tabla 10 se presentan algunas propiedades de la monoetanolamina.

Tabla 9. Características de la monoetanolamina.

PROPIEDADES DE LA MONETANOLAMINA	
Fórmula Molecular	C ₂ H ₇ NO
Peso molecular	61.08 g/mol
Apariencia	Líquido viscoso incoloro
Densidad a 20°C	1.016 g/cm ³
Punto de ebullición a 1 atm	170 °C
Solubilidad en agua	Miscible

Fuente: (SAN MARTÍN, 2013).

- **Reacciones químicas entre soluciones de etanolaminas y dióxido de carbono.**

En una solución acuosa, el dióxido de carbono se disocia para formar una solución ligeramente ácida. Cuando un corriente de gas que contiene dióxido de carbono se pone en contacto con una solución acuosa de amina, los gases ácidos reaccionan para formar un complejo ácido-base (una sal). La reacción entre el dióxido de carbono y la amina es exotérmica, por lo que se libera calor durante la reacción (SAN MARTÍN, 2013).

La absorción de dióxido de carbono a partir de alcanolaminas puede ocurrir por medio de diferentes mecanismos.

Mecanismo 1

El dióxido de carbono se hidroliza para formar ácido carbónico, el que lentamente se transforma en bicarbonato. A partir de la formación de bicarbonato, se lleva a cabo una reacción donde participa la amina de acuerdo a:



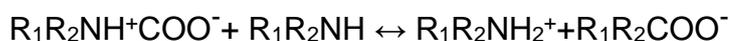
De forma general:



Esta reacción ácido-base puede ocurrir con cualquier alcanolamina, pero es cinéticamente lenta debido a que la etapa de disociación del ácido carbónico a bicarbonato es relativamente lenta.

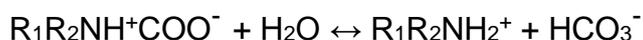
Mecanismo 2

Un segundo mecanismo de reacción requiere la presencia de al menos un hidrógeno liberado en la estructura molecular de la amina.



Este mecanismo de reacción se conoce como “Mecanismo del complejo híbrido” y solo puede ocurrir con aminas primarias y secundarias. El dióxido de carbono reacciona con la molécula de amina para formar el compuesto híbrido, que, posteriormente reacciona con una segunda molécula de amina para formar un carbonato ($\text{R}_1\text{R}_2\text{COO}^-$). La velocidad de absorción del dióxido de carbono a través del mecanismo es más rápida que a través de la hidrólisis de este gas.

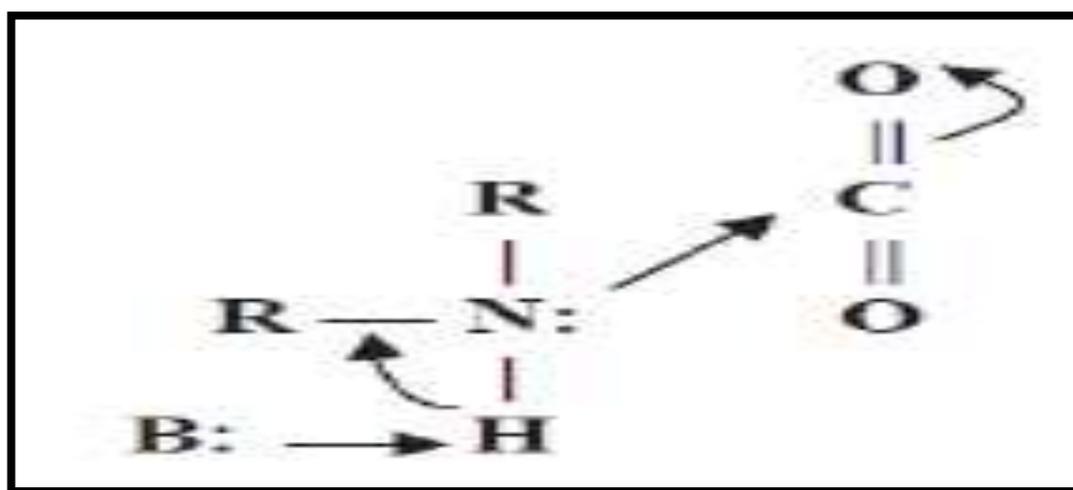
Esta estequiometría de la reacción del carbonato, indica que la capacidad de la solución de amina de reaccionar con el dióxido de carbono está limitada a 0.5 moles de dióxido de carbono por mol de amina si el producto de la reacción fuera solamente el carbonato. Sin embargo, el compuesto híbrido se puede hidrolizar para formar bicarbonato y amina protonada, según la siguiente reacción:



El hecho de que la absorción de dióxido de carbono se pueda llevar a cabo por estos dos mecanismos de reacción, con diferentes características cinéticas, determina el poder de la absorción de las diferentes aminas. Como el paso determinante en el segundo mecanismo es la formación del carbonato, será este el que diferenciará la rapidez de absorción entre las aminas primarias y secundarias. Debido a que las aminas terciarias no pueden formar el carbonato, se encuentran obligadas a reaccionar con el dióxido de carbono de acuerdo al primer mecanismo (más lento).

Mecanismo 3

Este tercer mecanismo de reacción tiene por nombre “Mecanismo termolecular” (ABOUDHEIR A., 2003), en el que se propone que la reacción entre el dióxido de carbono y la monoetanolamina ocurre en solo un paso, donde el producto inicial no es un ión híbrido, sino un complejo débilmente unido, con un mecanismo como se muestra en la figura 15.



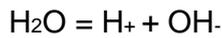
Fuente: (ABOUDHEIR A., 2003).

Figura 16. Mecanismo de reacción termolecular para la formación de carbonato según Crooks y Donnellan;

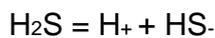
Mecanismo general (Subhasish, 2015):

En una solución acuosa, H₂S y CO₂ se disocian para formar una solución ácida débil.

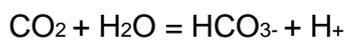
Ionización del agua:



Ionización de H₂S disuelta:

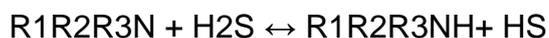


Hidrólisis e ionización de CO₂ disuelto:



Cuando una corriente de gas que contiene H₂S y/o CO₂ se pone en contacto con una solución acuosa de amina.

Los gases ácidos reaccionan con la amina para formar un complejo ácido-base soluble, una sal, en el tratamiento solución. La reacción entre H₂S y CO₂ es exotérmica y una cantidad considerable de calor se libera. Independientemente de la estructura de la amina, el H₂S reacciona instantáneamente con la amina primaria, secundaria o terciaria a través de una reacción directa de transferencia de protones como se muestra en la ecuación 8 a continuación para formar el hidrosulfuro de amina:

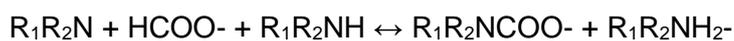
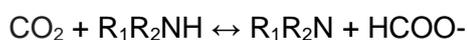


La reacción entre la amina y el CO₂ es un poco más compleja porque la absorción de CO₂ se produce a través de dos mecanismos de reacción diferentes. Cuando se disuelve en agua, el CO₂ se hidroliza y forma ácido carbónico, que a su vez, se disocia lentamente a bicarbonato. El bicarbonato

entonces emprende una reacción ácido-base con la amina para dar la reacción global mostrada por la ecuación 9 a continuación:



Esta reacción ácido-base puede ocurrir con cualquiera de las alcanolaminas independientemente de la amina, pero es lento cinéticamente porque el paso de disociación de ácido carbónico a bicarbonato es relativamente lento. Un segundo mecanismo de reacción de CO_2 como se muestra por la ecuación 10 requiere la presencia de hidrógeno hábil en la estructura molecular de la amina, puede también ocurrir:



Este segundo mecanismo de reacción para CO_2 , que da como resultado la formación de la sal de amina de un ácido carbámico sustituido, se denomina reacción de formación de carbamato y sólo puede ocurrir con aminas primarias y secundarias.

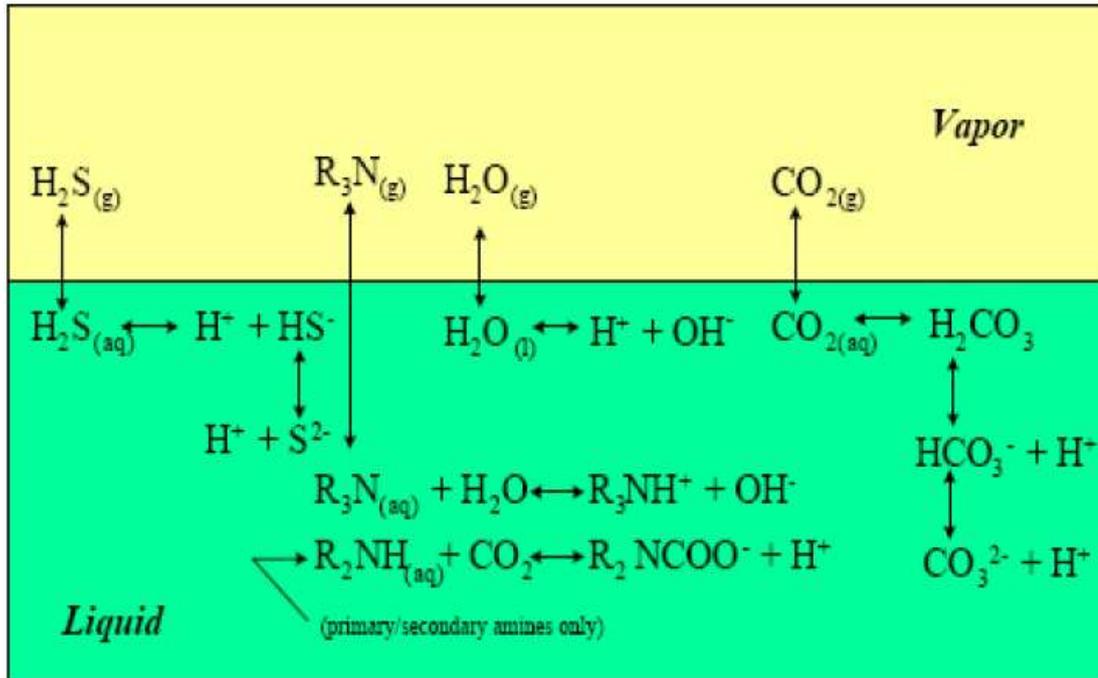
El CO_2 reacciona con una molécula de amina primaria o secundaria para formar el intermedio carbamato que a su vez reacciona con una segunda molécula amina para formar la sal de amina. La velocidad de absorción de CO_2 a través de la reacción carbamato es rápido, mucho más rápido que la

reacción de hidrólisis de CO_2 , pero algo más lento que la reacción de absorción del H_2S . La estequiometría de la reacción con carbamato indica que la capacidad de reacción de la solución de amina para el CO_2 se limita a 0,5 moles de CO_2 por mol de amina si el único producto de reacción es el carbamato de amina.

Pero, el carbamato puede sufrir una hidrólisis parcial formando bicarbonato, regenerando amina libre. Por lo tanto, las cargas de CO_2 experimentados en algunas plantas que emplean DEA, son posibles a través de la hidrólisis del carbamato intermedio a bicarbonato. El hecho de que la absorción de CO_2 puede reaccionar por diferentes mecanismos de reacción con características cinéticas significativamente diferentes tiene un gran impacto sobre las velocidades de absorción relativas de H_2S y CO_2 entre las diferentes alcanolaminas.

Para aminas primarias y secundarias, existe muy poca diferencia entre la reacción del H_2S y CO_2 . Esta equivalencia de velocidad se debe a la disponibilidad formación rápida del carbamato para la absorción de CO_2 . Sin embargo, debido a que las aminas terciarias están completamente sustituidas, no pueden formar el carbamato.

Las aminas terciarias deben reaccionar con CO_2 . La reacción está limitada en fase gaseosa mientras que la reacción de CO_2 está limitada en fase líquida. Con sólo la reacción lenta de ácido-base disponible para la absorción de CO_2 , MDEA y varios de los productos MDEA producen una selectividad significativa hacia el H_2S con respecto al CO_2 .



Fuente: (Subhasish, 2015).

Figura 17. Representación del gas ácido en dos medios (vapor y líquido).

- **Presencia de sales estables al calor**

Las sales estables al calor, o sales termoestables, son moléculas que se forman de la unión entre una amina protonada y un anión más fuerte que el dióxido de carbono o el ácido sulfhídrico. Estas uniones son irreversibles, por lo que su formación conlleva pérdidas de solvente. Existen diversos tipos de aniones que pueden ser encontrados en estos sistemas, entre los cuales se pueden mencionar: orgánicos, como acetato, formiato, glicolato, lactato, oxalato y propionato; e inorgánicos, como cloruro, oxácidos inorgánicos de azufre, sulfito, sulfato, tiosulfato y tiocianato (PÉREZ, 2005).

Las sales termoestables favorecen la corrosión en soluciones de alcanolaminas. Por esta razón y debido a que también reducen la capacidad de carga de gas ácido de la amina, deben ser reducidas al mínimo

recomendándose que las sales no excedan el 10% de la concentración total de la amina. Las sales termoestables intervienen en la capacidad de absorción de las alcanolaminas.

2.3.13. DEGRADACIÓN DE LA MONOETANOLAMINA

Soluciones acuosas de monoetanolamina son ampliamente usadas en la industria para remover el dióxido de carbono desde los gases de combustión, dada su alta selectividad por este gas y la alta capacidad de reacción en comparación a otras alcanolaminas. Sin embargo, la degradación de la monoetanolamina en presencia de oxígeno y dióxido de carbono puede resultar en grandes pérdidas de amina y corrosión en los equipos de las plantas productoras (SAN MARTÍN, 2013).

Existen 3 vías de degradación de la monoetanolamina: la degradación por polimerización, degradación térmica y degradación oxidativa (DUGAS, 2006).

• Degradación por Polimerización

Este tipo de degradación requiere la presencia de altas temperaturas y la presencia de dióxido de carbono, produciendo productos de degradación de un elevado peso molecular. Esta degradación ocurre principalmente a temperaturas mayores que las empleadas en la torre de desorción.

• Degradación Térmica

Este tipo de degradación se ve favorecida a temperaturas por sobre los 205 [°C]. Debido a que en operación la solución de amina no alcanza temperaturas tan elevadas, esta constituye la forma de degradación menos común entre las tres.

• Degradación Oxidativa

Este tipo de degradación requiere de oxígeno y es catalizada por hierro, produciendo fragmentos oxidados del solvente, tales como ácidos orgánicos y amoniaco. Se espera que ocurra en presencia de oxígeno disuelto en el líquido estancado en la parte inferior de la torre de absorción.

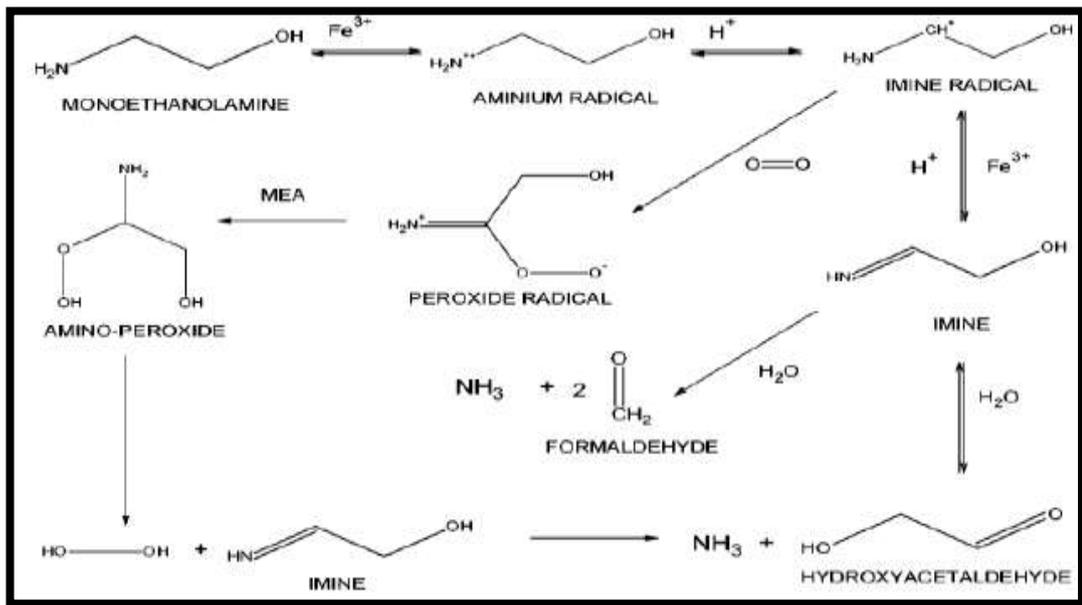
El mecanismo de fragmentación oxidativo de la amina aún no es del todo claro. En la literatura se propone un mecanismo que involucra la abstracción de uno de los electrones del par solitario del átomo de nitrógeno presente en la estructura de la monoetanolamina.

En este mecanismo, mostrado en la Figura 17, un radical libre como el Fe^{+3} , remueve un electrón desde el nitrógeno del grupo amino formando un radical, el que entonces deprotona para formar un radical imina¹.

Los estudios muestran que en este punto, el radical amina reacciona con un segundo radical libre para forma una amina, la que reacciona con agua para formar un aldehído y amoniaco.

El radical amina puede seguir otra ruta de reacción, en la que reacciona con oxígeno para así formar un radical amino-peróxido. Este radical puede entonces, reaccionar con otra molécula de monoetanolamina produciendo peróxido de hidrógeno y una amina, los que a su vez reaccionan con agua para formar un aldehído y amoniaco.

El ion férrico puede ser regenerado por la reacción del ion ferroso con oxígeno u otro radical libre (MADDOX, 1985).



Fuente: (MADDOX, 1985).

Figura 18. Mecanismo de abstracción de electrón en la degradación oxidativa de la monoetanolamina.

E) Tecnología de separación criogénica

La tecnología con método criogénico de separación considera la separación de un gas mezclado por condensaciones fraccionadas y en donde las destilaciones deben ser a bajas temperaturas (Morero, 2009). A una presión de 80 bar el biogás debe ser comprimido aproximadamente en diferentes etapas. Posterior a eso ingresa por una operación de secado con el fin de evitar que se congele en la siguiente etapa que es la de enfriamiento.

En este último proceso de la tecnología, el biogás ingresa por intercambiadores de calor en donde se propicia su enfriamiento y como consecuencia al punto de ebullición del dióxido de carbono de -78°C (Llaneza H. M., 2010) el proceso se condensa, el cual es extraído a un

separador en estado líquido, y finalmente se obtiene volúmenes con concentraciones del 97% de metano puro en el biogás.

F) Proceso biológico

La tecnología de purificación de biogás con métodos biológicos consiste en el uso de bacterias de tipo aeróbicas especializadas en el proceso oxidativo del sulfuro de hidrógeno (bacterias sulfoxidantes). Dichas bacterias sulfoxidantes son añadidas a una torre de absorción por donde fluye el biogás, en donde también se aporta aire, como nutrientes que servirán de alimento a las bacterias y circulación de agua con el fin de mantener las condiciones de pH óptimas y de temperatura (MPS, 2000). El sulfuro de hidrógeno entra en oxidación dando lugar al azufre elemental y ácido sulfúrico, los cuales son diluidos más adelante siempre y cuando se cuente con una planta de depuración de aguas. La tecnología de percolación es un claro ejemplo de este proceso, el cual utiliza filtros biotecnológicos que remueven eficientemente el sulfuro de hidrógeno, teniendo en cuenta la composición del biogás el cual será tratado, rindiendo altas concentraciones de pureza en el biogás, en niveles aproximadamente de hasta 50 ppm (Llaneza H. M., 2010).

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método de la investigación

El presente trabajo de investigación tiene alcance descriptivo experimental de tipo aplicativo, donde se cuantificó la capacidad de absorción de la monoetanolamina inicial variando el grado de dilución en solución acuosa las cuales fueron 23.5%, 24%, 24.5%, 25%, 25.5% y 26%. La cuantificación de los gases ácidos fueron realizados al inicio y al final de las corridas experimentales.

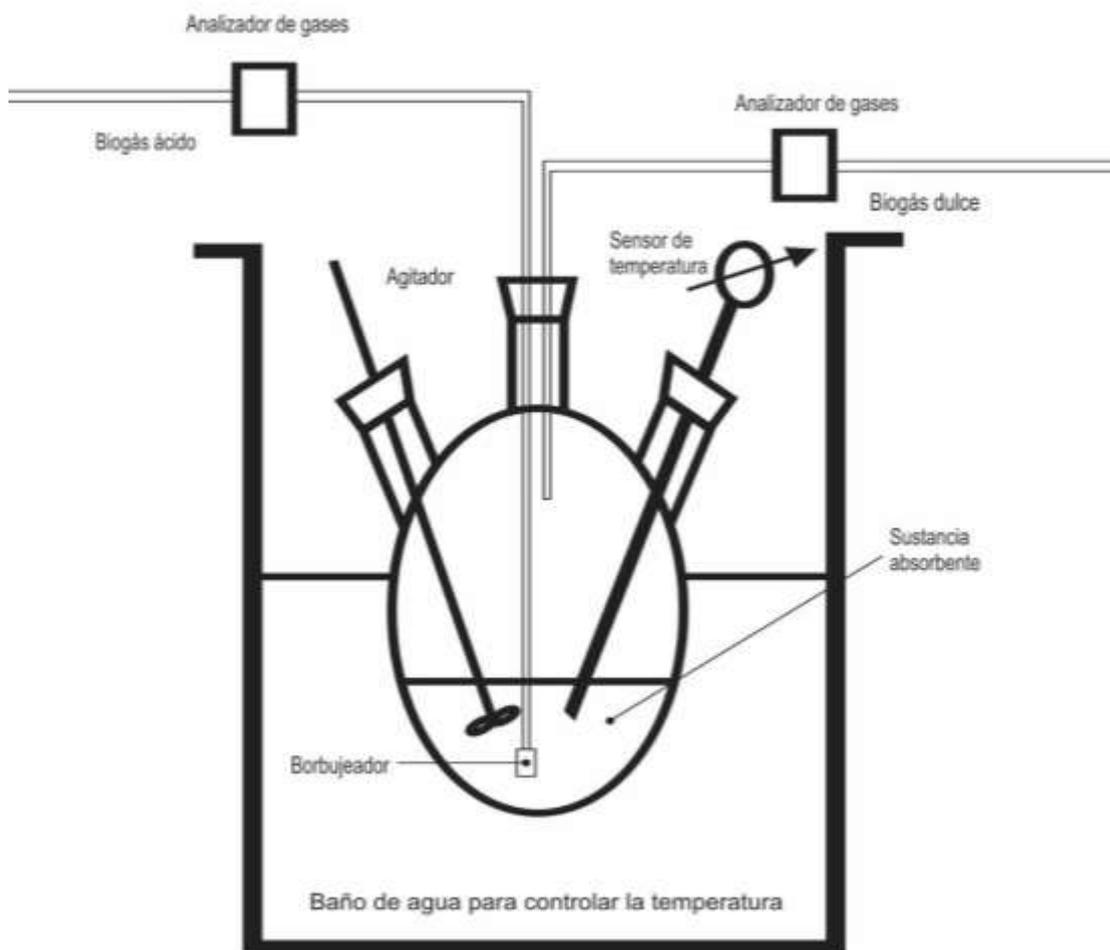
Para efectuar el proceso de purificación del biogás y poder analizar la absorción química y determinar la eficiencia de remoción de CO₂ y H₂S con respecto a la disolución de monoetanolamina, se hizo uso del “método del burbujeo” presentado por el Dr. José Ignacio Huertas en realización del proyecto MOPESA, cuya propuesta se esquematiza en la figura 19.

En la misma figura se puede observar de derecha a izquierda una línea entrada del flujo de biogás ácido el cual pasa por un analizador de gases, en nuestro proyecto se utilizó el sensor de CO₂ y CH₄ y sulfuro de hidrógeno donde se determinó las concentraciones iniciales de composición del biogás, un recipiente con 3 líneas de entrada y una de salida donde también se determinó las concentraciones de composición del biogás con los sensores.

El método consistió en hacer burbujear el gas a través de un recipiente cerrado de plástico el cual contiene 0.5 litros de la solución acuosa de monoetanolamina. Con el fin de que exista una interacción completa entre el flujo del biogás y la solución de monoetanolamina, la entrada de biogás inicial es sumergido en la solución de la MEA y con el fin de proporcionar mayor contacto

entre la solución acuosa de monoetanolamina y el biogás, se añadió al prototipo de experimentación un burbujeador. Se realiza la absorción química y el biogás fluye purificado a través de la parte superior del prototipo. La solución de monoetanolamina se encuentra bajo un baño de rocío con el fin equilibrar la temperatura en la solución porque las reacciones son exotérmicas y la temperatura debe mantenerse constante.

Este método proporciona un equilibrio termodinámico en las fases líquido-gas, siendo el montaje diseñado para trabajar a presión atmosférica.



Fuente: (Huertas et al, 2010).

Figura 19. Prototipo de purificación del biogás con temperatura regulada.

3.2. Ubicación, Población Y Muestra

3.2.1. Ubicación

El presente estudio se realizó en la planta extractora de aceite de palma Industriales Oleaginosas Monte Alegre S.A. (INDOLMASA), ubicada en el distrito de Neshuya en el km. 61 de la Carretera Federico Basadre con coordenadas UTM: 502813 ESTE y 9043943.5 NORTE.

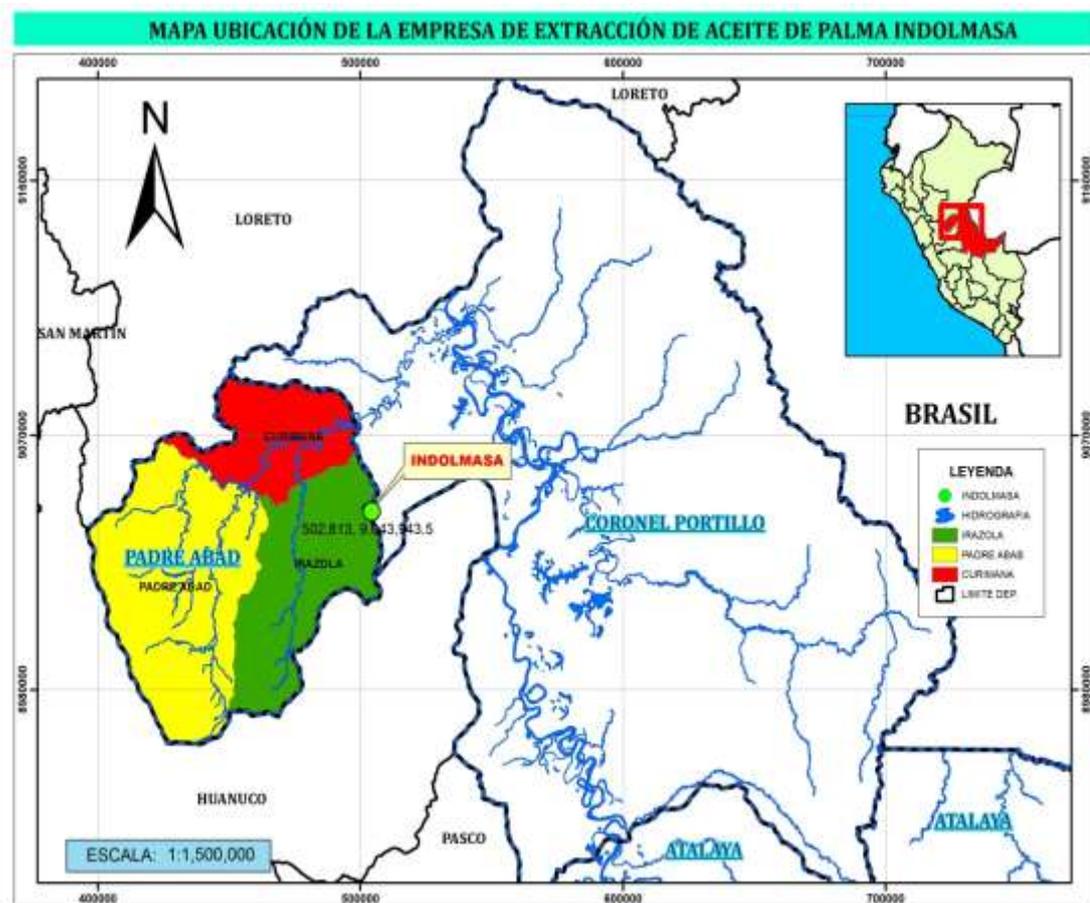


Figura 20. Ubicación de la empresa INDOLMASA.

3.2.2. Población

La población es el biogás que produce la empresa Negocios Amazónicos Sustentables, NEGASUS EIRL, el cual representa 30 m³.

3.2.3. Muestra

La muestra es la carga diaria del biogás al prototipo de endulzamiento, el cual representa 1 m³ de biogás, proveniente de los biodigestores instalados en la planta.

3.3. Procedimiento de recolección de datos.

3.3.1. Selección del lugar de instalación

La selección del lugar dependió de la distancia en la que se encontró la cámara de acumulación del biogás, por lo que se seleccionó el lugar más cercano a este para colocar el equipo experimental de endulzamiento. El lugar más indicado teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente fue la casa de fuerza que se encuentra al costado del área de los biodigestores, aprovechando por otra parte sus condiciones estructurales para hacer frente a los factores meteorológicos como lluvias, radiación y vientos fuertes.

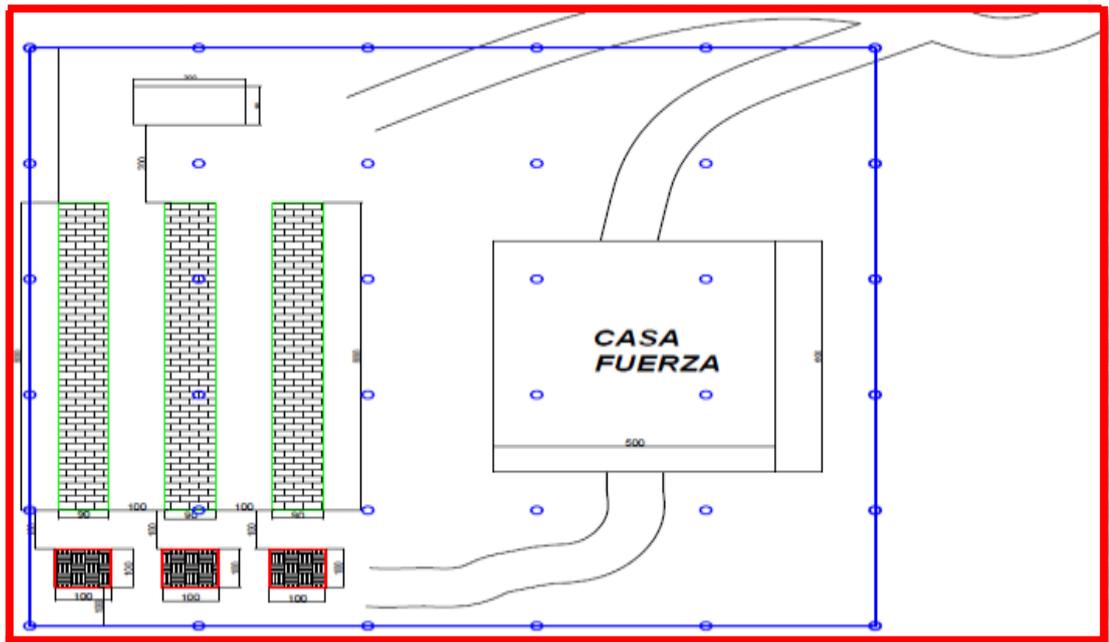


Figura 21. Plano Distribución General Biogás.

3.3.2. Diseño y construcción del equipo experimental

Tal y como se muestra en la figura 23 se puede observar de izquierda a derecha una línea entrada del flujo de biogás ácido el cual pasa por los sensores de CO₂, CH₄ y H₂S -donde se determinó las concentraciones iniciales de composición del biogás- un recipiente con 3 líneas de entrada y una de salida donde también se determinó las concentraciones de composición del biogás con los sensores. Se colocó un burbujeador en la parte inferior del tubo de vidrio por donde ingresa el flujo de biogás a través de un recipiente cerrado de vidrio el cual contiene 0.5 litros de la solución acuosa de monoetanolamina.

El tubo de vidrio por donde pasa el flujo de biogás de la línea de entrada es sumergido en la solución acuosa de monoetanolamina, por otro lado el tubo de vidrio por donde salió el biogás purificado se encuentra por encima de la solución acuosa y casi al terminal de este se encuentran los sensores, luego el biogás es almacenado en un contenedor.

Todo esto se efectúa en la boca central del bulbo, en las dos restantes se colocan el agitador y el sensor de temperatura. Las reacciones que se producen entre el biogás y la monoetanolamina son exotérmica, por tal motivo se colocó el recipiente de vidrio en un contenedor de plástico con agua el cual tuvo un nivel por encima de la solución de monoetanolamina y por debajo de la superficie superior del bulbo. El rotámetro se colocó entre la salida de biogás crudo y los sensores, los cuales se encuentran en la línea de entrada del equipo experimental.

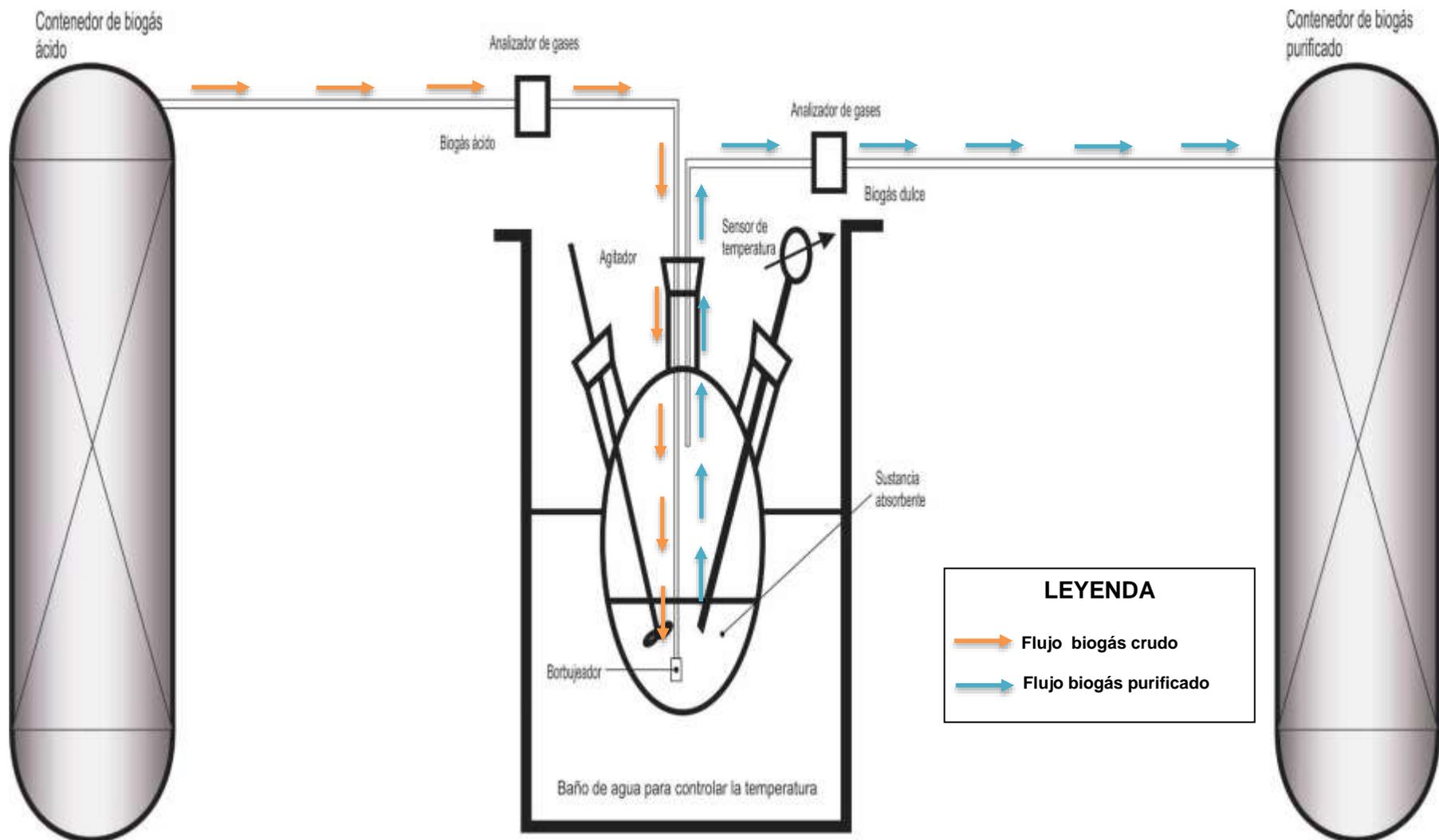


Figura 22. Equipo experimental. Al lado izquierdo donde se encuentra el contenedor de biogás ácido fue el punto de partida de toma de muestras, luego este pasó por las aminas para las respectivas reacciones y para que posteriormente sea almacenado el biogás dulce en el contenedor de la derecha.

3.3.3. Instalación del equipo experimental

El equipo experimental se colocó en la parte inferior izquierda de la casa de fuerza debajo de las cámaras de almacenamiento de biogás tal como se muestra en la figura 24.

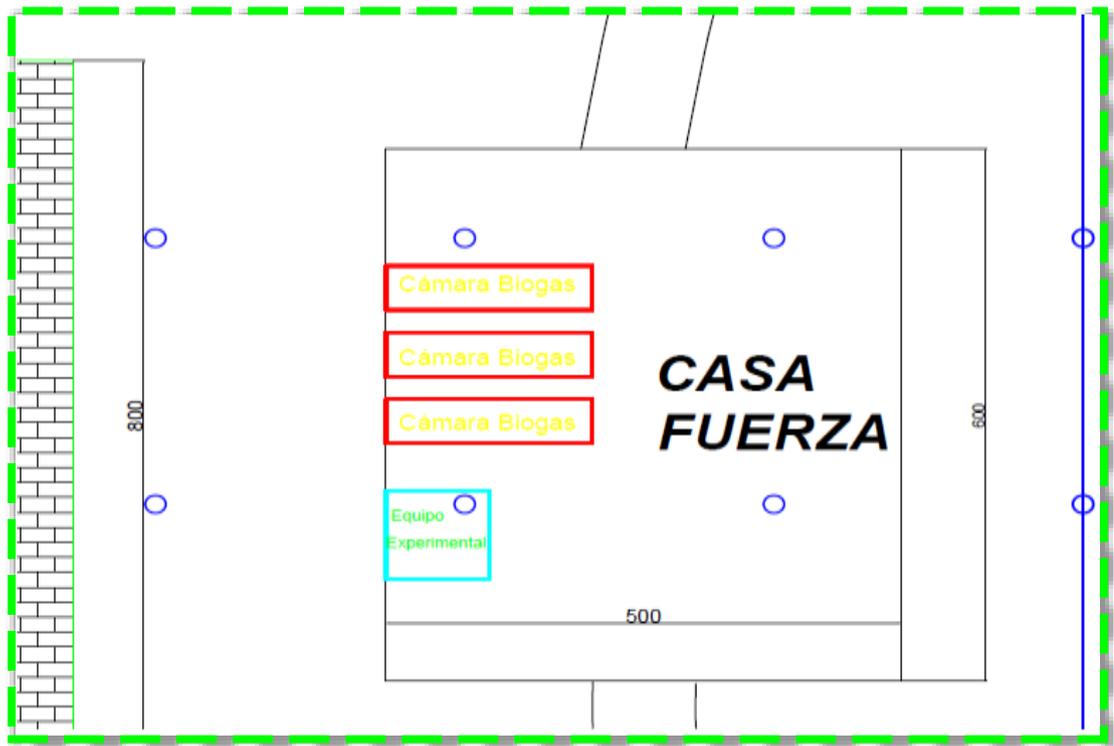


Figura 23. Ubicación del equipo experimental en la casa de fuerza.

3.3.4. Monitoreo de la concentración de CH₄, CO₂ y H₂S

3.3.4.1. Diseño y armado del analizador de gases portátil.

Los materiales que se utilizaron fueron 2 tapones de simple presión para tubo de 4 pulgadas, 1 adaptador mixto, 1 llave de corte, 1 tubo de 4 pulgadas con una longitud de 30 cm. Del mismo modo se conectaron a los cables de entrada periférica a la caja de seguridad del sistema arduino.



Figura 24. Estructura de analizador de gases portátil.



Figura 25. Determinación de concentración de gases en biogás.

Posteriormente se unieron los filamentos en sus respectivos posiciones en la placa del sensor, una vez terminado este procedimiento se insertó el sensor en el tubo previamente para ello se hizo el agujero en la tapa por donde esto se insertó y luego de esto se añadió pegamento al agujero con el fin de evitar la salida del biogás. Se colocaron en los bordes tanto superior como inferior del tubo cinta aislante con el fin de evitar la salida de biogás.



Figura 27. Equipo analizador de gases portátil terminado.



Figura 26. Prueba de fuga en el analizador de gases portátil.

3.3.4.2. Operación del analizador de gases portátil.

El analizador de gases portátil fue colocado al inicio y al final en las corridas experimentales con el fin de conocer las cantidades removidas de gases ácidos por la acción de la monoetanolamina.

El analizador de gases portátil fue calibrado semanalmente; en donde la calibración se realizó para todos los sensores, los cuales fueron: sensor de metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, temperatura, presión y pH.

Por otro lado existía un equipo de control y constatación de lectura (sistema arduino principal) que también era calibrado semanalmente, en donde se comparó las lecturas del analizador de gases portátil con el fin de observar similitudes y desviaciones, si estas últimas ocurriesen, se efectuaba de forma inmediata una corrección mediante una calibración.

3.3.4.3. Evaluación del comportamiento de la monoetanolamina

Las evaluaciones se realizaron en el campo en los meses que duró las corridas experimentales, en el área donde se colocaron los gasómetros en INDOLMASA con el fin de mantener un flujo constante. Para las mediciones se utilizaron los sensores de CO₂, H₂S y CH₄ los cuales cuantificaron las concentraciones de los mismos. Se utilizó el absorbente químico monoetanolamina (MEA) en solución acuosa con diferentes grados de dilución: 23.5%, 24%, 24.5%, 25%, 25.5%, 26%. Se describió el comportamiento de la monoetanolamina en el proceso de absorción de CO₂ y H₂S en flujos de biogás, en donde se hizo una relación entre el porcentaje de concentración de dióxido de carbono en el biogás, en unidades de % y el

tiempo en donde el gas ácido va siendo absorbido, y en donde este llega hasta su punto de saturación. Lo mismo se efectuó para el H₂S.

Las condiciones climatológicas también fueron tomadas en cuenta con el fin de no influenciar en las mediciones de los parámetros ya establecidos y controlados para la investigación. Las condiciones de temperatura en el proceso de purificación con la monoetanolamina exige trabajar con una temperatura ambiente, y controlar también la temperatura cuando se presentan las reacciones exotérmicas.

3.3.5. Determinación de la concentración de metano

La concentración de metano se determinó mediante el sensor de metano, el cual fue colocado en la línea de salida del equipo experimental una vez efectuado el proceso de endulzamiento con la monoetanolamina. Este gas purificado fue almacenado en el gasómetro. Por otro lado el metano que se determinó es el resultado de la remoción de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno presente en el biogás inicial.

La nueva concentración de metano se cuantificó teniendo en cuenta la nueva concentración de este en el biogás, el cual ya purificado, contiene menos concentración de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. La nueva concentración de metano es el resultado del volumen contenido en el biogás con respecto al volumen total de este.

Dicha cuantificación proporcionó información de la nueva concentración de metano en el biogás con unidades porcentuales, lo cual

demuestra su contenido porcentual en el biogás purificado, más no un aumento en la producción de biogás.

3.4. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Materiales

- Piceta
- Papel toalla
- Tijeras
- Cuter
- Cuaderno de 100 Hojas
- Cinta aislante
- Codos
- Tapones
- Burbujeador
- Manguera de plástico transparente
- Envase cilíndrico
- Cinta de teflón
- Jarra de plástico graduado
- Pintura epóxica
- Pipeta
- Gasómetro
- Matraz Erlenmeyer
- Formato de recolección de datos

3.4.2. Herramientas y equipos

- Machete
- Pala
- Desarmador
- Termómetro digital
- Balanza Digital Gramera
- Cronómetro digital

- Manómetro
- Termocupla tipo k
- Laptop
- Sensor metano, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, presión, temperatura y pH.
- Cámara digital
- Impresora

3.4.3. Insumos

- Monoetanolamina
- Biogás
- Agua destilada

3.5. PROCESAMIENTO PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

La investigación utilizó el Diseño Completamente al Azar DCA, Experimental de tipo Experimentos Puros con grupo de Control, donde se conjugaron las variables de las concentraciones de monoetanolamina y el biogás proveniente de 1 biodigestor, el cual es el más eficiente, distribuidos en 6 tratamientos, 3 repeticiones, haciendo un total de 18 unidades experimentales.



Figura 28. Esquema del montaje experimental.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6
R1	R1X1	R1X2	R1X3	R1X4	R1X5	R1X6
R2	R2X1	R2X2	R2X3	R2X4	R2X5	R2X6
R3	R3X1	R3X2	R3X3	R3X4	R3X5	R3X6
	$\bar{X1}$	$\bar{X2}$	$\bar{X3}$	$\bar{X4}$	$\bar{X5}$	$\bar{X6}$

Dónde:

TRATAMIENTOS

X1	23.5%
X2	24%%
X3	24.5%
X4	25%
X5	25.5%
X6	26%

VOLUMEN

R1	10 m3 Biogás
R2	10 m3 Biogás
R3	10 m3 Biogás

3.6. TRATAMIENTO DE DATOS

Los valores mostrados a través del procesamiento de datos utilizando el programa Microsoft Excel del sistema de recolección de datos a tiempo real fueron exportados al software para análisis estadístico en SPSS.

Los datos fueron sometidos a un análisis estadístico de bloques con 3 repeticiones, en donde se determina la cantidad gases ácidos removidos de forma porcentual.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EFICIENCIA DE ABSORCIÓN DE LA MONOETANOLAMINA

4.1.1. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DEL BIOGÁS

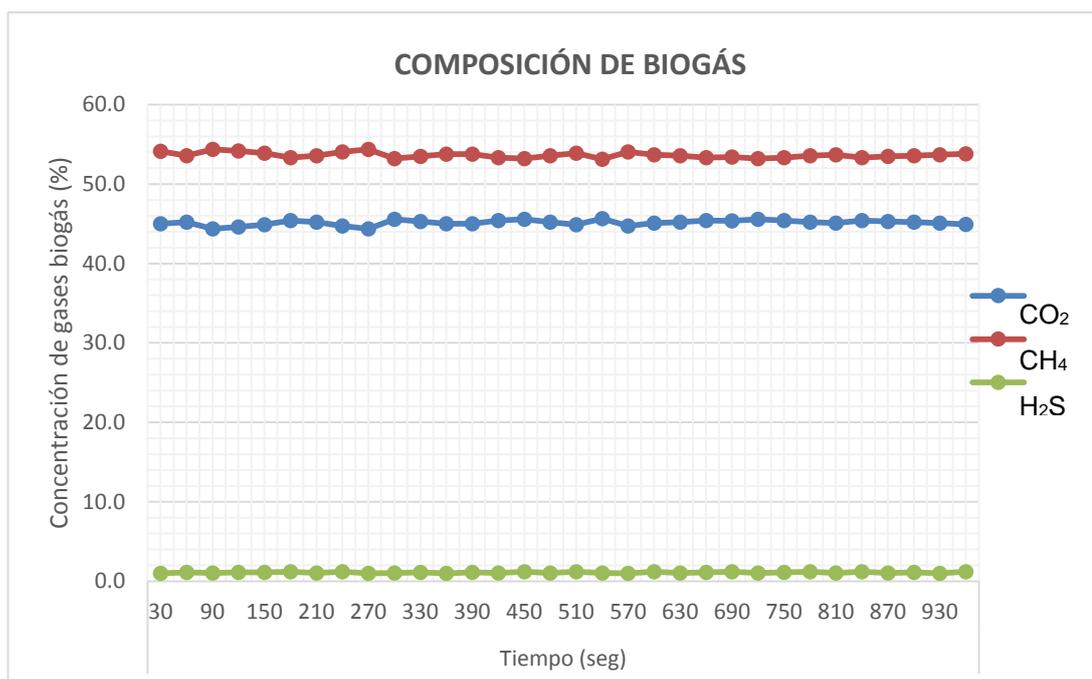


Figura 29. Composición de biogás a partir de aguas residuales de la extracción de aceite de palma.

La composición del biogás a partir de las aguas residuales de la industria de extracción de aceite de palma, contiene volumétricamente un promedio de 54.14% de CH₄, 45% de CO₂ y <1% de H₂S, esta composición es el resultado de las mediciones hechas por el sistema arduino a tiempo real, como parte de la metodología de medición del proyecto “Generación de energía eléctrica y bioabono a partir de lodos de planta extractora de aceite de palma”, ejecutado por la empresa Negocios Amazónicos Sustentables

E.I.R.L. (NEGASUS) y financiado por Innóvate Perú (Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad).

Estos resultados se muestran tal y como lo menciona Salazar (2012). El monitoreo de la calidad del biogás fue por cada minuto y se escogió el biodigestor más eficiente de tres que estaban en prueba. El biodigestor más eficiente fue el de mayor contenido o producción de metano.

La concentración de metano permite al biogás poder ser aprovechada independientemente de la purificación, pero su concentración de dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno no permite al biogás competir caloríficamente con otros combustibles.

Por lo que se requiere una purificación antes de su uso, tal como la remoción de dióxido de carbono para reducir el espacio volumétrico en el biogás y como ende aumentar el poder calorífico y la remoción de sulfuro de hidrógeno para evitar la corrosión de las partes metálicas del motor o equipo donde se utilice al biogás.

4.1.2. ABSORCIÓN DE MEA-CO₂

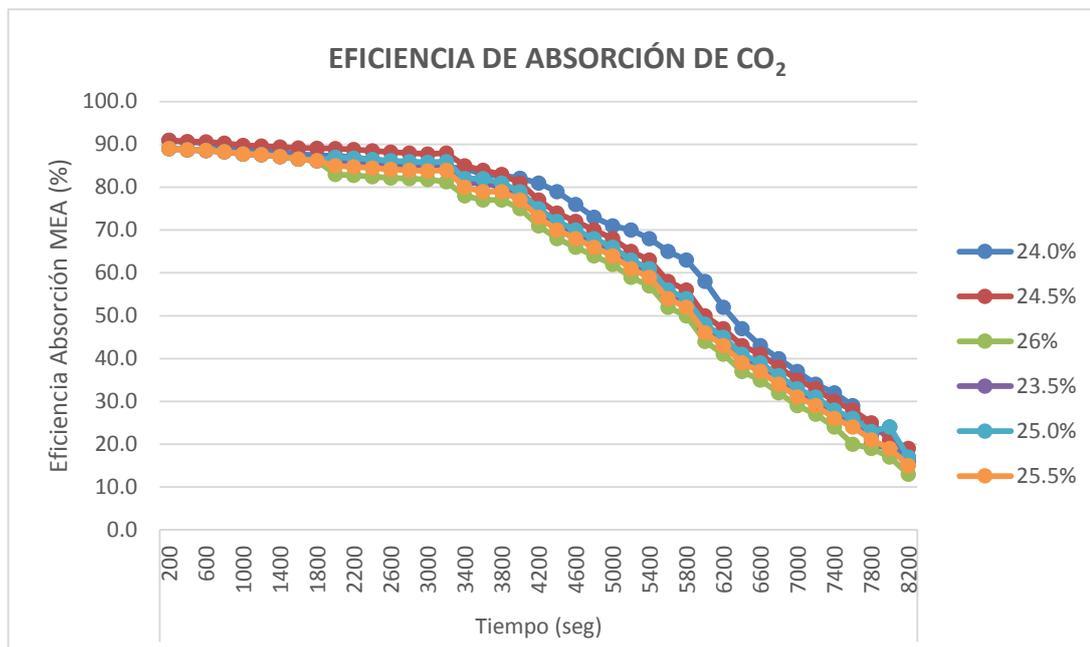


Figura 30. Eficiencia de absorción del dióxido de carbono por diferentes concentraciones de la MEA en flujos de biogás.

En la figura 30 se observa que la concentración más eficiente es la de 24% en dilución, en donde se presenta mayor remoción de CO₂ con el mismo tiempo de trabajo en comparación con las demás concentraciones. A una dilución de 26% existe menor del dióxido de carbono. Las diferentes diluciones de monoetanolamina empiezan con remociones promedio de 90% tal y como lo afirma Harasimowicz (2007) y Ryckebosch (2011), pero estas van reduciendo su eficiencia de absorción con respecto al tiempo y a la concentración de MEA. La concentración del 24% muestra una ventaja de eficiencia entre los 3800 y 6600 segundos, mientras que las demás concentraciones tienden a seguir eficiencias promedio. Antes de alcanzar los 1800 segundos la mayoría de las concentraciones siguen una eficiencia

promedio y de después de este tiempo las eficiencias van tomando diferentes direcciones siendo la de 24% la más diferenciada y notoria.

4.1.3. ABSORCIÓN DE MEA-H₂S

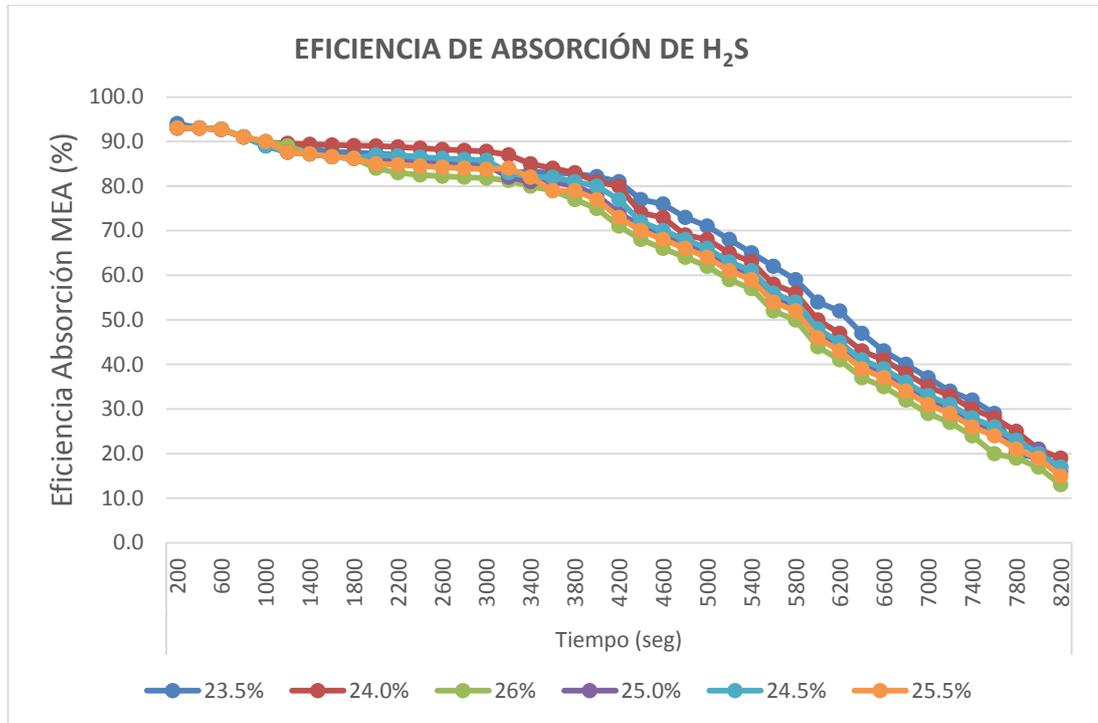


Figura 31. Eficiencia de absorción del dióxido de carbono por diferentes concentraciones de la MEA en flujos de biogás.

En la figura 31 se muestra la eficiencia de absorción de la monoetanolamina en la reducción de sulfuro de hidrógeno en concentraciones de 23.5%, 24%, 24.5%, 25%, 25.5% y 26%, en donde se observa que la concentración más eficiente es la de 23.5% en dilución, siendo esta mayor con respecto al tiempo y remoción de H₂S, por otro lado a una concentración de 26% se observa menor remoción con respecto al tiempo y en comparación con las demás concentraciones. Al inicio la mayoría de las diluciones de monoetanolamina empiezan con remociones promedio por encima del 90% así como lo menciona Huertas, J. G. (2010), pero estas van reduciendo su

eficiencia de absorción con respecto al tiempo y a la concentración de MEA. La concentración del 23.5% muestra una ventaja de eficiencia entre los 4200 y 6600 segundos, mientras que las demás concentraciones tienden a seguir eficiencias promedio. Antes de alcanzar los 1000 segundos la mayoría de las concentraciones siguen una eficiencia promedio y de después las direcciones cambian.

4.1.4. ABSORCIÓN PORCENTUAL TOTAL

4.1.4.1. Absorción porcentual de CO₂

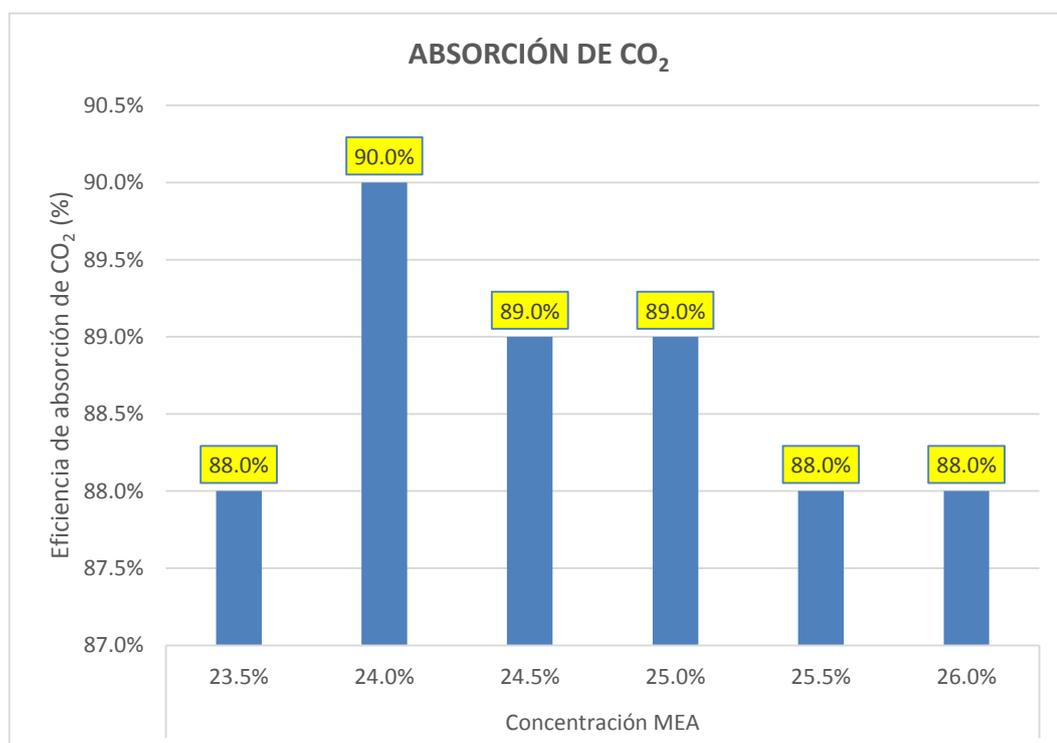


Figura 32. Absorción de CO₂ a diferentes concentraciones de monoetanolamina.

En la figura 32 se muestra las cantidades absorbidas de CO₂ con diferentes concentraciones de monoetanolamina, en donde se observa que a 24% de dilución se obtiene mayor absorción del CO₂, por otro lado las

concentraciones de 24.5% y 25% alcanzan los mismos porcentajes de absorción, mientras que para las concentraciones de 23.5%, 25.5% y 26% los porcentajes de absorción llegan a 88%. En el proceso de remoción del CO₂ todas las concentraciones lo hacen por encima del 85% y la más eficiente es la de 24% con 90% de remoción. El dióxido de carbono promedio presente en el biogás fue de 45% por lo que con una remoción de este al 90% de volumen da lugar a una concentración de metano mayor al 90% en volumen de biogás.

El equipo que se utilizó para las pruebas experimentales tenía un agitador el cual permitía el constante contacto entre la MEA y el medio disolvente, esto con el fin de que se logre una mejor absorción del CO₂. La capacidad de absorción de la monoetanolamina no cumple patrones de proporcionalidad específicos para cada concentración de MEA y se puede observar en el gráfico para una concentración de 24%.

4.1.4.2. Absorción porcentual de H₂S

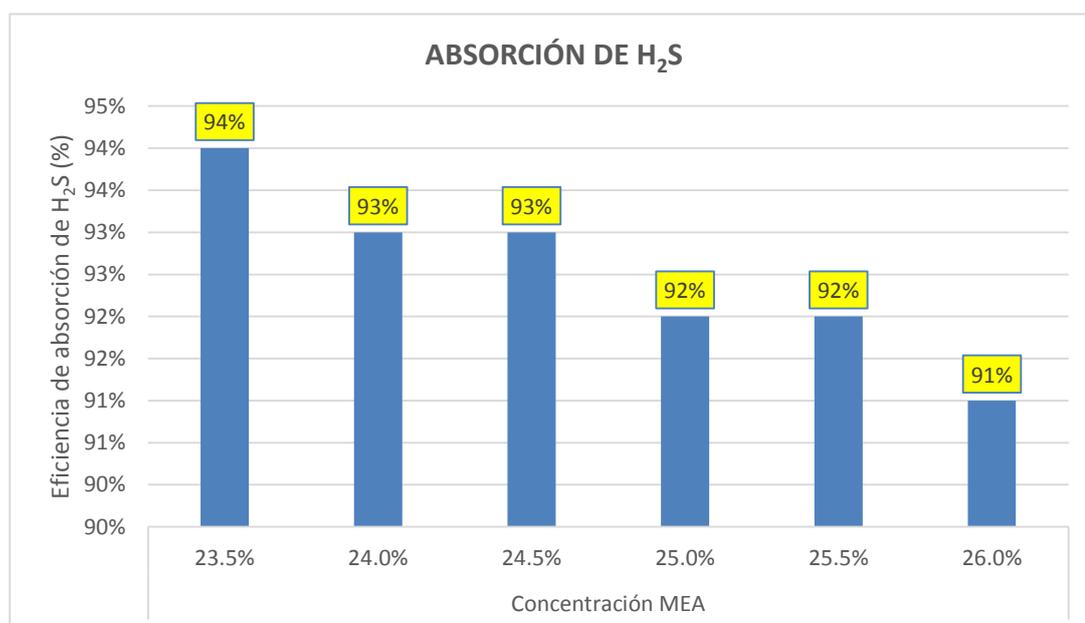


Figura 33. Absorción de H₂S a diferentes concentraciones de monoetanolamina.

En la figura 33 las diferentes concentraciones de monoetanolamina muestran las cantidades absorbidas de H₂S, en donde se observa que a 23.5% de dilución se obtiene mayor absorción del H₂S, mientras las concentraciones de 24% y 24.5% alcanzan los mismos porcentajes de absorción; las concentraciones de 25% y 25.5% llegan a 92% de absorción, por último la concentración de 26% representa el porcentaje más bajo cuantificado en 91%. El sulfuro de hidrógeno promedio presente en el biogás fue de <1% por lo que con una remoción de este al 94% de volumen da lugar a una concentración de este no perjudicial para motores según su aplicación. El equipo que se utilizó para las pruebas experimentales tenía un agitador el cual permitía el constante contacto entre la MEA y el medio disolvente, esto con el fin de que se logre una mejor absorción del H₂S. En el proceso de remoción del H₂S todas las concentraciones lo hacen por encima del 90% y la más eficiente es la de 23.5% con 94% de remoción

4.2. COMPORTAMIENTO DE LA MEA EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN

4.2.1. COMPORTAMIENTO CO₂ – MEA

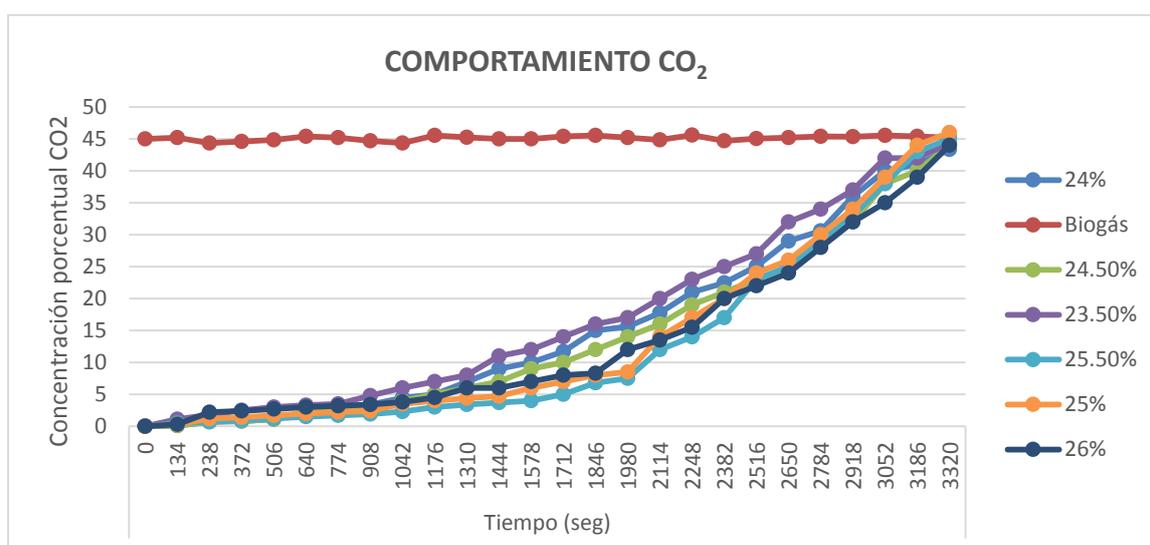


Figura 34. Comportamiento de dióxido de carbono en el proceso de absorción de gases ácidos.

.En la figura 34 se observa que en los primeros 774 segundos la mayoría de las concentraciones tienen el mismo comportamiento a través del tiempo y después de este tiempo manifiestan diferentes direcciones, a los 3186 segundos podemos observar que las direcciones de las concentraciones aún siguen absorbiendo el compuesto por lo que se puede decir q se mantienen removiendo y no se saturan, por otro lado cabe mencionar que a partir de los 3000 segundos la monoetanolamina en sus diferentes concentraciones tiende a alcanzar la línea de concentración de CO₂ presente en el biogás. A una concentración de 25.5% se reflejan absorciones más bajas en el comportamiento de las alcanolaminas, por otro lado a 23.5% se observa que empieza con la mayor absorción de CO₂ en el mismo tiempo que las demás concentraciones.

4.2.2. COMPORTAMIENTO DE H₂S - MEAg

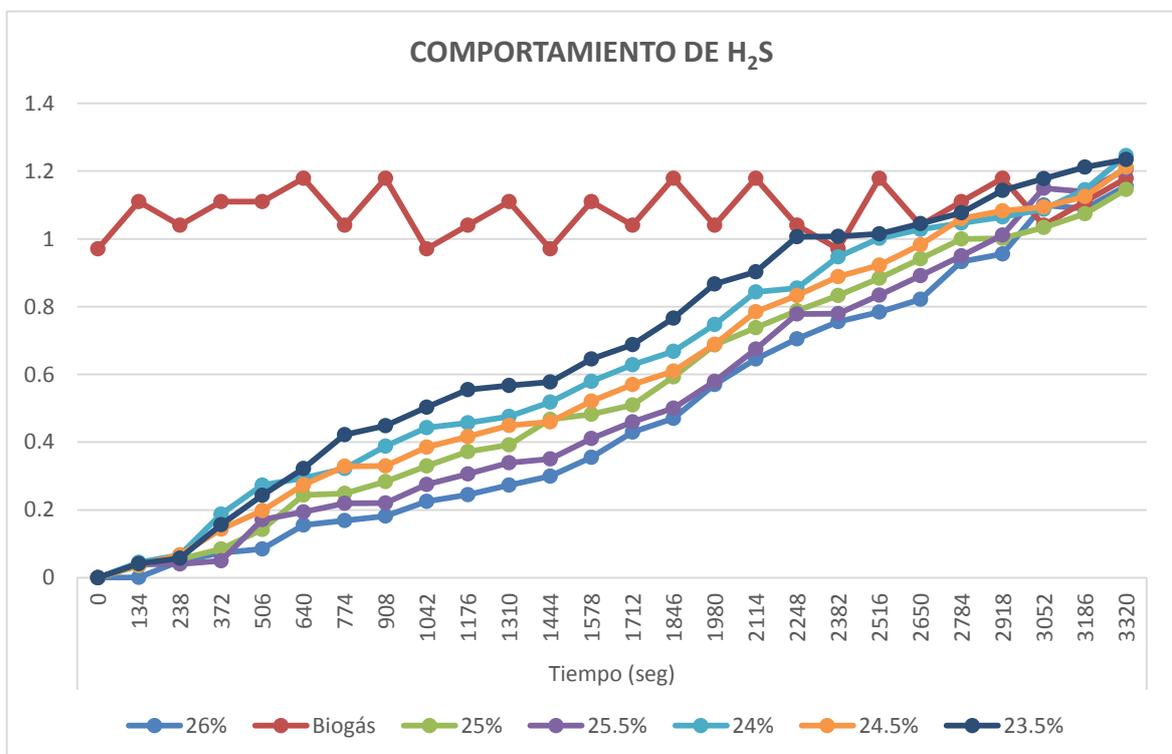


Figura 35. Comportamiento del sulfuro de hidrógeno en el proceso de absorción de gases ácidos.

En la figura 35 se observa que a una concentración de 26% se reflejan absorciones más bajas en el comportamiento de las alcanolaminas, por otro lado a 23.5% se observa que empieza con la mayor absorción de H₂S en el mismo tiempo que las demás concentraciones, El sulfuro de hidrógeno el cual representa en el biogás una cantidad de <1%, logra ser interceptada a los 2248 segundos. En los primeros 238 segundos la mayoría de las concentraciones tienen el mismo comportamiento a través del tiempo y después de este tiempo manifiestan diferentes direcciones, a los 2500 segundos podemos observar que las direcciones de las concentraciones aún siguen absorbiendo el compuesto por lo que se puede decir que se mantienen removiendo y no se saturan. A una concentración de 26% se reflejan absorciones más bajas en el comportamiento de las alcanolaminas, por otro lado a 23.5% se observa que empieza con la mayor absorción de H₂S en el mismo tiempo que las demás concentraciones.

4.3. CONCENTRACIÓN DE METANO EN EL FLUJO DE BIOGÁS

Tabla 10. Resumen de remoción de gases ácidos y concentración porcentual en volumen final de metano.

MEA	Remoción CO ₂	Remoción H ₂ S	CH ₄ en biogás
23.5%	88%	94%	90.70%
24.0%	90%	93%	92.09%
24.5%	89%	93%	91.38%
25.0%	89%	92%	91.38%
25.5%	88%	92%	90.67%
26.0%	88%	91%	90.65%

La nueva concentración de metano se cuantificó teniendo en cuenta la nueva concentración de este en el biogás, el cual ya purificado, contiene menos concentración de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. La nueva concentración de metano es el resultado del volumen contenido en el biogás con respecto al volumen total de este con los gases ácidos removidos.

El resultado de esta cuantificación proporcionó información de la nueva concentración de metano en el biogás con unidades porcentuales, el cual representa su contenido porcentual en el biogás purificado, más no un aumento en la producción de metano contenido en este.

En la tabla 10 se observa el resumen de la eficiencia de remoción de los gases ácidos con la monoetanolamina en concentraciones de 23.5%, 24%, 24.5%, 25%, 25.5% y 26%, los cuales tuvieron una remoción de dióxido de carbono de 88%, 90%, 89%, 89%, 88% y 88% respectivamente. Por otro lado la remoción del sulfuro de hidrógeno llegó hasta el 94%.

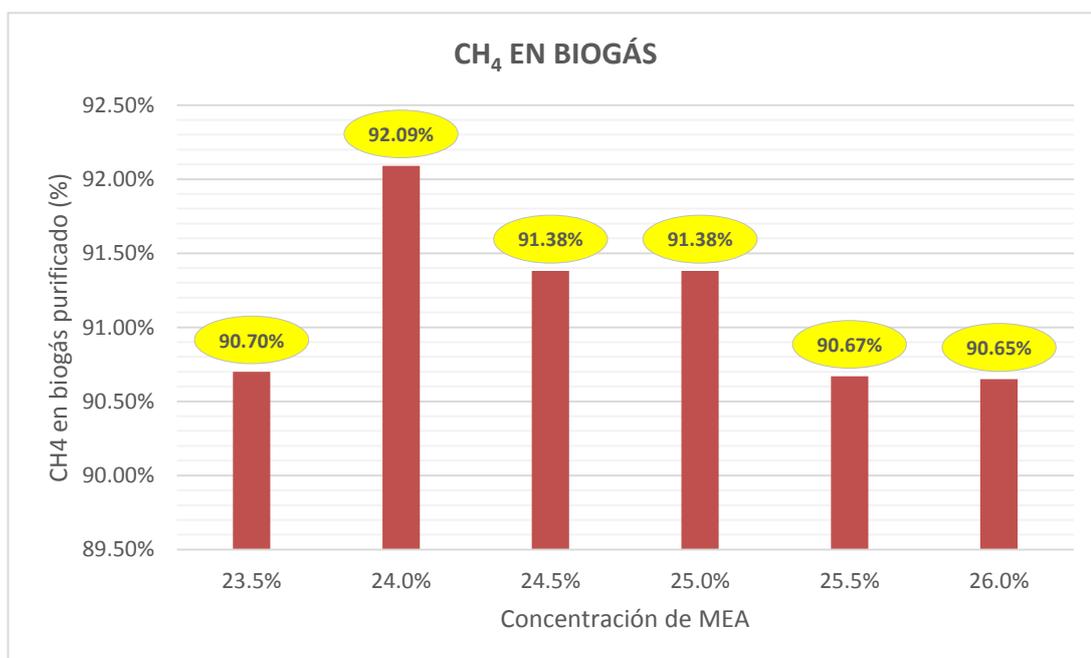


Figura 36. Concentración de metano en biogás después de la purificación.

En la figura 36 se muestra la concentración de metano en el biogás después del proceso de purificación del mismo, en las diferentes concentraciones de la monoetanolamina, en donde a una concentración de 24% se obtiene 92% de metano en el biogás y a esa concentración se logra mayor poder calorífico en el biogás, tal y como menciona Harasimowicz (2007), como también su menor corrosión a equipos metálicos Marchaim U. (1992).

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La mejor eficiencia de absorción de los gases ácidos fue a una concentración en volumen de monoetanolamina de 24%, con remociones de hasta el 90% para el CO₂ y el 93% para el H₂S. Por otro lado a una concentración de 23.5% se alcanza una remoción del 94% de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, lo que reduce el riesgo de corrosión por en partes metálicas del equipo en donde se efectuará su combustión.
- El comportamiento de absorción para las diferentes concentraciones de monoetanolamina se manifestó a los 2 500 segundos, sin embargo, las direcciones de las concentraciones aún siguen absorbiendo el compuesto. A partir de los 2 250 segundos la monoetanolamina en sus diferentes concentraciones tiende a alcanzar la línea de concentración de CO₂ presente en el biogás.
- La concentración de metano en volumen en el biogás alcanzó un 92%, lo cual convierte al biogás más competitivo con respecto a su uso alternativo como combustible y como resultado de la remoción del CO₂, el cual ocupaba un promedio del 40% del volumen del biogás y por ende reducía el poder calorífico del biogás.

- El método del burbujeo para la purificación del biogás mediante el uso de alcanolaminas permite obtener un combustible renovable con mayor poder calorífico y menor riesgo de corrosión

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de absorción de CO₂ y H₂S con concentraciones de monoetanolamina recuperada con el fin de conocer cuántas veces puede ser reusado, cuánto de MEA puedo reaprovechar y cómo va disminuyendo su eficiencia según la cantidad de veces que esta se recupere y sea reutilizado.
- Antes del uso de biogás independientemente de su procedencia se debe realizar un profundo análisis de la composición de este con el fin de aumentar su poder calorífico mediante al purificación y al mismo tiempo conocer el método que utilizaremos para obtener el mismo, por otro lado se podrá conocer la cantidad de MEA que se utilizará previo uso del biogás.
- Realizar las pruebas de purificación del biogás con un burbujeador que permita obtener unas burbujas de menor diámetro lo cual garantizará un mayor contacto entre el burbujeo y la monoetanolamina diluida. Por otro lado efectuar una cuidadosa revisión de las posibles fugas antes de realizar las pruebas, estas se pueden realizar con métodos sencillos.

- Realizar pruebas de calibración a los equipos que se utilizarán para las mediciones de gases. Esta acción es muy importante antes de utilizar estos equipos en las corridas experimentales y se deben realizar cada vez que se deje de utilizar en la pruebas o estas se utilicen de forma no continua.
- Los sensores dentro del equipo medidor de gases portátil pueden sufrir daños directos e indirectos por lo que es necesario cubrirla con esmalte epóxico, el recubrimiento se debe realizar en la posición despejada del circuito de sensores. El esmalte epóxico de dos componentes, a base de resina epóxica que endurece por la adición de resina poliamida, es un recubrimiento diseñado para brindar alta protección y durabilidad a superficies además de una considerable resistencia a la abrasión y productos químicos

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Aboudheir A., T. P. (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-Peru: 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.
- Brundick, W. (2010). Sulfatreat estimated performance sheet. Chesterfield, Missouri, USA : s.n.: Mi Swaco.
- Carrillo, L. (2003). Microbiología 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. G. (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. M. (2007). Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria integrada de EARTG. Universidad EARTH.
- Dagoberto, E. (2005). EL BIODIGESTOR. COSTA RICA: ACCS.
- Díaz-báez, M. E. (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., B. T. (1993). "Corrosion Behavior reactive absorption of carbon dioxide in high CO₂-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions". En C. E. Science, Chemical Engineering Science (págs. 10169–10179.).
- Etcharren, P. (2005). Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fabrica "Lubascher y Krausse" Temuco. Tesis Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería, Temuco, Chile. 162.
- Forsich, C. L. (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.
- Garetto, T. (2000). Principios de Adsorción. Santa Fe: Aecid.
- González, A. (2006). Estudio de la oxidación biológica de compuestos reducidos de azufre por un consorcio alcalófilo en un biorreactor. Tesis Doctor en Ciencia Ingeniería Química. Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, México DF. 90 .
- Gosh, D. (2007). WET H₂S CRACKING PROBLEM IN OIL REFINERY PROCESSES – MATERIAL SELECTION AND OPERATION CONTROL ISSUES. USA : Indian Oil Corporation.
- Harasimowicz. (2007). Journal of Hazardous Materials,. En Harasimowicz, Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment, (págs. 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. G. (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).
- IPCC, P. I. (2007). IPCC. Recuperado el 22 de MARZO de 2017, de IPCC: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/es/tssts-1-2.html

- Isam. (2009). Microbes in aerobic and anaerobic waste treatment. En *Microbes at work. From wastes to resources* (págs. 1-34). Heidelberg, Dordrecht, London, New York.: Springer.
- Lender, J. (2015). Agua caliente. *UNU vol 2 N 2, 12 / 18*.
- Llaneza, H. M. (2010). Purificación, caracterización y control de biogás. Análisis de la viabilidad en sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. doi: PS-120000-2007-6.
- Llaneza, H., Morís, A., Gonzáles, L., & Gonzáles, E. (2010). Caracterización, purificación y control del 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., & Mertinko, J. y. (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.
- Marchaim, U. (1992). *Biogas processes for sustainable development*,FAO. Roma,Italia: ISBN 92-5-103126-6.
- Mitzlaff, K. v. (1988). *Engines for biogas*. Germany: GATE. Deutsches Zentrum fur.
- Morero, B. G. (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.mspsesp.com/pdf/environtec_general.pdf
- Muñoz, C. M. (2008). *Tecnologías de captura y secuestro de CO₂*. Chile: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE, IEE3372 MERCADOS ELECTRICOS.
- 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.

- Porpatham, E. R. (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.
- Salazar, C. J. (2012). Evaluación de la eliminación de CO₂ y H₂S por endulzamiento del biogás usando soluciones acuosas de alcanolaminas. Tacna-Peru: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman-Tacna.
- SAN MARTÍN, M. C. (2013). ESTUDIOS DE CORROSIÓN Y DEGRADACIÓN DE MONOETANOLAMINA EN PLANTA PRODUCTORA DE DIÓXIDO DE CARBONO. SANTIAGO DE CHILE.
- Sánchez, J. O. (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 CO₂ 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.
- Subhasish, M. (2015). A Technical Report on Gas Sweetening by Amines. Ltd, Mumbai, India: DOI: 10.13140/RG.2.1.2061.9360.
- Tecnologías de captura y secuestro de CO₂. (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%20CO2.pdf>
- Téllez, S. C. (2008). DISEÑO Y SELECCION DE ELEMENTOS PARA. VALDIVIA-CHILE : Universidad Austral de Chile .
- Thomsen H., G. S. (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 diesel por efecto del elevado contenido de azufre en petróleo diesel. *Revista de Investigación de Física*. Vol. 12 N° 2, 30-37
- Van HAANDEL, A. y. (1994). Tratamiento Anaeróbico de Esgotos. Campina Grande, Brasil: EPGRAF.

- Walsh, J. R. (1988). Handbook on biogas utilization. United States of America,.
- Wark, W. (2000). Contaminación del Aire. Origen y Control. s.l. Limusa. doi: ISBN 968-18-1954-3.
- Yang H., X. Z. (2008). "Progress in carbon dioxide separation and capture: A review". Journal of Environmental Sciences.
- Zapata, A. (1998). Biogas Utilization for Electricity Generation. Cali : CIPAV.

ANEXOS

ANEXO 1

PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 38. Filtros de sulfuro colocados de forma vertical por donde pasa el biogás y llega a los gasómetros.



Figura 37. Dispositivo de medición del sistema arduino.



Figura 40. Prueba de calibración del sensor con medición de pH.



Figura 39. Sensor cubierto con pintura epóxica con el fin de evitar corrosión.



Figura 42. Equipo de medición de los gases ácidos en el proceso de purificación.



Figura 41. Biodigestores del proyecto bioenergía ejecutado por NEGASUS.



Figura 43. Gasómetros para cada biodigestor colocados de forma suspendida y con sus respectivas conexiones.