

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO
QUIMICO EN LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOMETANO, EN LA PLANTA EXTRACTORA DE
PALMA DE ACEITE INDOLMASA, UCAYALI – 2021”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

SAYURI JULISSA HERRERA CHALLCO

PUCALLPA – PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
COMISIÓN DE GRADOS Y TITULOS




ACTA DE APROBACION DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
N° 132/2021-CGyT-FCFyA-UNU

En la ciudad de Pucallpa a las 09:00 a.m. del miércoles 24 de noviembre de 2021, de acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Ucayali, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador en forma virtual, mediante la plataforma unificada de comunicación y colaboración Microsoft Teams, los mismos que estuvo designados con Memo Múltiple N.º 160-2021-UNU-FCFyA-CGT, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Carlos Panduro Carbajal	Presidente
Dr. David León Moreno	Miembro
Dra. Julissa Katy Bautista Valencia	Miembro

Se procedió a evaluar a la sustentación de la tesis denominado: **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO QUIMICO EN LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOMETANO, EN LA PLANTA EXTRACTORA DE PALMA DE ACEITE INDOLMASA, UCAYALI – 2021”**, presentado por la bachiller **HERRERA CHALLCO SAYURI JULISSA**, asesorado por el Dr. GROBER PANDURO PISCO, habiendo finalizado la sustentación, se procedió a la formulación de preguntas por parte del Jurado Evaluador, las que fueron absueltas por la sustentante, en consecuencia la tesis fue **APROBADO POR UNANIMIDAD**, quedando expedito para el otorgamiento del **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**, después de las correcciones respectivas de la tesis. Siendo las 11 :00 a.m. horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando los miembros en señal de conformidad.



Dr. Carlos Panduro Carbajal
Presidente



Dr. David León Moreno
Miembro



Dra. Julissa Katy Bautista Valencia
Miembro

ACTA DE APROBACION

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

Dr. David León Moreno



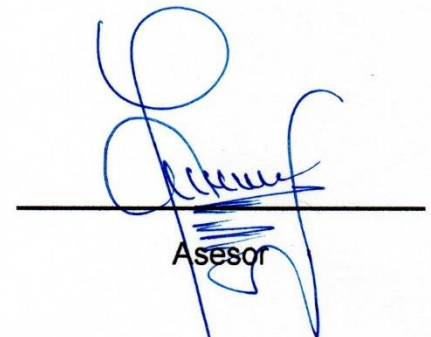
Miembro

Dra. Julissa Katy Bautista Valencia



Miembro

Dr. Grober Panduro Pisco



Asesor

Bach. Sayuri Julissa Herrera Chalco



Tesista



UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
DIRECCION DE PRODUCCION INTELECTUAL

CONSTANCIA

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACION

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

N° V/0080-2021

La Dirección de Producción Intelectual, hace constar por la presente, que el Informe Final (Tesis) Titulado:
"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO QUIMICO EN LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS PARA LA OBTENCIÓN DE BIOMETANO, EN LA PLANTA EXTRACTORA DE PALMA DE ACEITE INDOLMASA, UCAYALI – 2019".

Cuyo autor (es): HERRERA CHALLCO, SAYURI JULISSA

Facultad : CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
Escuela Profesional: INGENIERIA AMBIENTAL
Asesor(a) : Dr. PANDURO PISCO, GROBER

Después de realizado el análisis correspondiente en el Sistema Antiplagio URKUND, dicho documento presenta un **porcentaje de similitud de 10%**.

En tal sentido, de acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en el artículo 9 de la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND, el cual indica que no se debe superar el 10%. Se declara, que el trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de similitud, por lo que SI se aprueba su originalidad.

En señal de conformidad y verificación se entrega la presente constancia.

Fecha: 07/03/2021



Dra. DINA PARI QUISPE
Dirección de Producción Intelectual

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

Yo, JAYURI JULISSA HERRERA CHALCO
Autor de la TESIS titulada:
"EVALUACION DE LA EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO QUIMICO
EN LA PURIFICACION DEL BIOGAS PARA LA OBTENCION
DE BIOMETANO, EN LA PLANTA EXTRACTORA DE PALMA
DE ACEITE INDOLMASA, UCAYALI - 2021"

Sustentada el año: 2021
Con la asesoría de: Dr. GROBER PANDURO PISCO
En la Facultad de: CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
Carrera Profesional de: INGENIERIA AMBIENTAL

Autorizo la publicación:

- PARCIAL** Significa que se publicará en el repositorio institucional solo La caratula, la dedicatoria y el resumen de la tesis. Esta opción solo es válida marcar **si su tesis o documento presenta material patentable**, para ello deberá presentar el trámite de CATI y/o INDECOPI cuando se lo solicite la DGPI UNU.
- TOTAL** Significa que todo el contenido de la tesis y/o documento será publicada en el repositorio institucional.

De mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali (www.repositorio.unu.edu.pe), bajo los siguientes 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 formato 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, caso contrario, me hago único(a) responsable de investigaciones y observaciones futuras, de acuerdo a lo establecido en el estatuto de la Universidad Nacional de Ucayali y del Ministerio de Educación.

En señal de conformidad firmo la presente autorización.

Fecha: 24 / 11 / 2021

Email: Julissachalco1997@gmail.com

Firma: 

Teléfono: 994914183

DNI: 72178764

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios, por ser nuestro creador y ayudarme a cumplir esta gran meta de mi vida. Además, de brindarme su protección estuvo para mí en cada segundo, para escuchar mis angustias y llenarme de ánimo y fortaleza.

A mi madre Vilma Challco Gonzales pues sin ella no lo había logrado. Tu bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien. Por eso te dedico mi trabajo en ofrenda por tu paciencia, trabajo, sacrificio y amor incondicional que me brindas.

A mi padre Sergio Herrera Sanchez, por brindarme su soporte desde el primer día. Tus consejos y educación a lo largo de la vida me han servido para llegar donde estoy. Por eso te dedico mi trabajo en ofrenda a tu amor y apoyo sin condiciones.

A mis hermanas Jarumi Herrera y Naomi Herrera, por su cariño y apoyo incondicional durante todo este proceso.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas mis amistades, por apoyarme cuando más lo necesito, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento al Dr. Grober Panduro Pisco, sin usted y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando más las necesite; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas.

A mis docentes que tuve la oportunidad de conocer, sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos, a ustedes mis profesores queridos, les debo mis conocimientos. Donde quiera que vaya, los llevaré conmigo en mí transitar profesional. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE TABLA.....	xii
ÍNDICE DE FIGURA.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1. Formulación del problema.....	5
1.1.1. Problema general.....	5
1.1.2. Problemas específicos.....	5
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. General.....	6
1.2.2. Específico.....	6
1.3. Hipótesis.....	7
1.3.1. Hipótesis alterna (Ha).....	7
1.3.2. Hipótesis nula (H0).....	7
1.4. Componentes estudiados.....	7

1.4.1. Variables independientes	7
1.4.2. Variables dependientes	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes del Problema	8
2.1.1. A nivel internacional	8
2.1.2. A nivel nacional	11
2.1.3. A nivel local	11
2.2. Planteamiento Teórico del Problema	12
2.2.1. El biogás	12
2.2.2. Características generales del biogás	12
2.2.3. Diglicolamina (DGA)	14
2.2.4. Eliminación del CO ₂	14
2.2.5. Eliminación del H ₂ S	21
2.2.6. Resumen de las principales características de las tecnologías de purificación de biogás	24
2.3. Definición de Términos Básicos	28
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	30
3.1. Metodología de la investigación	30
3.2. Ubicación, población y muestra	31
3.2.1. Ubicación	31

3.2.2. Población	31
3.2.3. Muestra	31
3.3. Diseño de la investigación	32
3.4. Análisis estadístico.....	33
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	33
3.5.1. Técnicas.....	33
3.5.2. Instrumentos.....	33
3.6. Procedimiento de Recolección de Datos.....	35
3.6.1. Antes de la evaluación.....	35
3.6.2. Durante la evaluación	38
3.6.3. Después de la evaluación	44
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
4.1. Concentración de CO ₂ y H ₂ S obtenido del tratamiento químico en la obtención de biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA	47
4.1.1. Concentración de CO ₂ y H ₂ S con MEA y AAC (testigos).....	47
4.1.2. Concentración de CO ₂ y H ₂ S con MEA + AAC (mezclas).....	54
4.2. Concentración de CH ₄ obtenido del tratamiento químico en la obtención de biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA.....	60
4.2.1. Concentración de CH ₄ con MEA y AAC (testigos).....	60

4.2.2. Concentración de CH ₄ con MEA + ÁAC (mezclas.....	64
4.3. Potencial energético del biometano obtenido de la purificación mediante el tratamiento químico en la Planta Extractora de Palma de Aceite	
INDOLMALSA	67
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1. Conclusiones	70
5.2. Recomendaciones	71
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	72
ANEXOS	78
Anexo 1. Iconografía.....	79
Anexo 2. Tablas en general.....	84

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Características Generales del Biogás.....	13
Tabla 2. Características de las tecnologías disponibles para purificar biogás. ...	25
Tabla 3. Concentración inicial y final de CO ₂ y H ₂ S.....	47
Tabla 4. Concentración de CO ₂ y H ₂ S en el testigo ÁAC.	50
Tabla 5. Concentración de CO ₂ y H ₂ S en el biogás obtenido de los tratamientos (mezcla al 30%, 50% y 70%) y testigo de MEA y ÁAC.	54
Tabla 6. Concentración de CH ₄ en el testigo MEA.....	60
Tabla 7. Concentración de CH ₄ en el testigo ÁAC.	62
Tabla 8. Concentración de CH ₄ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla al 30%, 50% y 70%) y testigos de MEA y ÁAC.	64
Tabla 9. Poder calorífico del biogás purificado obtenido con el tratamiento químico.	67
Tabla 10. Prueba de Anova para la concentración de CO ₂ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).....	84
Tabla 11. Prueba de Tukey SHD para la concentración de CO ₂ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).....	84
Tabla 12. Anova para la concentración de H ₂ S con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).	85
Tabla 13. Prueba de Tukey SHD para la concentración de H ₂ S con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).....	85
Tabla 14. Prueba de Anova para la concentración de CO ₂ con el testigo ÁAC al (30%, 50% y 70%).....	86

Tabla 15. Anova para la concentración de H ₂ S con el testigo ÁAC al (30%, 50% y 70%).	86
Tabla 16. Prueba de Anova para la concentración de CO ₂ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla) y testigo MEA y Acético a 30%, 50% y 70%.	87
Tabla 17. Prueba de Tukey HSD para la concentración de CO ₂ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla) y testigo MEA y Acético a 30%, 50% y 70%.	87
Tabla 18. Prueba de ANOVA para la concentración de H ₂ S en el biogás obtenido con los tratamientos (MEA+ÁAC al 30%, 50% y 70%) y testigo MEA al 30% y ÁAC al 70%.	88
Tabla 19. Prueba de HSD Tukey para la concentración de H ₂ S en el biogás obtenido con los tratamientos (MEA+ÁAC al 30%, 50% y 70%) y testigo MEA al 30% y ÁAC al 70%.	88
Tabla 20. Prueba de Anova para la concentración de CH ₄ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).	89
Tabla 21. Prueba de Tukey HSD para la concentración de CH ₄ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).	89
Tabla 22. Prueba de Anova para la concentración de CH ₄ con el testigo ÁAC al (30%, 50% y 70%).	90
Tabla 23. Prueba de Anova para la concentración de CH ₄ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla a 30%, 50% y 70%) y testigos de MEA y ÁAC.	90

Tabla 24. Prueba de Tukey HSD para la concentración de CH ₄ en el biogás obtenido con los tratamiento (mezcla a 30%, 50% y 70%) y testigos de MEA y AAC.	91
Tabla 25. Prueba de ANOVA para el poder calorífico obtenido de la mezcla de MEA+AAC y testigos al 30%, 50% y 70%.	91
Tabla 26. Prueba HSD de Tukey para el poder calorífico obtenido de la mezcla de MEA+AAC y testigos al 30%, 50% y 70%.	92

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. <i>Equipos, materiales e insumos para el tratamiento.</i>	35
Figura 2. <i>Área de trabajo en acondicionamiento para los tratamientos.</i>	36
Figura 3. <i>Reacondicionamiento de los sistemas hidráulicos y biodigestores.</i> ...	37
Figura 4. <i>Sistema de generación de biogás en funcionamiento.</i>	37
Figura 5. <i>Sistema de purificación de biogás con mezclas de MEA y AAC.</i>	38
Figura 6. <i>Dilución de la MEA.</i>	40
Figura 7. <i>Dilución del AAC</i>	41
Figura 8. <i>MEA al 30%</i>	42
Figura 9. <i>AAC al 70%.</i>	42
Figura 10. <i>Tratamiento 1 (MEA al 30%+AAC al 70%), con relación 30:70</i>	43
Figura 11. <i>Componentes de medición de CH₄, CO₂ y H₂S</i>	44
Figura 12. <i>Toma de datos de Campo</i>	45
Figura 13. <i>Lectura de CH₄, CO₂ y H₂S</i>	45
Figura 14. <i>Sensores de medición de gas CH₄, CO₂ y H₂S.</i>	46
Figura 15. <i>Concentración de CO₂ en el biogás obtenido del testigo MEA.</i>	48
Figura 16. <i>Concentración de H₂S en el biogás obtenido del testigo MEA.</i>	49
Figura 17. <i>Concentración de CO₂ en el biogás obtenido del testigo AAC.</i>	51
Figura 18. <i>Concentración de H₂S en el biogás obtenido del testigo AAC.</i>	52
Figura 19. <i>Concentración de CO₂ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla de MEA y AAC)</i>	55
Figura 20. <i>Concentración de H₂S en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla de MEA y AAC)</i>	57

Figura 21. Concentración de CH ₄ en el biogás obtenido en el testigo MEA	61
Figura 22. Concentración de CH ₄ en el biogás obtenido del testigo AAC al 30%, 50% y 70%.	63
Figura 23. Concentración de CH ₄ obtenido de la purificación del biogás con los testigos y tratamientos (mezcla).	65
Figura 24. Poder calorífico en el biogás con los testigos y tratamientos (mezcla).	69
Figura 25. Sistema de generación de biogás.	79
Figura 26. Sistema de almacenamiento de biogás.	79
Figura 27. Inspeccionando cálculos.	80
Figura 28. Solución de MEA + AAC	80
Figura 29. Mezclando las soluciones de MEA + AAC	81
Figura 30. Proceso de absorción y purificación.....	81
Figura 31. Sensores de medición de CH ₄ , CO ₂ y H ₂ S	82
Figura 32. Llama color anaranjado prueba del Biogás Inicial	82
Figura 33. Llama de color Azul, prueba del Poder Calorífico después del tratamiento 1 (mezcla al 30% MEA y 70% AAC)	83

RESUMEN

El biogás con su principal componente el metano (CH_4), es considerado como alternativo al uso de combustibles fósiles, sin embargo, tiene entre sus principales impurezas al dióxido de carbono (CO_2) y el ácido sulfhídrico (H_2S), siendo necesario su purificación química con aminas para obtener biometano con contenido superior al 90% de CH_4 con lo cual estaría en condiciones de ser utilizado como combustible doméstico y automotor. Es por ello que se ha planteado purificar el biogás procedente de lodos de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), utilizando los componentes químicos: monoetanolamina (MEA) y ácido acético (ÁAC), como tratamiento testigo T_0 y T_0' en concentraciones de 30, 50, 70%; la mezcla de ambos en los tratamientos T_1 30% MEA y 70% ÁAC, T_2 50% MEA y 50% ÁAC y T_3 70% MEA y 30% ÁAC. Los resultados muestran que el T_0 al 50% de MEA presentó concentraciones de 31% de CO_2 , 47 ppm de H_2S y 69% de CH_4 y el T_0' al 70% de ÁAC presentó 44% de CO_2 , 55 ppm de H_2S y 56% de CH_4 ; respecto a las mezclas, el mejor resultado fue obtenido con el T_1 (mezcla de 30% MEA y 70% ÁAC), que presentó una concentración de 25% de CO_2 , 40 ppm de H_2S , 75% de CH_4 y 7145 kcal; concluyendo que el porcentaje de CH_4 registrado (75%) no permite la obtención de biometano debido a que se requiere 90 - 95% de CH_4 , sin embargo, la calidad del gas es alta, y se puede usar para cocinar alimentos o como combustible de motor de combustión interna, debido al buen poder calorífico y libre de corrosión.

Palabras Clave: Aminas, Biometano, Purificación, Impurezas, Concentración.

ABSTRACT

Biogas, with its main component methane, is considered an alternative to the use of fossil fuels, however, it has among its main impurities carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S), being necessary its chemical purification with amines to obtain biomethane with a content greater than 90% of methane (CH₄) with which it would be in a position to be used as domestic and automotive fuel. That is why it has been proposed to purify the biogas from oil palm sludge (*Elaeis guineensis*), using the chemical components: monoethanolamine (MEA) and acetic acid (ÁAC), as control treatment T₀ and T_{0'} in concentrations of 30, 50, 70%; the mixture of both in the treatments T₁ 30% MEA and 70% ÁAC, T₂ 50% MEA and 50% ÁAC and T₃ 70% MEA and 30% ÁAC. The results show that the T₀ at 50% of MEA presented concentrations of 31% of CO₂, 47 ppm of H₂S and 69% of CH₄ and the T_{0'} at 70% of ÁAC presented 44% of CO₂, 55 ppm of H₂S and 56% of CH₄; Regarding the mixtures, the best result was obtained with T₁ (mixture of 30% MEA and 70% ÁAC), which presented a concentration of 25% CO₂, 40 ppm H₂S, 75% CH₄ and 7145 kcal; concluding that the percentage of CH₄ registered (75%) does not allow the obtaining of biomethane because it requires 90 - 95% of CH₄, however, the quality of the gas is high, and it can be used to cook food or as fuel for internal combustion engine, due to the good calorific value and free of corrosion.

Key Words: Amines, Biomethane, Purification, Impurities, Concentration.

INTRODUCCIÓN

El biogás es un combustible renovable con amplias aplicaciones en todo el mundo (Weiland, 2010; Achina, Achinas, & Euverink, 2017; Alhassan, Abdullahi, & Shah, 2019). Más de 60,8 mil millones de m³ de biogás se producen anualmente en el mundo (WBA, 2018). El biogás es un producto ecológico y económico. Fuente de energía renovable amigable y fácilmente procesable (Marchaim, 1992; Gunaseelan, 1997), el conjunto de residuos agroindustriales (sólidos y líquidos), es conocido como biomasa; y las nuevas formas de aprovecharla es para la producción de bioenergía. Así, los residuos sólidos generan electricidad y los líquidos han sido evaluados como biocombustibles (biodiesel, bioetanol y biogás) (Vargas & Pérez, 2018). Por su naturaleza, representan una ventaja sobre los combustibles fósiles al ser formas de energía renovables. Ante ello, el biogás es alternativo al gas natural y se genera mediante la digestión anaeróbica de algunos residuos orgánicos provenientes, principalmente de plantas industriales. El biogás es una mezcla de gases CH₄ o biometano, y CO₂ con menores porcentajes de vapor de agua, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico (H₂S), este último junto con el CO₂ son removidos al purificarse el biogás obteniendo CH₄, siendo este el gas de mayor interés desde el punto de vista económico, debido a su utilidad como combustible por su alto valor calórico (Guo, Song, & Buhain, 2015) (Morero & Campanella, 2013). Los gases no deseados tienen algún efecto nocivo sobre la maquinaria. Por ejemplo, el alto contenido de CO₂ (40%) en crudo el biogás reduce la eficiencia del motor y la potencia de salida al aumentando las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos. Así, el uso de biogás en centrales eléctricas

o de combustión interna los motores están obstruidos (Marchaim, 1992; Abatzoglou & Boivin, 2009; Porpatham, Ramesh, & Nagalingam, 2007). La presencia de H_2S causa corrosión en el motor o sistema de tuberías formando sulfuros metálicos a través de reacciones químicas con partes metálicas. Por lo tanto, la eliminación de gases contaminados del biogás crudo es necesario no solo para aumentar el valor calórico, pero también para usar el gas de manera segura sin enfrentar ningún riesgo de corrosión (Holm, Seadi, & Oleskowicz, 2009).

Desde hace algunos lustros se ha venido estudiando la implementación de diversas alternativas para retirar los contaminantes presentes en el biogás (Tippayawong & Thanampongachart, 2010), dentro de ellas están los procesos de adsorción química, adsorción física, adsorción en superficie sólida, separación por membrana, separación criogénica, conversión química y procesos biológicos (Morero & Gropelly, 2010). Diferentes compuestos orgánicos han sido utilizados para la purificación del biogás. Las soluciones de aminas (mono, di, tri etanol aminas o glicol aminas) se combinan por el grupo amino $[(NH_2)]$ con CO_2 y H_2S para dar hidrógeno carbonato de amonio $[(RNH_3)HCO_3]$ o sulfuros de amonio $[(RNH_3)_2S]$ Las aminas se operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química. Sin embargo, el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química. Por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura hasta $48^\circ C$ (Fernández, 2004); las aminas han sido ampliamente estudiadas por muchos años para remover las impurezas del gas natural (Kohl & Nielsen, 1997), principalmente CO_2 y H_2S , demostrando buenos resultados para tal fin. También se han utilizado en los últimos años en la captura de CO_2 de los gases de combustión

eliminados en las plantas de generación de energía a partir de combustibles fósiles (Abu-Zara, Shcneiders, Niederer, Feron, & Versteeg, 2007; Nuchitprasittichai & Cremaschi, 2011).

Removiendo los gases no deseados del biogás permite obtener biometano, con una concentración de CH₄ superior al 95% con lo cual aumenta su poder calorífico (Noyola, Morgan, & López, 2006), el biometano es una fuente de energía alternativa popular hoy en día. La investigación mundial sobre tecnología de energía sostenible es impulsada principalmente para limitar el uso de combustibles fósiles (Christ, Gopinath, & Divya, 2014; Budiyo, Widiyasa, Johari, & Sunarso, 2010). Para enfrentar la amenaza de crisis energética global y contaminación ambiental asociado con las plantas de energía a base de combustibles fósiles, hay un creciente interés en encontrar fuentes alternativas de energía; basada en esta premisa se plantea la purificación mediante la mezcla de Monoetanolamina (MEA) y Ácido acético (ÁAC) con variaciones en concentraciones de 30:70, 50:50 y 70:30, con la finalidad de evaluar la eficiencia del tratamiento químico en la purificación del biogás para la obtención de Biometano, en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA, Ucayali.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Salazar (2012), el biogás, se origina por medio de los productos de la descomposición de materia orgánica y debido a la aplicación que se le pueda dar en distintas formas no logra ser eficiente, debido a su gran concentración de CO₂ y el sulfuro de hidrogeno (H₂S). Sin embargo, si este se purifica a través de un buen sistema, este puede tener múltiples usos y hasta lograr competir en el mercado con el gas natural.

La eficiencia del poder calorífico del biogás será proporcional de acuerdo a su concentración de CH₄; Harasimowicz et al (2007), recomienda que la concentración de CH₄ sea mayor al 90%.

Munarriz (2018), sostiene que para poder obtener esta concentración es necesario reducir los gases ácidos que contiene el biogás tales como el CO₂ a menos del 10% debido a que si su concentración es mayor esta genera una reducción en el poder calorífico que pueda tener; asimismo el H₂S debe ser menor a 100ppm, para que no pueda ocasionar corrosión en las partes metálicas internas del equipo que se utilice.

Treybal (1996), menciona que existen muchos métodos para la purificación del biogás, algunos de ellos pueden ser eficientes removiendo el H₂S, otros eliminando el CO₂, como también otros son fáciles de poder instalar ya que otros sistemas son grandes y por ende necesitan de una inversión económica fuerte.

De acuerdo a la información bibliográfica encontrada sobre la purificación del biogás, donde usan soluciones alcanolaminas y después de analizar los métodos que existen para la purificación del biogás, se opta por el uso de la Diglicolamina (DGA) para la eliminación del CO_2 y H_2S del biogás. La DGA es una amina cuya propiedad es eliminar en gran concentración algunos componentes presentes en el biogás tales como el CO_2 y H_2S , por tanto, debido a todo lo expuesto anteriormente la DGA se plantea como propuesta de investigación para la purificación del biogás.

1.1. Formulación del problema

1.1.1. Problema general

¿Cuál es la eficiencia del Aminometilpropanol en la purificación del biogás para la obtención de Biometano, en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA?

1.1.2. Problemas específicos

¿Qué concentración de CO_2 y H_2S es absorbida por el Aminometilpropanol en la purificación del biogás, para la obtención de Biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA?

¿Cuál es la concentración de CH_4 obtenido luego de haber aplicado el Aminometilpropanol en el biogás, para la obtención de Biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMALSA?

¿Cuál es el potencial energético del Biometano obtenido de la purificación del biogás, luego de haber aplicado el Aminometilpropanol en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMALSA?

1.2. Objetivos

1.2.1. General

- Evaluar la eficiencia del Aminometilpropanol en la purificación del biogás para la obtención de Biometano, en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA.

1.2.2. Específico

- Determinar la concentración de CO₂ y H₂S absorbida por el Aminometilpropanol en la purificación del biogás, obteniendo Biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA.
- Determinar la concentración de CH₄ obtenido luego de haber aplicado el Aminometilpropanol en el biogás, para la obtención de Biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMALSA
- Determinar el potencial energético del Biometano obtenido de la purificación del biogás, luego de haber aplicado el Aminometilpropanol en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMALSA.

1.3. Hipótesis

1.3.1. Hipótesis alterna (Ha)

El Aminometilpropanol es eficiente en la absorción de los gases CO₂ y H₂S para la obtención de Biometano, en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA.

1.3.2. Hipótesis nula (H0)

No es eficiente el Aminometilpropanol en la absorción de los gases CO₂ y H₂S para la obtención de Biometano, en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA.

1.4. Componentes estudiados

1.4.1. Variables independientes

[X₁] = Absorción de CO₂

[X₂] = Absorción de H₂S

1.4.2. Variables dependientes

[Y1] = Eficiencia del Aminometilpropanol

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Problema

2.1.1. A nivel internacional

Londoño & Villegas (2015), en su tesis “Evaluación del efecto de diferentes formulaciones de aminas sobre el desempeño de una planta de endulzamiento” desarrollado en Colombia; realizó mezclas de aminas, en el cual observó los beneficios de cada componente individual, los que priman sobre las debilidades de cada uno, obteniendo resultados muy favorables en situaciones donde, a primera vista, uno de sus componentes debiera ser descartado. Específicamente, las mezclas de dietanolamina (DEA) y metildietanolamina (MDEA) demostraron un desempeño superior al de una solución con composición másica del 35% de DEA, para un gas con alto contenido de CO₂ y sin H₂S; el cuál, a priori, no debería ser tratado con la amina terciaria, debido a la baja velocidad de reacción entre el H₂S y esta.

Morero (2014), con su tesis titulada “Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias”, realizado en Argentina; obtuvo resultados favorables con respecto al uso de la amina DGA; puesto que la concentración final de CH₄ fue del 97,092%, del CO₂ el 0,010% y el H₂S 1,86E-03ppm presente dentro del biogás purificado a una concentración del 50% de DGA.

Morero & Campanella (2013), en su artículo científico “Simulación del proceso de absorción química con soluciones de aminas para la purificación biogás” analizaron la influencia de los principales parámetros de operación y de distintos tipos de aminas en la purificación de biogás. Para ello simularon un proceso convencional de absorción-desorción usando cuatro tipos de aminas (MEA, DEA, DGA y MDEA) y dos mezclas de ellas. Las variables que analizaron fueron: concentración de CH₄, anhídrido carbónico, H₂S y agua en el gas purificado, el consumo de energía en el proceso, la temperatura de absorción y la tasa de vapor utilizada en el vaporizador. Estos indicadores obtuvieron buenos resultados en los niveles de purificación alcanzados, la DGA fue la amina con mayor nivel de concentración de CH₄ obtuvieron pues fue del 97,3% además presentó el menor gasto energético en el vaporizador.

Salazar (2012), en la realización de su proyecto tuvo como objetivo diseñar, construir y evaluar un filtro para biogás usando soluciones acuosas de alcanolaminas el cual es un método reversible; dicha investigación toma como referencia los resultados encontrados con respecto a la absorción de las alcanolaminas al término de la ejecución del proyecto MOPESA, proyecto que fue desarrollado por el CIMA, el cual viene investigando actualmente la capacidad de absorción de gases ácidos con miras a la publicación científica.

Morero, Croquer-Martinis, Gropelli, & Campanella (2011), en su artículo científico “Comparación de diferentes soluciones de aminas para

la purificación de biogás” concluyeron que los métodos de absorción fisicoquímicos para la purificación de biogás por lo general son métodos menos complicado, requiere poca infraestructura, son de relativamente bajo costo y las pérdidas de CH₄ son bajas (menores al 2%) debido a la gran diferencia en la solubilidad entre el CO₂ y el CH₄.

Aroonsri (2011), en su artículo científico “Optimization of CO₂ capture process with aqueous amines using response surface methodology” afirma que la adición de aminas primarias o secundarias a aminas terciarias mejora la absorción de CO₂ en la mezcla. Entre los disolventes de este estudio, trabajo a una concentración de 48% de DGA obteniendo un 96% de CO₂ retirado; el cual lo considera como el proceso de menor costo debido a su alta capacidad de absorción de CO₂ y bajo consumo de energía.

Lunsford & Bullin (1996), en su artículo científico “Optimization of Amine Sweetening Units” concluye que el aumento de la concentración de amina es ventajoso que la concentración para que no exceda los límites de corrosión. Además, el uso de mezclas de aminas DEA y MDEA es la mejor alternativa para el reducir la concentración de CO₂ basadas en sus análisis. Las aminas selectivas tales como DEA, DIPA y MDEA, de acuerdo a la temperatura de la amina pobre puede variar la absorción de concentración del CO₂ en el gas dulce.

2.1.2. A nivel nacional

Salazar (2012), en su proyecto de tesis titulada: "Evaluación de la eliminación de CO₂ y H₂S por endulzamiento de biogás usando soluciones acuosas de alcanolaminas" realizada en la ciudad de Tacna; evaluó la capacidad de absorción de las alcanolaminas MEA y DEA, en flujos de biogás y CO₂ puro; haciendo referencia que mediante el uso de métodos matemáticos se encontró que se requiere una concentración de MEA alrededor del 25% para eliminar 362 gCO₂/kgMEA y con la misma concentración se remueve 4 gH₂S/kgMEA en flujos de biogás. Así mismo, con 10% de DEA se puede absorber 3 gH₂S/kgDEA y 132 gCO₂/kgDEA del biogás.

Sánchez & Dávila A. (2009), utilizó un equipo Orsat para obtener resultados de los componentes del biogás encontrándose 65,0% de CH₄, 35,0% de CO₂ y 0,1% de H₂S, para la purificación del biogás utilizaron dos reactivos (hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio) siendo el ultimo el más eficiente pues el CO₂ fue eliminado en un 95% el cual permitió aumentar el valor energético del gas., y el sulfuro de hidrógeno fue eliminado al 100% disminuyendo así el efecto de corrosión sobre los metales.

2.1.3. A nivel local

Munarriz (2018), utilizó un insumo químico llamado MEA, como amina para la purificación del biogás, al cual se tuvo de referencia y acceso a la información obteniendo resultados de absorción eficiente través del

tratamiento realizado por concentración al 24% en dilución de la MEA, reduciendo hasta un 90% del CO₂ y el 93% del H₂S, llegando a reducir el H₂S a un 94% presente en el biogás; a una dilución de la MEA al 23,5%, el cual a través de este porcentaje se reduce el riesgo de corrosión en las partes metálicas de cualquier equipo que lo use como combustible.

2.2. Planteamiento Teórico del Problema

2.2.1. El biogás

Morero, (2009) afirma que el biogás es un combustible que puede ser obtenido a partir de diferentes fuentes orgánicas, dependiendo de su origen la composición varía considerablemente. Para poder elegir un método de purificación adecuado, es necesario conocer en detalle esta composición. Además, es importante conocer el uso final que se le dará para definir los niveles de remoción de impurezas que se desea alcanzar.

FAO (2011), sostiene que el biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de CH₄ y CO₂, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de CH₄ superior al 45% es inflamable.

2.2.2. Características generales del biogás

El biogás tiene propiedades específicas que se indican en la siguiente Tabla:

Tabla 1.*Características Generales del Biogás.*

Características	Proporciones
	55 – 70% CH ₄
Composición	30 – 45% CO ₂ Trazas de otros gases
Contenido energético	6,0 – 6,5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	de 0,60 – 0,65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	de 650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82,5°C
Densidad normal	1,2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16,043 kg kmol ⁻¹

Fuente: FAO, 2011

2.2.3. Diglicolamina (DGA)

Este solvente es, en muchos aspectos, similar a las MEA excepto por su baja presión de vapor. Esto permite que se pueda utilizar en mayores concentraciones (50 - 70%) disminuyendo su caudal de circulación y el consumo de vapor. Sin embargo, al igual que las soluciones con MEA, los problemas de corrosión limitan la carga de gas ácido a 0,35 mol de gas ácido por mol de amina. Una característica de esta amina es que tiene la preferencia de reaccionar con CO₂ antes que con H₂S (Varnero, Carú, Galleguillos, & Achondo, 2012).

Las DGA son particularmente útiles para purificar grandes volúmenes de gas a bajas presiones ya que puede operar a temperatura ambiente y puede producir gas endulzado a moderadas presiones. Una de las principales desventajas es el alto calor de reacción tanto para el CO₂ (850 BTU/lb) como para el H₂S (674 BTU/lb) (Morero & Campanella, 2013).

2.2.4. Eliminación del CO₂

2.2.4.1. Absorción física

2.2.4.1.1. Limpieza con agua

Los métodos de absorción fisicoquímicos se utilizan normalmente en la purificación de biogás ya que son métodos poco complejos, requieren poca infraestructura y son costo/efectivo. Un método fácil y económico utiliza agua presurizada como adsorbente en contra corriente. La base del proceso de limpieza con agua es aumentar la presión de limpieza del biogás crudo con el agua

presurizada. Esto remueve una significativa proporción de los contaminantes ácidos del gas incluyendo el CO_2 que puede ser liberado del agua de lavado en una torre de arrastre con vapor o aire. El agua regenerada resultante puede ser recirculada y utilizada muchas veces. La principal desventaja de la limpieza del agua es la gran potencia consumida asociada con el bombeo y el manejo de los flujos de recirculación. Sin tales flujos, el producto producido no tendría una concentración adecuadamente baja de CO_2 . Este proceso también remueve sulfuro de hidrógeno. Este es quizás el método más simple de limpieza de biogás (Morero, 2013).

2.2.4.1.2. Limpieza con solventes físicos

En los procesos de absorción físicos se utiliza un compuesto no reactivo que absorba físicamente los compuestos indeseados del biogás. El absorbente es luego regenerado con calor o con despresurización. El solvente más utilizado en estos procesos es el Dimetil eter de polietilenglycol (DEPG), comercialmente conocido como Genosorb 1753 (proceso Selexol) o Coastal Chemical AGR. Este solvente puede remover no solo CO_2 sino que también remueve H_2S y la humedad del gas. Un equipo de biogás ubicado en Laholm (Suecia) produce 2,4 millones de m^3 de CH_4 a partir de la codigestión de más de 70,000 tn de desechos anuales (excremento de animales, desechos de mataderos, desechos industriales, etc.). El biogás crudo que se genera en este equipo es

tratado en una planta con una capacidad de 500 m³/h mediante el proceso Selexol. El gas tratado en esta planta es posteriormente inyectado a la red. Otro caso similar en Texas (Estados Unidos) produce 5300 m³/h de biogás purificado a partir del biogás generado en el relleno sanitario. El biogás valorado tiene la capacidad de abastecer a más de 15,000 hogares en el área de Houston (Morero, 2009).

2.2.4.2. Absorción química

La absorción química implica la formación de enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. La regeneración del solvente comprende la ruptura de esos enlaces y la correspondiente entrada, relativamente alta, de energía. Los solventes químicos generalmente emplean soluciones acuosas de aminas (mono, diotrietanolamina) o soluciones acuosas de sales alcalinas (hidróxidos de sodio, potasio y calcio). La absorción de CO₂ en soluciones alcalinas es ayudada por agitación. La turbulencia en el líquido ayuda a la difusión de la molécula en el cuerpo del líquido y extiende el tiempo de contacto entre el líquido y el gas. Otro factor que gobierna la velocidad de absorción es la concentración en la solución. La velocidad de absorción es más rápida con NaOH a normalidades de 2,5 - 3,0. Las soluciones de hidróxido de sodio y potasio (NaOH y KOH) forman sales estables tales como carbonato de sodio (Na₂CO₃) y sulfuro de sodio (Na₂S). Sin embargo, esta no

es una buena opción cuando el biogás opera con altas concentraciones de H₂S o CO₂.

2.2.4.3. Adsorción en una superficie sólida

Los procesos de adsorción involucran la transferencia de soluto en la corriente de gas a una superficie de un material sólido, que se concentra principalmente como resultado de las fuerzas físicas de Van der Waals. Los adsorbentes comerciales son generalmente sólidos granulares con grandes áreas superficiales por unidad de volumen. A partir de una buena elección del adsorbente, el proceso puede remover CO₂, H₂S, humedad y otras impurezas selectivamente o simultáneamente desde el biogás. La purificación del biogás se puede llevar a cabo usando alguna forma de silicio, alúmina, carbón activado o silicatos, que son también conocidos como tamices moleculares. La adsorción normalmente se lleva a cabo a alta temperatura y presión. Tiene una buena capacidad para remover la humedad, tiene un diseño simple y es fácil de operar. Pero es un proceso costoso, con altas caídas de presión y altos requerimientos de calor.

Los procesos de balance de presión cuentan con la adsorción selectiva de CO₂ en la superficie de un adsorbente sólido poroso. La adsorción tiene lugar a elevadas presiones y la separación se da cuando la presión en el adsorbente es aliviada, este proceso se conoce con el nombre de Adsorción de balance de presión

(Pressureswingadsorption, PSA). Hay dos tipos de adsorbentes básicos que se han usado en la limpieza del biogás, el tamiz molecular y los lechos de carbón activado. El tamiz molecular es esencialmente un lecho empacado de material granular que tiene especiales propiedades de adsorción que varía dependiendo del tipo de gas. Los materiales granulares que puede ser usado son típicamente minerales de aluminio silicatos llamados zeolitas (Morero, 2013).

2.2.4.4. Separación por membrana

La base de este proceso es la permeabilidad selectiva de los gases a través de membranas poliméricas. Los polímetros de separación generalmente comprenden un número muy grande de fibras huecas colocadas en un recipiente a presión. 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. Cuando el biogás se coloca dentro del recipiente el CO_2 pasa mientras que el CH_4 es retenido. Esto da lugar a un gas rico en CH_4 y con una alta presión en el exterior de las fibras y a un gas enriquecido con CO_2 a baja presión en el interior de las fibras. Una sola unidad de separación no puede proporcionar una buena remoción de CO_2 y el gas de salida (CO_2 enriquecido) puede contener cerca de 12% v/v de CH_4 , mientras que el biogás purificado contiene alrededor de 88% v/v de

CH₄. Sin embargo, los procesos de separación multietapas pueden lograr 98% v/v de CH₄ aunque la presión necesaria para esta operación puede ser tan alta como 40 bar.

2.2.4.5. Separación criogénica

El método criogénico de separación implica la separación de la mezcla de gas por condensaciones fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas. El proceso tiene la ventaja de que permite la recuperación del componente puro en forma líquida. En este proceso el biogás crudo es comprimido a aproximadamente 80 bar. La compresión se realiza en múltiples etapas con enfriamiento. El gas comprimido se seca para evitar que se congele durante el proceso de enfriado. El biogás es enfriado por refrigeradores y un intercambiador de calor condensa el CO₂ que es removido en un separador. El CO₂ es además procesado para recuperar el CH₄ disuelto, que es reciclado a la entrada del gas. A partir de este proceso se obtiene más de 97% de CH₄. Los procesos criogénicos involucran el enfriamiento y la licuefacción del gas para producir la separación y purificación. Hay dos aproximaciones para la limpieza del gas usando etapas criogénicas: licuefacción de CH₄ o licuefacción de CO₂. En el caso de la limpieza del biogás, la técnica es más apropiada si se aplica a la licuefacción del CH₄ a partir de una corriente pretratada de la cual se ha removido el CO₂. El objetivo básico es remover el nitrógeno que cuando está presente

pasa directamente a otras técnicas de limpieza. Generalmente se emplean varias etapas de intercambio de calor en contra-corriente para enfriar la corriente de gas, antes del tratamiento, en una torre de rectificación de condensación parcial. La corriente de desecho contiene una mezcla de nitrógeno, principalmente, y una pequeña cantidad de CH₄ residual que se elimina a la atmósfera. La principal desventaja de este método es que es muy costoso y los requerimientos utilitarios son también altos (Morero, 2013).

2.2.4.6. Método de conversión química

Este método se utiliza cuando se quiere obtener una alta purificación en el gas producido. Esto reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas. Normalmente el método de conversión química se utiliza luego de una buena remoción que se logró con otros métodos. Uno de dichos procesos de conversión es el metanización, en que el CO₂ y el H₂ son convertidos catalíticamente en CH₄ y agua. El proceso de conversión química es muy caro y no se garantiza en muchas aplicaciones de biogás. Debido a la alta naturaleza exotérmica de las reacciones, la remoción del calor del equipo es la principal preocupación en el diseño del proceso. La gran cantidad de hidrógeno puro requerido también hace que este proceso sea generalmente inadecuado.

2.2.5. Eliminación del H₂S

2.2.5.1. Procesos de absorción

Este proceso se usa para el tratamiento de gases que contienen relativamente bajas concentraciones de H₂S. Este puede ser un proceso de absorción físico o un proceso de absorción químico. En los procesos de absorción físicos el H₂S puede ser absorbido por solventes, tales como el agua. Sin embargo, el consumo de agua es muy alto para la absorción de pequeñas cantidades de H₂S. Si se agregan al agua ciertos químicos, como el NaOH, se mejora el proceso de absorción. Sin embargo, en este proceso se forman sulfuro de sodio o hidrosulfuro de sodio, que no se regeneran y producen problemas de disposición (Huertas, 2010).

La absorción química del H₂S puede tener lugar con soluciones de sales de hierro tales como cloruro de hierro. Este método es muy efectivo en reducir altos niveles de H₂S. El proceso se basa en la formación de precipitados insolubles. El FeCl₃ puede ser agregado directamente al digestor y en digestores anaeróbicos pequeños este proceso es muy conveniente. Todos los otros procesos de remoción de H₂S son convenientes y económicamente viables para digestores de gran escala. Utilizando este método la remoción final del H₂S es de aproximadamente 10 ppm (Erdmann, y otros, 2012).

2.2.5.2. Adsorción en una superficie sólida

2.2.5.2.1. Óxido de hierro

La adsorción química se puede llevar a cabo utilizando pellets de óxido de hierro como adsorbente. El biogás pasa a través del óxido de hierro para remover el H_2S , el cual al reaccionar con éste forma sulfuro de hierro. Cuando los pellets se cubren completamente con sulfuro son regenerados. Este es un método simple aunque en la regeneración se libera mucho calor. Además, el método es sensible a biogás con altos contenidos de agua. Este tratamiento fue muy usado en el gas de coquería donde además se ha utilizado como material adsorbente las astillas de madera impregnadas con óxido férrico. Este tratamiento tiene una eficiencia de limpieza superior al 99,98%. Las utilidades tempranas de estos esquemas hicieron que los usos de rellenos de óxido de hierro reduzcan la concentración de sulfuro de hidrógeno. Los lechos de adsorción agotados pueden ser reactivados con una inyección de aire que convierte el sulfuro de hierro formado a óxido de hierro y sulfuro elemental, proporcionando un lapso de vida de 5 años para cada unidad (Erdmann, y otros, 2012).

2.2.5.2.2. Carbón activado

El carbón activado (CA) no impregnado que se utiliza para la eliminación de H_2S tiene capacidades de carga aproximadamente 0,02 g/g de CA. La marca comercial Darco H_2S tiene el mismo costo

que otras marcas de carbón activado no impregnado pero tiene 4-10 veces mayor capacidad de carga. Debido a su afinidad relativamente baja para remover H_2S , la utilización de CA para la eliminación de H_2S es limitada (Erdmann, y otros, 2012).

2.2.5.3. Proceso de oxidación seca

Este proceso se usa cuando el contenido de sulfuro del gas es relativamente bajo y se requiere una alta pureza. Este método consiste en introducir aire/hidrógeno dentro del sistema de biogás. De esta forma una pequeña cantidad de oxígeno es introducida en el sistema de biogás usando una bomba de aire. Como resultado, el sulfuro en el biogás es oxidado a azufre y de esta forma disminuye la concentración de H_2S . Este es un proceso simple y de bajo costo, no se necesitan químicos ni equipamientos especiales. Dependiendo de la temperatura, el tiempo de reacción y el lugar donde el aire se agrega, la concentración de H_2S se puede reducir en un 95% a menos de 50 ppm. Sin embargo, se debe tener cuidado en evitar sobredosis de aire, ya que el CH_4 en aire es explosivo en el rango de 6-12%, dependiendo del contenido de CH_4 (Erdmann, y otros, 2012).

2.2.5.4. Procesos de separación biológicos

Los procesos químicos para remover H_2S son caros debido a los altos requerimientos químicos y a los costos de energía y de disposición final. Por esta razón los métodos de tratamiento

biológico para remover el H_2S del biogás se han investigado como una alternativa a los tratamientos químicos. Estos métodos, utilizan la capacidad metabólica de algunos microorganismos que degradan sustancias contaminantes. El uso de microorganismos en la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, se basa en la oxidación microbológica de H_2S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental (S) o sulfatos (SO_4^{2-}), fijando CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro. Las bacterias seleccionadas en los procesos para convertir H_2S a S deben tener las siguientes características: capacidad fiable de convertir H_2S a S, mínima entrada de nutrientes, y fácil separación de S de la biomasa. Las bacterias fototróficas y quimiótroficas son microorganismos adecuados para la biooxidación de sulfuro de hidrógeno.

2.2.6. Resumen de las principales características de las tecnologías de purificación de biogás

En la siguiente tabla se resumen la complejidad y los costos de las diferentes tecnologías mencionadas, así como también la eficiencia lograda en cada caso. Los procesos de absorción físicos y químicos son los más simples, además de ser tecnologías maduras en la industria del gas natural. Por otra parte no son procesos costosos y pueden ser aplicados en diferentes escalas logrando altos niveles de remoción de CO_2 . Por ese

motivo, se los elige como procesos factibles de utilizar en la valoración del biogás. Por otra parte, los procesos biológicos han demostrado ser muy eficientes en la remoción del H₂S, además de ser procesos simples. (Morero, 2009)

Tabla 2.

Características de las tecnologías disponibles para purificar biogás.

Tipo	Concepto
Absorción Física	Alta eficiencia de purificación >98% v/v CH ₄ . Remueve CO ₂ y H ₂ S (aunque este último puede ser corrosivo para el equipo). Son tal vez los métodos más simples de limpieza de biogás.
Absorción Química	Principalmente se utiliza para remover CO ₂ , H ₂ S y vapor de agua. La eficiencia es alta aunque varía en función del compuesto químico utilizado.
Absorción en una Superficie Sólida	A partir de una buena elección del adsorbente, el proceso puede remover CO ₂ , H ₂ S, humedad y otras impurezas simultánea o selectivamente, con eficiencia superior al 98%. Desventaja: proceso costoso, con alta caída de presión y requerimiento de calor.

Separación membrana	por	<p>Para alta purificación de CH₄, la permeabilidad debe ser alta. Aunque los procesos de separación multietapas pueden lograr 98% v/v de CH₄, la presión necesaria es muy alta. Según el tipo de membrana se puede remover CO₂ y H₂S.</p>
Separación Criogénica		<p>Este proceso tiene la ventaja de que permite la recuperación de los componentes puros en forma líquida, que puede transportarse fácilmente. Aunque no presenta alta eficiencia en la remoción de CO₂. Y es un proceso muy costoso.</p>
Método de Conversión Química		<p>Reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas. El más conocido es la metanización (convierte CO₂ + H₂ en agua y CH₄), que tiene un alto requerimiento de H₂, volviendo el proceso inadecuado.</p>
Procesos de Oxidación Seca		<p>Solo presenta alta eficiencia en la eliminación de H₂S y en algunos casos de vapor de agua. Proceso peligroso, ya que el CH₄ en aire (> 6-12%) es explosivo.</p>

Separación Biológica

Es muy eficiente en la eliminación de H₂S, logrando niveles de remoción del 99%. Se solucionan los problemas de disposición final. Se reducen los requerimientos químicos y los costos de energía.

Fuente: Tesis "Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias", MORERO (2013).

2.3. Definición de Términos Básicos

Absorción. La absorción de gases es una operación en la cual una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido a fin de disolver de manera selectiva uno o dos componentes del gas y obtener una solución de estos en el líquido.

Desorción. Uno o más componentes de la corriente líquida se elimina al ser evaporados y pasar a una corriente insoluble de gas. También se conoce como arrastre o stripping.

Diglicolamina. La DGA es una amina primaria como la MEA en cuanto a la reactividad pero tiene mejor estabilidad y baja presión de vapor, esto permite el uso de concentraciones relativamente altas, entre 50–70% en peso.

Eficiencia. Es la relación que existe entre los recursos empleados en un proyecto y los resultados obtenidos con el mismo. Hace referencia sobre todo a la obtención de un mismo objetivo con el empleo del menor número posible de recursos o cuando se alcanzan más metas con el mismo número de recursos o menos.

Monoetanolamina (MEA). Es la más reactiva de las etanolaminas. Se utiliza preferencialmente en procesos no selectivos de remoción del CO₂ y del H₂S, aunque algunas impurezas tales como el COS, CS₂ y el oxígeno tienden a degradar la solución, por lo cual no se recomiendan en esos casos.

Purificación. Se refiere al proceso y las consecuencias de eliminar las imperfecciones o lo extraño de algo para que recupere su esencia.

Remoción. Se utiliza para hacer referencia a todo aquel acto que tenga ver con quitar algo de su lugar.

Solventes. El término solvente se refiere a sustancias orgánicas en estado líquido, utilizadas para disolver sólidos o gases u otros líquidos. La mayoría de ellos derivados del petróleo o sintéticos.

Solventes Químicos. Las soluciones acuosas de alcanolaminas son los solventes más utilizados para la remoción de gases ácidos, son mejores que los solventes físicos cuando se manejan presiones bajas.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Metodología de la investigación

El alcance de la investigación es experimental; donde se cuantificó la capacidad de absorción de la mezcla de MEA y ÁAC variando el grado de dilución acuosa; es decir, en concentraciones diferentes según tratamientos establecidos.

En la purificación del biogás, se estudió el proceso de absorción química y determinó el CO₂ y H₂S absorbido con la solución acuosa de la mezcla, se utilizó la “Metodología de la Superficie de Respuesta (RSM)” propuesto por la Dra. Betzabet Morero.

Este método consistió en que el biogás ingrese por la parte superior del matraz tipo balón con tres ingresos, hasta llegar a la solución de MEA y ÁAC como testigos a concentraciones de 30%, 50% y 70% y las mezclas de MEA + ÁAC en relación a 30:70, 50:50 y 70:30 que fluye en contra corriente desde la parte superior como salida del biogás purificado. Los gases CO₂ y H₂S reaccionan químicamente con la amina para formar una sal regenerable. El gas tratado (saturado en agua) sale por la parte superior del matraz tipo balón, durante el proceso de absorción se alcanzó temperaturas entre 45°C a 60°C (Morero, 2013).

3.2. Ubicación, población y muestra

3.2.1. Ubicación

El proyecto se desarrolló en las instalaciones de la Planta de Extracción de Aceite de Palma Industrias Oleaginosas Monte Alegre S.A. – INDOLMASA, ubicado en el distrito de Neshuya en la carretera Federico Basadre km 62, en la provincia de Padre Abad, región Ucayali, con Coordenadas Este y Norte.

3.2.2. Población

La población estuvo constituida por biogás, procedentes de un biodigestor de 10 metros cúbicos entre efluente y biogás que por la descomposición anaeróbico emiten 7 metros cúbicos de biogás diario, se cuenta con un gasómetro de almacenamiento de 2 metros cúbicos y de ello se procedió a la purificación del biogás producido de lodos procedentes del proceso de producción de aceite de palma, contenidos en gasómetros y ubicados en la Carretera Federico Basadre Km. 62, INDOLMASA, donde la empresa de investigación e innovación NEGASUS EIRL, tenía instalado una pequeña planta piloto de producción de biogás y energía eléctrica.

3.2.3. Muestra

Estuvo compuesta por 0,75m³ de biogás, procedentes de los 2m³ de los gasómetros.

3.3. Diseño de la investigación

Se realizó una investigación experimental del tipo experimentos puros, un diseño con posprueba únicamente y 2 grupo de control, en el cual la manipulación de la variable alcanza sólo dos niveles, en presencia (se han variado las proporciones de concentraciones de la mezcla de MEA y ÁAC y ausencia grupo de control o testigo (sin mezcla), los cuales fueron sometidos a 3 repeticiones en cada nivel; haciendo un total de 12 unidades experimentales considerado.

R ₁ G ₀	---	O ₁
R ₂ G ₀	---	O ₂
R ₃ G ₀	---	O ₃
R ₁ G _{0'}	---	O ₄
R ₂ G _{0'}	---	O ₅
R ₃ G _{0'}	---	O ₆
R ₁ G ₁	(MEA+ÁAC) _{30%}	O ₇
R ₂ G ₁	(MEA+ÁAC) _{30%}	O ₈
R ₃ G ₁	(MEA+ÁAC) _{30%}	O ₉
R ₁ G ₂	(MEA+ÁAC) _{50%}	O ₁₀
R ₂ G ₂	(MEA+ÁAC) _{50%}	O ₁₁
R ₃ G ₂	(MEA+ÁAC) _{50%}	O ₁₂
R ₁ G ₃	(MEA+ÁAC) _{70%}	O ₁₃
R ₂ G ₃	(MEA+ÁAC) _{70%}	O ₁₄
R ₃ G ₃	(MEA+ÁAC) _{70%}	O ₁₅

Este diseño muestra la interacción (MEA y +ÁAC) con los grupos experimentales (G₁, G₂ y G₃) con sus respectivas repeticiones (R), el testigo o grupo de control (G₀ y G_{0'}), así como los resultados que se obtuvieron (O₁, O₂, O₃, O₄, O₅, O₆, O₇, O₈, O₉, O₁₀, O₁₁, O₁₂, O₁₃, O₁₄ y O₁₅).

3.4. Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a análisis estadístico con el software SPSS 24, se realizó una prueba de T de Student para determinar cuáles fueron las concentraciones de MEA y AAC que más impurezas retienen analizando a un nivel de confianza del 95%, posterior las mezclas con diferentes concentraciones con Análisis de Varianza (ANOVA), ello se evaluó mediante gráficos de las medias.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.5.1. Técnicas

Se empleó la observación experimental y se elaboró un registro de datos en condiciones relativamente controladas a través de la ejecución del proyecto el cual estuvo sujeto a los datos de campo y de los análisis obtenidos de laboratorios.

3.5.2. Instrumentos

Se utilizaron fichas técnicas de observación (ver ANEXO) donde se registraron los datos obtenidos de los experimentos a través del tratamiento químico controladas en el tiempo (cada hora).

Materiales

- Tanque de fibra de vidrio traslado de gas
- Manómetros de 1/2" de plástico
- Accesorios eléctricos

- Probeta 60 * 10 diámetro con salida inferior base y Tapón con tres entradas.
- Burbujeador
- Vaso precipitado
- Matraz Erlenmeyer
- Balón de Gas 5 kg
- Recipiente resistente a temperaturas inferior a 70°C
- Recipiente resistente a temperaturas superior a 4°C

Equipos

- Cocina eléctrica
- Trasegador electrónico de gases
- Cronómetro digital
- Sensor de gases (H₂S, CO₂, CH₄) portátil
- Bomba de Gas
- Flujómetro de gases
- Termómetro Original con peachimetro
- Agitador magnético

Insumos

- Monoetanolamina
- Ácido Acético
- Biogás
- Agua destilada

3.6. Procedimiento de Recolección de Datos

3.6.1. Antes de la evaluación

Se realizó el diseño del sistema de tratamiento químico como también el del potencial energético; asimismo se dio inicio a la instalación de todos los equipos para proceder con el trabajo en campo.

3.6.1.1. *Adquisición de materiales, equipos, herramientas e insumos*

En esta primera etapa se adquirió los materiales, equipos, herramientas, insumos y otros componentes que ayudaron a alcanzar el cumplimiento y desarrollo del proyecto, esto con la finalidad de garantizar el funcionamiento óptimo del sistema de producción de biogás, su almacenamiento y tratamiento.

Figura 1.

Equipos, materiales e insumos para el tratamiento.



3.6.1.2. Selección y acondicionamiento del área de trabajo

Se seleccionó el área discriminando la acumulación de agua; ya que el proyecto de generación de biogás fue desarrollado en la Planta de INDOLMASA en un terreno con pendiente ligero. Esta área exclusivamente para realizar las corridas experimentales y almacenamiento del biogás.

Figura 2.

Área de trabajo en acondicionamiento para los tratamientos.



3.6.1.3. Diseño y adaptación del sistema de tratamiento

Se adaptó y realizó el mantenimiento del sistema hidráulico de captación de los efluentes de la poza de oxidación, mantenimiento al sistema de regulación de pH en el tanque, mantenimiento en el sistema de hidráulico de carga de sustrato a los biodigestores, mantenimiento del sistema de generación de biogás y al sistema de captación y almacenamiento de biogás.

Figura 3.

Reacondicionamiento de los sistemas hidráulicos y biodigestores.



Figura 4.

Sistema de generación de biogás en funcionamiento.

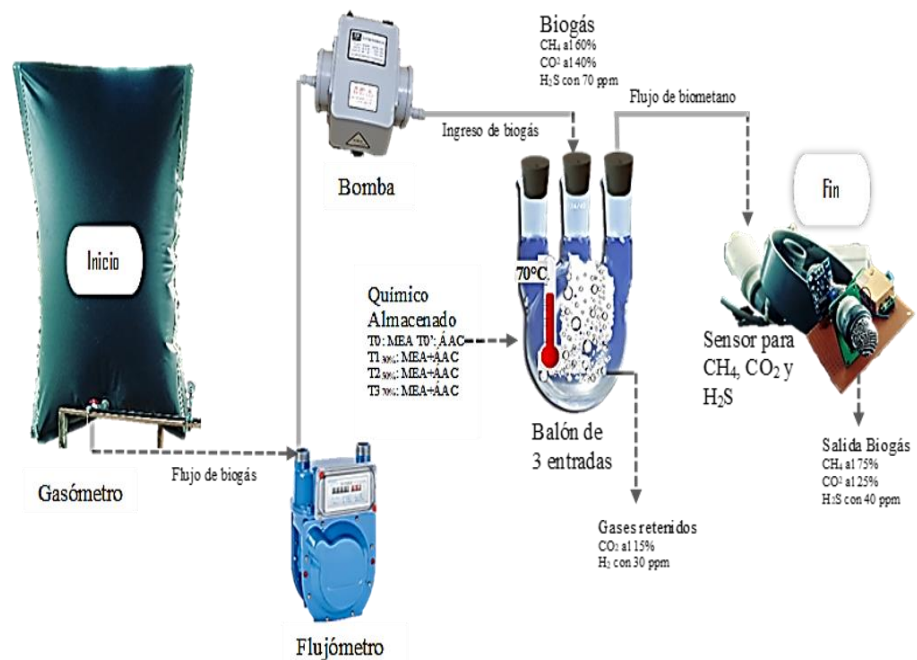


El sistema de tratamiento conectado al gasómetro con mangueras conectado al flujometro donde se midió el volumen tratado, este conectado a la bomba de succión de biogás que direccionaba el biogás al balón de 3 bocas, donde la boca del

centro es la de ingreso del biogás y una boca de menor diámetro es la salida de biogás purificado y por último al almacenamiento donde se encontraba los sensores de CO₂, CH₄ y H₂S.

Figura 5.

Sistema de purificación de biogás con mezclas de MEA y ÁAC.



3.6.2. Durante la evaluación

Se observó el adsorbente químico con los testigos MEA, ÁAC y mezclas (MEA + ÁAC) en el balón de tres (03) bocas (reactor) que contenía la solución acuosa con diferentes concentraciones: 30%, 50%, 70%, para proceder a describir el comportamiento del adsorbente en el proceso de absorción de CO₂ y H₂S en flujos de biogás en cuanto a la coloración y densidad de la solución.

Se relacionó la composición porcentual de gases en el biogás, versus el tiempo que se adsorbe el CO_2 y H_2S , hasta llegar a un punto de saturación, lo cual se alcanzaba cuando se incrementada el flujo de biogás. Lo mismo se efectuó para el H_2S en partes por millón.

El método consistió en hacer burbujear el biogás, este método del efecto del burbujeo es adaptado de las columnas de burbujeo, reactores donde un gas entra en contacto con un líquido para la síntesis de productos químicos; el rendimiento depende de la disponibilidad local de especies (Kmoun, Chen, Gupta, Al-Dahhan, & Dudukovic, 2001) (Darmana, Henket, Deen, & Kuipers, 2007). A través de un recipiente cerrado de vidrio el cual contiene 500 ml de la solución acuosa de MEA como testigo 1, AAC como testigo 2, mezcla MEA+AAC al 30% como T_1 , MEA+AAC al 50% como T_2 y MEA+AAC al 70% como T_3 , con el fin de que exista una interacción completa entre el flujo del biogás y el tratamiento, la línea de gas entrante es insuflada en la solución y con un burbujeador se garantiza el contacto e interacción necesaria para el tratamiento. Se realizó la absorción química y el gas sale purificado por la parte superior del recipiente, debido a que durante este proceso el recipiente estará a un rango de temperatura de 40 a 60°C, con la finalidad de que la mezcla de MEA + AAC pueda actuar con mayor facilidad ante el ingreso del biogás. También se implementó una estufa eléctrica para mantener la temperatura, sin embargo, no era necesario.

3.6.2.1. Preparación del agente (químico testigos) purificador

La preparación de los testigos, ÁAC y MEA, se tuvo que variar las concentraciones de ambos testigos en proporciones basados a la literatura con el que se obtendrían mejores resultados, se preparó ÁAC al 30%, 50% y 70% diluido en agua destilada, de igual manera para la MEA al 30%, 50% y 70% diluido en agua destilada, cada unidad experimental con 3 repeticiones, esto permitió obtener promedios y mediante un análisis de T de Studen refutar cuáles son las concentraciones que mejor depuraron el biogás; la corrida de biogás fue con un volumen de 100L para cada repetición.

Figura 6.

Dilución de la MEA.



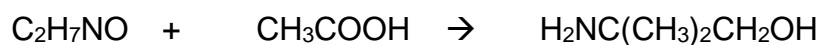
Figura 7.

Dilución del ÁAC



3.6.2.2. Preparación del agente (mezcla de testigos) purificador

El flujo de biogás fue de 100L para cada repetición, la mezcla estuvo basada en las concentraciones iguales al del testigo, el primer tratamiento se combinó 150 ml de MEA + 350 ml de ÁAC, el segundo tratamiento se combinó 250 ml de MEA + 250 ml de ÁAC y el tercer tratamiento se combinó 350 ml de MEA + 150 ml de ÁAC; de tal manera que todas las reacciones estuvieron en función a la MEA, en la siguiente ecuación se muestra la reacción obtenida:



La reacción resultante del reactante MEA y ÁAC nos origina un Aminometilpropanol (AMP).

Figura 8.

MEA al 30%



Figura 9.

ÁAC al 70%.



Figura 10.

Tratamiento 1 (MEA al 30%+ÁAC al 70%), con relación 30:70



3.6.2.3. Toma de muestra y medición de parámetros CO_2 y H_2S

Para esta actividad se adquirió sensores de CH_4 (MQ-4) de 10 a 10000 ppm, de CO_2 (MHZ-16 NDIR) de 400 a 10000 ppm y para H_2S (MQ-135) de 10 a 1000 ppm, que fueron codificados mediante el sistema arduino, que nos permitió la toma de datos en tiempo real, los sensores acondicionados en un tubo de PVC de 4" con tapas sanitarias de 4" donde se acumula el biogás para que los sensores efectúen la medida correcta.

Figura 11.

Componentes de medición de CH₄, CO₂ y H₂S



3.6.3. Después de la evaluación

Se realizó un análisis de los datos adquiridos en el proceso de experimentación, así como también una comparación con los resultados de otros autores que desarrollaron un tratamiento similar para la purificación del biogás. Los datos recolectados de todos los tratamientos realizados se revisaron y procesaron en una tabla Excel para organizar por repetición y tratamiento por cada gas analizado en la composición del biogás.

3.6.3.1. Procesamiento de datos recolectados en campo

Se organizaron los datos recolectados en campo por tratamiento y repetición de tal manera que permitió su

procesamiento de promedios, figuras de la comparación entre testigos y tratamientos o mezclas.

Figura 12.

Toma de datos de Campo



Figura 13.

Lectura de CH₄, CO₂ y H₂S



Figura 14.

Sensores de medición de gas CH₄, CO₂ y H₂S



3.6.3.2. Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico para los testigos una prueba de T de Student y para los tratamientos de las mezclas un análisis de varianza – ANOVA y posteriormente una prueba de Tukey a un nivel de confianza del 95% con el software SPSS 25.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Concentración de CO₂ y H₂S obtenido del tratamiento químico en la obtención de biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA

4.1.1. Concentración de CO₂ y H₂S con MEA y AAC (testigos)

Tabla 3.

Concentración inicial y final de CO₂ y H₂S

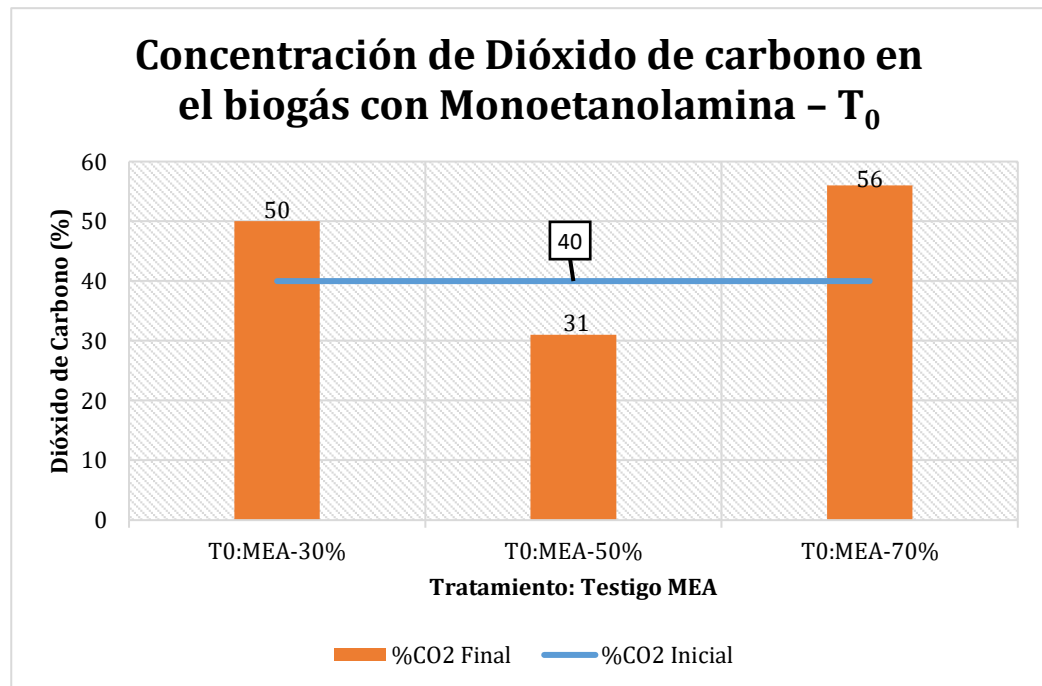
GAS	%CO ₂ Inicial	%CO ₂ Final	H ₂ S Inicial	H ₂ S Final
T ₀ :MEA-30%	40	50	70	56
T ₀ :MEA-50%	40	31	70	47
T ₀ :MEA-70%	40	56	70	51

De acuerdo a los datos obtenidos se puede apreciar que con nuestro testigo MEA trabajado a una concentración del 50%, el CO₂ ha bajado de 40 a 31% y H₂S de 70 a 47ppm, a diferencia de Munarriz (2018) quien en su investigación realizada trabajando a una concentración del 23,5% de MEA, obtuvo el 90% de CO₂ y reduciendo el H₂S de hasta el 94% y Salazar (2012) quien indica que para eliminar la cantidad de 312g de CO₂ y 4g de H₂S necesitaría una concentración del 25% de MEA; el resultado es variable de acuerdo a el método empleado para la purificación.

Testigo MEA

Figura 15.

Concentración de CO₂ en el biogás obtenido del testigo MEA

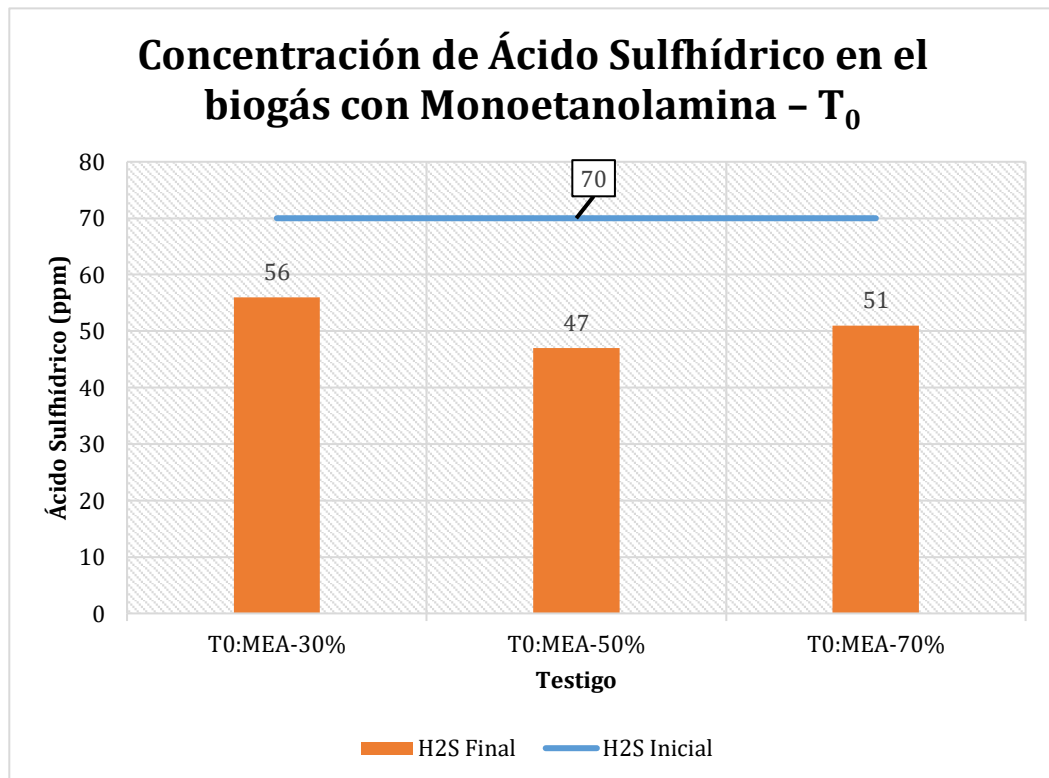


Como se aprecia en la Figura 15, se muestra que el testigo MEA (T₀) a una dilución del 30%, presentó una concentración del 50% de CO₂ generando un incremento del 10% respecto al valor inicial; mientras que el T₀ al 50% de MEA, muestra una concentración de 31% de CO₂, presentando una remoción del 9% de valor inicial y el T₀ con 70% de MEA generó 56% de concentración de CO₂, incrementando un 16% del valor inicial; Morero & Campanella (2013), reporta que obtuvo 0,05% de dióxido de carbono (CO₂) con una Monoetanolamina al 20%, lo que no pasó con nuestro testigo de Monoetanolamina al 30% que es lo más cercano al

reportado, estando en el mismo rango de temperatura trabajado 43,3°C a 65,5°C.

Figura 16.

Concentración de H₂S en el biogás obtenido del testigo MEA.



En la Figura 16, se puede observar que de acuerdo a la cantidad inicial de H₂S (70ppm), se redujo en 23ppm trabajado la MEA al 50%, seguido por la depuración en 14 ppm y 19 ppm para el testigo MEA trabajado a un 30% y 70% respectivamente.

La concentración del H₂S fue de 56 ppm para el 30% de MEA, 47 ppm y 51 ppm para el 50% y 70% de MEA respectivamente, la menor concentración de MEA al 30% debió responder con el mejor resultado de

absorción de H₂S como reportó Morero & Campanella (2013), que redujeron hasta 0,28 ppm el H₂S con MEA al 20% a 65,5°C.

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0,000 entre la varianza de las medias del CO₂ y H₂S, obtenido al 30%, 50% y 70% de concentración de MEA.

La prueba de Tukey HSD muestra que la menor concentración de CO₂ fue obtenida con la MEA al 50%, seguido por la concentración 30% y 70% de MEA, sin embargo, para el H₂S la mejor depuración se encuentra con 50% de concentración de MEA.

Testigo AAC

Tabla 4.

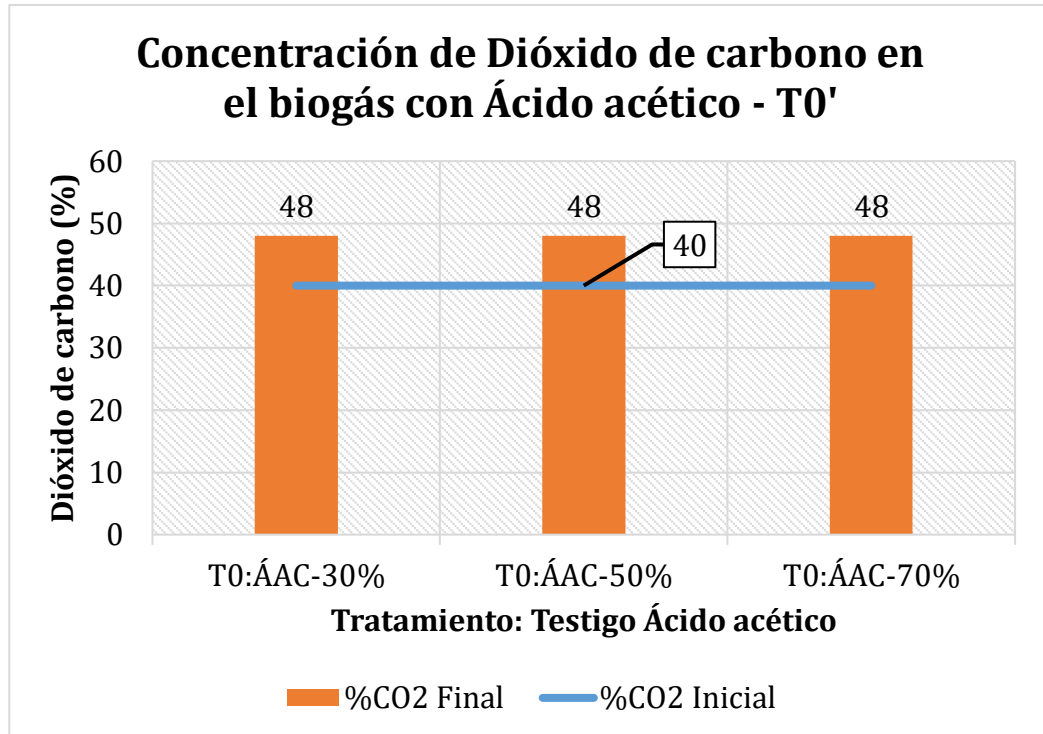
Concentración de CO₂ y H₂S en el testigo AAC.

GAS	%CO ₂ Inicial	%CO ₂ Final	H ₂ S Inicial	H ₂ S Final
T ₀ :AAC-30%	40	48	70	55
T ₀ :AAC-50%	40	45	70	55
T ₀ :AAC-70%	40	44	70	55

De acuerdo a los datos obtenidos a diluciones del 30%, 50% y 70% de AAC el CO₂ se incrementó en 8%, 5% y 4% respectivamente del CO₂ inicial (40%) y el H₂S redujo en 15ppm del H₂S inicial (70ppm) trabajada en las 3 concentraciones (30%, 50% y 70%) donde no se mostró ninguna diferencia.

Figura 17.

Concentración de CO₂ en el biogás obtenido del testigo ÁAC.

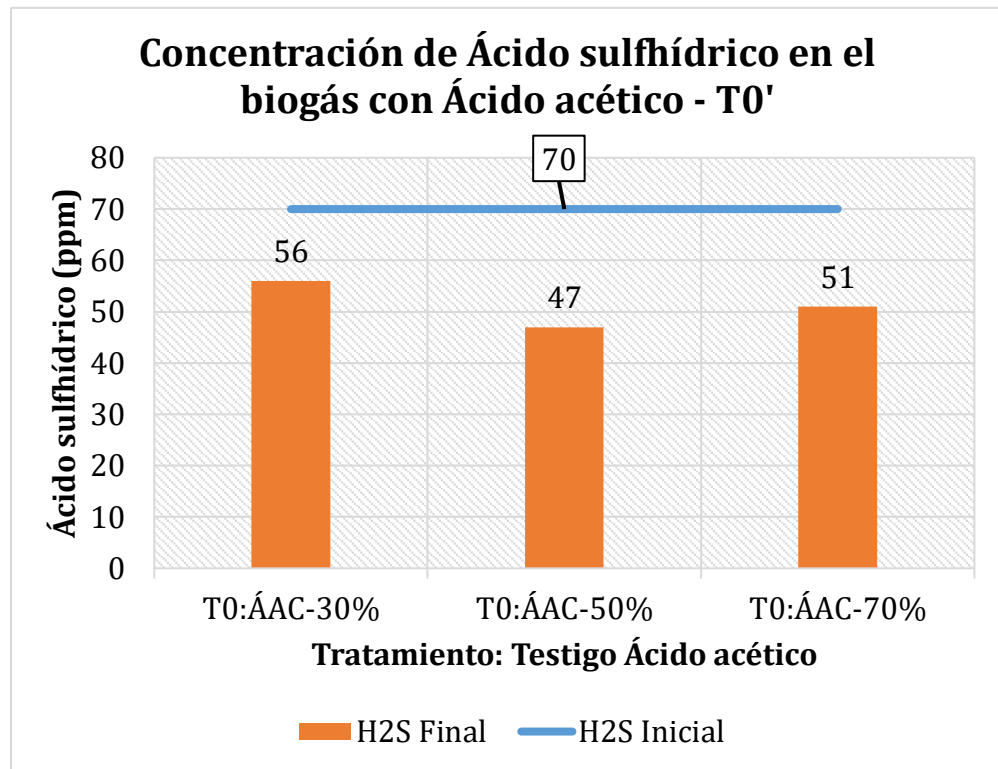


El tratamiento testigo ÁAC (T₀') con una concentración del 30% de ÁAC manifestó una concentración del 48% de CO₂ con un incremento de 8%, el tratamiento T₀' con 50% de ÁAC presentó una concentración de 45% CO₂ con un incremento del 5% y el tratamiento T₀' con 70% de ÁAC, manifestó concentración de 44% de CO₂ con 4% de incremento, asumiendo que la depuración del CO₂ y H₂S está en función a moles de amina (NH₂) y que sería necesario la utilización de otros compuestos químicos; por ello es necesario recalcar que el objetivo de obtener biogás es que presente CH₄ con mayor concentración y para ello debe eliminarse

el CO₂, dado que la solubilidad del CO₂ en agua depende de la presión, la temperatura y del pH, (Carrillo, 2019).

Figura 18.

Concentración de H₂S en el biogás obtenido del testigo ÁAC.



La Figura18 muestra la dilución del ÁAC al 30%, 50% y 70% fue de 55 ppm de H₂S, lo cual representa una depuración de 15 ppm, no existiendo variación entre la depuración de H₂S y la concentración de ÁAC.

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que no existe diferencia significativa de 0,000 entre la varianza de las medias del CO₂ y el H₂S, obtenido al 30%, 50% y 70% de concentración de ÁAC.

Las respuestas más prometedoras se han registrado con el tratamiento T₀ con 50% de MEA y el tratamiento T₀ con 70% de AAC, obteniendo 31% y 44% de concentración de CO₂ respectivamente; trabajo similar desarrollaron Morero y Campanella (2013) y mezclando MDEA al 35% con MEA al 15% obtuvieron una concentración de 0,025% de CO₂ mejorando su capacidad de absorción; asimismo, Morero (2014), mezcló MDEA al 35% con MEA al 15% para mejorar sus propiedades de absorción, llegando a una concentración final de 0,011% de CO₂; sin embargo, establece que esta disminución en CO₂ no es suficiente para alcanzar mayores niveles de valoración, ya que existe relación inversa entre el incremento de temperatura y la disminución de CH₄, afirmación que respalda Fernández (2004), respecto a que las aminas operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química; sin embargo, el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química. En México, Teniza *et al.* (2015) trabajando con estiércol de cabra y vísceras de conejo al 10%, produjeron biogás con 71% de CH₄ ajustando el pH a 7,2 y temperatura de 37°C, reforzando la afirmación anterior en el sentido de que la temperatura es el parámetro con mayor efecto sobre la producción de CH₄.

Por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura hasta 48°C, ayudando a la disminución del CO₂ en el biogás, siendo importante la concentración y mantenimiento de la temperatura constante durante la absorción de tal manera que no se interrumpa la reacción. Existen muchos

aspectos a tener en cuenta a la hora de optimizar una unidad de endulzamiento con aminas, debe seleccionarse adecuadamente la amina a utilizar además de tener en cuenta otros factores por ejemplo, la concentración de las aminas, el uso de mezclas de aminas y la temperatura de la solución que ingresa al absorbedor, según manifestaron Lunsford y Bullin (1996); las aminas operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química, sin embargo el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química, por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura hasta 48 °C (Fernández, 2004); mientras que en México, la producción de CH₄ con excretas de cerdo y cabra dio mejores resultados con temperatura de 37°C y pH ligeramente ácido, (García et al., 2014).

4.1.2. Concentración de CO₂ y H₂S con MEA + AAC (mezclas)

Tabla 5.

Concentración de CO₂ y H₂S en el biogás obtenido de los tratamientos (mezcla al 30%, 50% y 70%) y testigo de MEA y AAC.

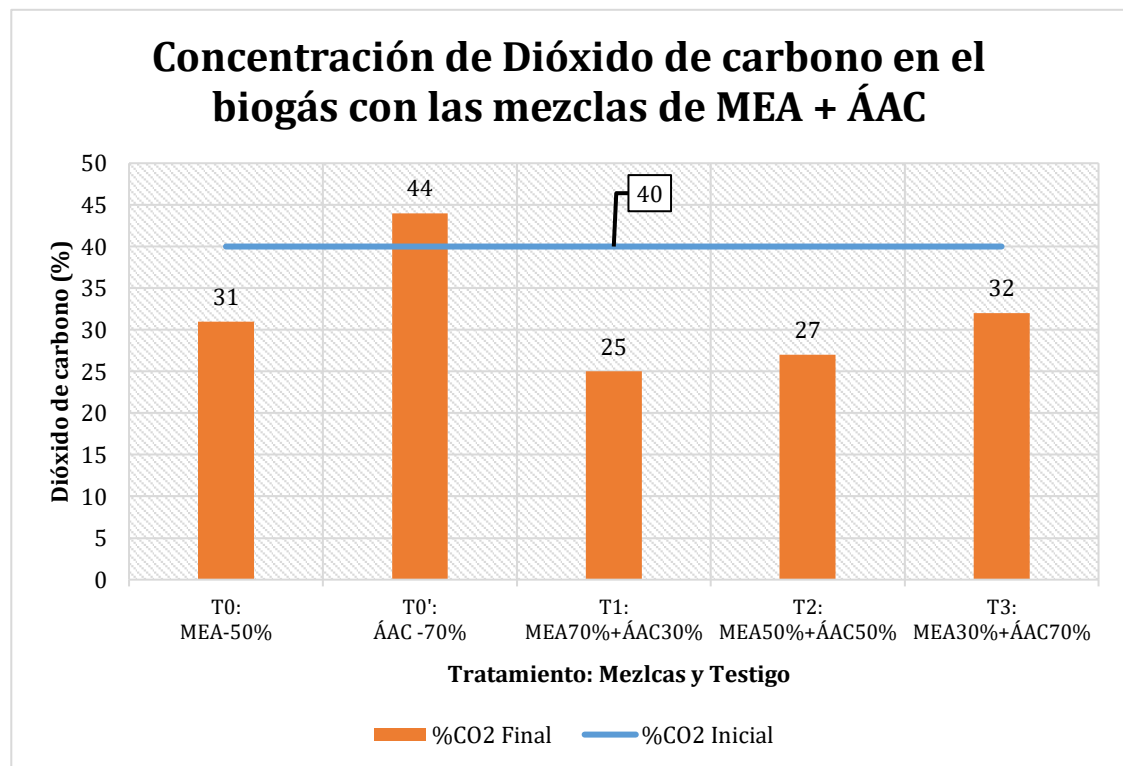
GAS	%CO ₂ Inicial	%CO ₂ Final	H ₂ S Inicial	H ₂ S Final
T ₀ : MEA-50%	40	31	70	47
T ₀ : AAC -70%	40	44	70	55
T ₁ : MEA70%+AAC30%	40	25	70	40
T ₂ : MEA50%+AAC50%	40	27	70	47
T ₃ : MEA30%+AAC70%	40	32	70	34

De acuerdo a los datos obtenidos de los mejores Testigos T₀ (MEA al 50%), T₀ (AAC al 70%) y en tres tratamientos: T₁ (mezcla al 70% de

MEA+30% de AAC), T₂ (mezcla al 50% de MEA+50% de AAC) Y T₃ (mezcla al 70% MEA+30% AAC) el CO₂ se redujo en 9% para el T₀, se vio un incremento de 4% para el T_{0'} y una reducción de 15%, 13% y 8% para el T₁, T₂ y T₃ respectivamente del CO₂ inicial (40%) y el H₂S se redujo para el T₀, T_{0'}, T₁, T₂ y T₃ en 23ppm, 15ppm, 30ppm, 23ppm y 36ppm respectivamente del H₂S inicial (70ppm).

Figura 19.

Concentración de CO₂ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla de MEA y AAC)



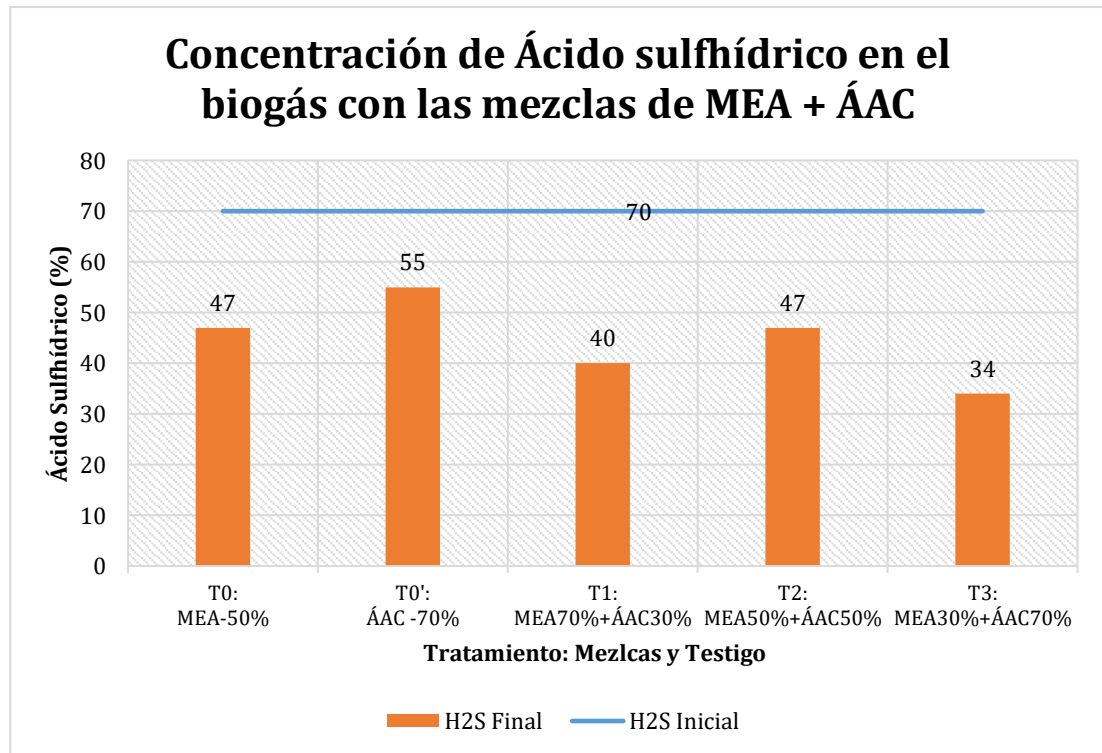
En la Figura 19, se puede observar que el T₁ mostró 25% con una remoción de 15% de CO₂, el T₂ reportó una concentración por 27% de CO₂ con una depuración del 13%, el T₃ manifestó un 32% de CO₂ con una

remoción de 8%, por último, los testigos que mostraron mejor resultado, el T₀ con 50% de MEA, se obtuvo concentraciones de 31% de CO₂ con una depuración de 9%, y el T₀ con 70% de AAC reportó una concentración de 44% CO₂, mostrando incremento de 4% respecto a su valor inicial. Morero & Campanella (2013), encontraron que la mezcla de MDEA al 35% con MEA al 15% lograron una concentración de 0,025% de CO₂ mejorando su capacidad de absorción; (Morero, 2014), afirma haber mezclado MDEA al 35% con MEA al 15% para mejorar sus propiedades de absorción, llegando a una concentración final de 0,011% de CO₂, sin embargo (Morero, 2014), establece que la disminución de CO₂ no es suficiente para alcanzar mayores niveles de valoración, ya que existe relación inversa entre el incremento de temperatura y la disminución de CH₄, afirmación respaldada por (Fernández, 2004), respecto a que las aminas se operan en procesos caliente debido a que el calor favorece la reacción química. Sin embargo, el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química; por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura hasta 48°C, ayudando a disminución del CO₂ en el biogás, siendo muy importante la concentración y mantener la temperatura constante durante la absorción de tal manera que no se interrumpa la reacción, como recomienda Lunsford & Bullin (1996), citado por Morero, Croquer, Gropelli, & Campanella (2011), existen muchos aspectos a tener en cuenta a la hora de optimizar una unidad de endulzamiento con aminas. No solo es importante seleccionar adecuadamente la amina a utilizar, sino que además se deben tener en cuenta otros factores por

ejemplo, la concentración de las aminas, el uso de mezclas de aminas y la temperatura de la solución que ingresa al absorbedor; la optimización energética es un punto importante, esto también está en maximizar la potencia de cada unidad de volumen circulado y al mismo tiempo realizando mezclas que mejoren la capacidad de absorción como la adición de aminas primarias o secundarias a las terciarias con la finalidad de absorber mayor CO_2 (Jenkins & Haw, 2002; Nuchitprasittichai & Cremaschi, 2011).

Figura 20.

Concentración de H_2S en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla de MEA y AAC)



La Figura 20, se puede observar que la mayor depuración de H₂S que se alcanzó fue de 36 ppm menos de la cantidad inicial (70 ppm) de H₂S presente en el biometano, con el T₃, seguido del T₁ con 30 ppm menos, por consiguiente, el T₂ con 23 ppm menos y por último el T₀ y T_{0'} con 23 ppm y 15 ppm menos.

Se registró 40 ppm de H₂S con el T₁, 47 ppm de H₂S para el T₂, 34 ppm H₂S para el T₃; 47 ppm y 55 ppm para el T₀ y T_{0'} respectivamente, lo cual de acuerdo a los resultados obtenidos se puede confirmar que la mezcla al 70% reportó la mejor depuración de H₂S; sin embargo mejores resultados se obtuvieron por Morero & Campanella (2013) con un valor de 0,078 ppm de H₂S es un gas extremadamente tóxico e irritante produce inconsciencia en los seres humanos, conjuntivitis dolor de cabeza, deficiencia respiratoria, alteraciones en electrocardiograma, en el sistema nervioso central. Es el compuesto que le da el olor característico al huevo podrido a estos gases, no tiene color, es inflamable y extremadamente peligroso (Viquez, 2010), esto provoca corrosión en el motor o sistema de tuberías formando sulfuros metálicos a través de reacciones químicas con partes mecánicas, la eliminación de gases contaminados del biogás crudo es necesario no solo para aumentar su valor calórico, pero también para usar el gas de manera segura Holm, Seadi, & Oleskowicz (2009), citado por (Rashed, Torii, Rahman, & Razaul, 2019); en el trabajo por reportado por Morero & Campanella (2013), en la mezcla de MDEA al 35% y MEA al 15%; demostrando que existió una mejora considerable respecto a la

absorción de azufre que puede ser utilizado en motores de combustión interna evitando una corrosión acelerada en las piezas metálicas como respalda Gosh (2007), el mecanismo de corrosión de azufre se inicia en presencia de una concentración de H_2S superior a 50 ppm; reduciendo la vida útil del motor en un 10 a 15% (Horikawa, y otros, 2004), Sin embargo, al realizar la mezcla de la MEA y el AAC se incrementa los enlaces de carbono e hidrógeno formando como producto $H_2NC(CH_3)_2CH_2OH$ (Aminometilpropanol) que muestra mejora en la absorción de H_2S , al respecto Jenkins & Haw (2002), cada mol de H_2S reacciona con un mol de amina (NH_2), por lo que la capacidad real de extracción de gas ácido de cada amina está relacionada con el número de moles de amina que se encuentran por unidad de volumen de circulación de la solución.

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0,000 y 0,001 a un nivel del 95% de confianza, entre la varianza de las medias de la concentración de CO_2 y H_2S respectivamente, obtenido para los tratamientos (mezclas al 30%, 50% y 70%) y testigos (MEA al 50% y AAC al 70%).

La prueba de Tukey HSD muestra que la menor concentración de CO_2 fue obtenida para el T_1 , seguido del T_2 , T_3 , T_0 y T_0' ; se muestra la mejor depuración con el T_3 , seguido del T_1 , el T_0 , T_2 y el T_0' .

4.2. Concentración de CH₄ obtenido del tratamiento químico en la obtención de biometano en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMASA

4.2.1. Concentración de CH₄ con MEA y AAC (testigos)

Testigo MEA

Tabla 6.

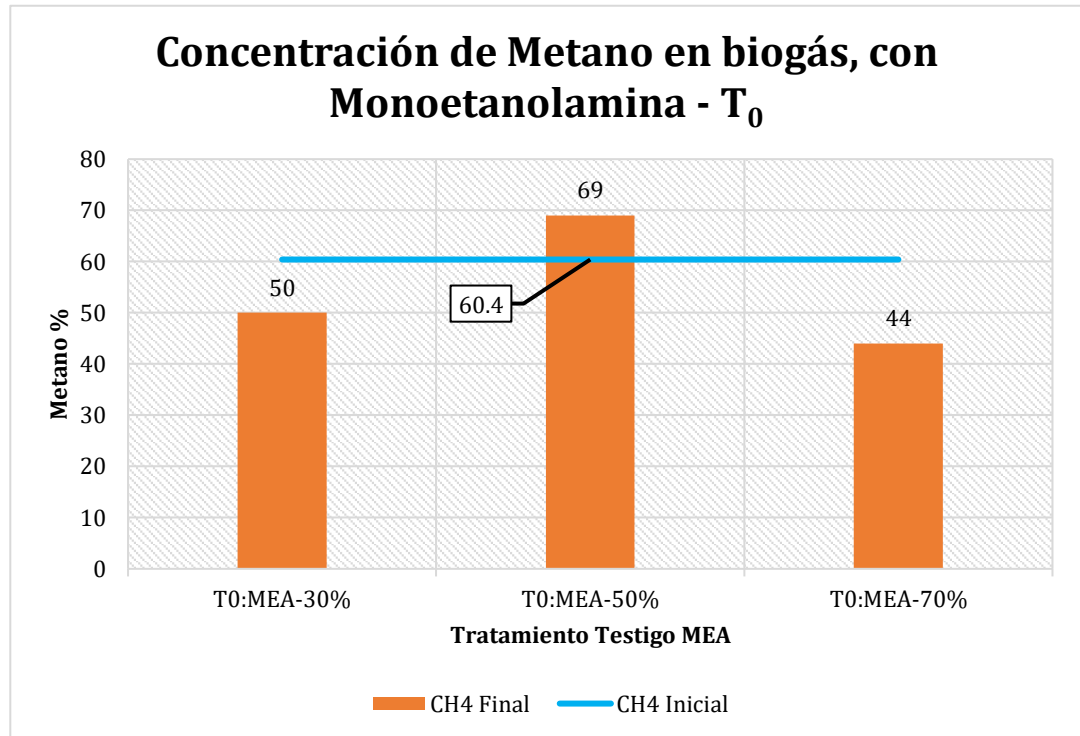
Concentración de CH₄ en el testigo MEA

GAS	%CH ₄ Inicial	%CH ₄ Final
T ₀ :MEA-30%	60,4	50
T ₀ :MEA-50%	60,4	69
T ₀ :MEA-70%	60,4	44

La dilución de la MEA al 30%, redujo la concentración de CH₄ presente en el biometano en un 10,4%, a una dilución de la MEA al 50% se incrementó en 8,6% y a una dilución de MEA al 70% generó una pérdida de 16,4% de la concentración inicial de CH₄.

Figura 21.

Concentración de CH₄ en el biogás obtenido en el testigo MEA



La Figura 21 muestra que el T₀ con 30% de MEA generó una concentración de 50% con reducción del 10,4% de CH₄, el T₀ con 50% de MEA presentó una concentración de 69% con un aumento de 8,6% de CH₄ y al T₀ con 70% de MEA generó 44% de concentración de CH₄ con una pérdida de 16,4% todos estos valores en relación al valor inicial del CH₄ (60,4).

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0,000 entre la varianza de las medias de CH₄, obtenido al 30%, 50% y 70% de concentración de MEA.

La prueba de Tukey HSD muestra que la mayor concentración de CH₄ fue obtenida con MEA-50%, seguido por la concentración de MEA al 30% y 70%.

Testigo ÁAC

Tabla 7.

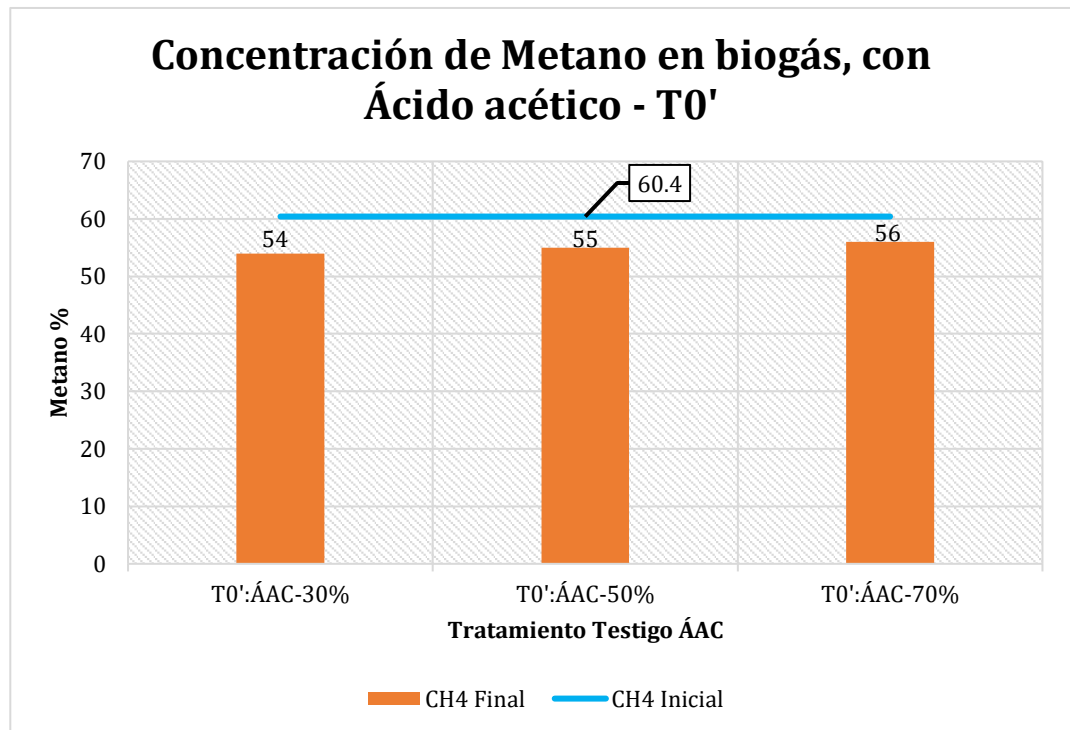
Concentración de CH₄ en el testigo ÁAC.

GAS	%CH ₄ Final	%CH ₄ Inicial
T ₀ :ÁAC-30%	54	60,4
T ₀ :ÁAC-50%	55	60,4
T ₀ :ÁAC-70%	56	60,4

La dilución del ÁAC al 30%, generó una concentración de CH₄ de 54%, el ÁAC-50% generó una concentración de 55% de CH₄ y el ÁAC-70% una concentración de 56% de CH₄.

Figura 22.

Concentración de CH_4 en el biogás obtenido del testigo ÁAC al 30%, 50% y 70%.



La Figura 22 muestra que el T₀ con 30% de ÁAC, generó una concentración de 54% de CH₄ con una reducción de 6,4%, el T₀ con 50% de ÁAC generó 55% de CH₄ reduciendo 5,4% y el T₀ con 70% de ÁAC generó una concentración de 56% de CH₄ con una reducción de 4,4%; todos los valores en relación al CH₄ inicial presente en el biometano.

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que no existe diferencia significativa de 0,000 entre la varianza de las medias del CH₄, obtenido al 30%, 50% y 70% de concentración de ÁAC.

4.2.2. Concentración de CH₄ con MEA + ÁAC (mezclas)

Tabla 8.

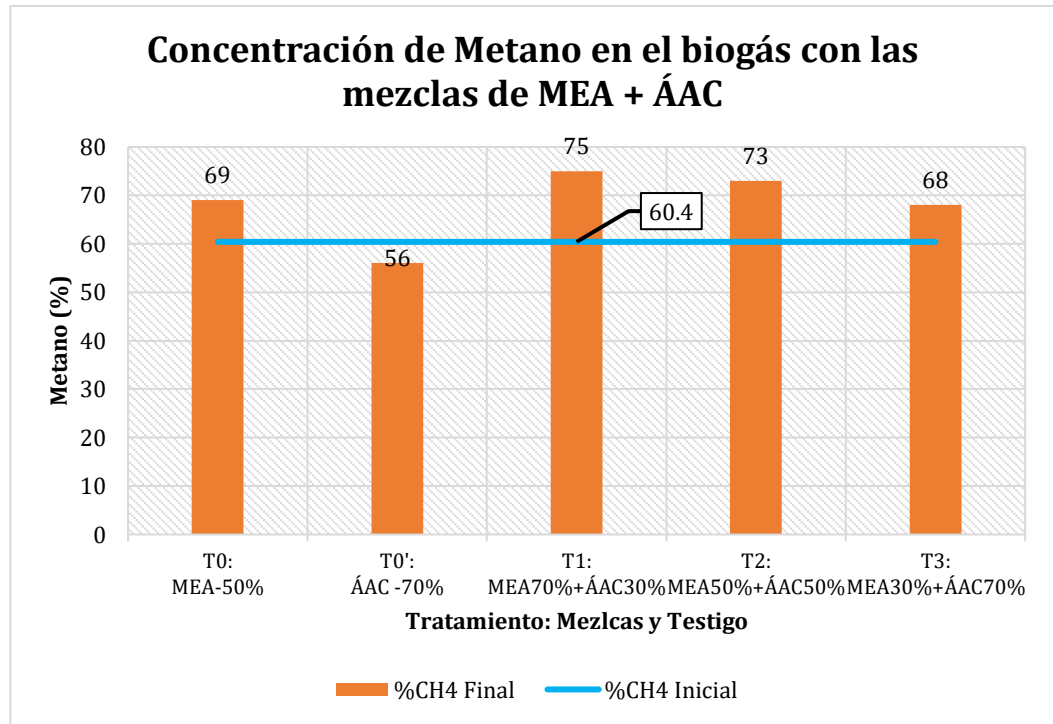
Concentración de CH₄ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla al 30%, 50% y 70%) y testigos de MEA y ÁAC.

GAS	%CH ₄ Inicial	%CH ₄ Final
T ₀ :MEA-50%	60,4	69
T ₀ :ÁAC-70%	60,4	56
T ₁ :MEA-70%+ÁAC-30%	60,4	75
T ₂ :MEA-50%+ÁAC-50%	60,4	73
T ₃ :MEA-30%+ÁAC-70%	60,4	68

De acuerdo a los datos obtenidos de los mejores Testigos T₀ (MEA al 50%), T₀' (ÁAC al 70%) y en tres tratamientos: T₁ (mezcla al 70% de MEA+30% de ÁAC), T₂ (mezcla al 50% de MEA+50% de ÁAC) Y T₃ (mezcla al 70% MEA+30% ÁAC) el CO₂ aumento en 8,6% para el T₀, se vio una reducción de 4,4% para el T₀' y un aumento de 14,6%, 12,6% y 7,6% para el T₁, T₂ y T₃ respectivamente del CO₂ inicial (40%).

Figura 23.

Concentración de CH₄ obtenido de la purificación del biogás con los testigos y tratamientos (mezcla).



La Figura 23 muestra que el T₁ incrementó en 14,6% la concentración de CH₄, seguido por el incremento de 13,4% de CH₄ con el T₂, 8,6% para el T₀, 7,6% de CH₄ para el T₃ y una pérdida de 3,6% de CH₄ para el T₀'; Morero & Campanella (2013), reportó una concentración de 97,3% de CH₄ con DGA al 50%, siendo esto una amina primaria al igual que el obtenido por la mezcla de MEA con ÁAC al 50%, formando una amina primaria llamada Metilpropanolamina (MPA) donde se encontró una concentración del 73% de CH₄, sin embargo se muestra una mejora de 8,6% en la concentración del CH₄ respecto al inicial, Morero & Campanella (2013), establecen que se alcanza mayor concentración de CH₄ cuando haya menor temperatura, en la mezcla MDEA al 35% y MEA al 15% se

manifestó con 97% de CH₄ a 43,3°C, resaltando la proporcionalidad inversa del incremento de CH₄ respecto a la disminución de la temperatura, por otro lado la aminas operan en procesos calientes favoreciendo la reacción química, no obstante, debe controlarse la temperatura para que el calor no sea excesivo porque puede causar vaporización, pérdida de la solución y CH₄ (Varnero et.al 2012; Morero & Campanella, 2013).

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0,000 a un nivel del 95% de confianza, entre la varianza de las medias de la concentración de CH₄, obtenido para los tratamientos (mezclas de MEA+ÁAC al 30%, 50% y 70%) y testigos (MEA-50% y ÁAC-70%).

La prueba de Tukey HSD muestra que la mayor concentración CH₄ es del T₁, seguido por el T₂, T₀, T₃ y T₀.

4.3. Potencial energético del biometano obtenido de la purificación mediante el tratamiento químico en la Planta Extractora de Palma de Aceite INDOLMALSA

Tabla 9.

Poder calorífico del biogás purificado obtenido con el tratamiento químico.

Tratamiento	Poder calorífico (kcal) Final	Poder calorífico (kcal) Inicial
T ₀ :MEA-50%	6530	5716
T ₀ :ÁAC-70%	5253	5716
T ₁ :MEA y ÁAC-30%	7145	5716
T ₂ :MEA y ÁAC-50%	6955	5716
T ₃ :MEA y ÁAC-70%	6408	5716

Para el cálculo del poder calorífico teórico, se optó por el método de Entalpia de Combustión propuesto por Quesada & et al (2007), que consiste en obtener el valor del poder calorífico del CH₄ a condiciones normales y a partir de ello se pudo calcular el poder calorífico según la concentración de CH₄ presente en el Biometano, obtenido de la digestión anaerobia de los efluentes de planta extractora de palma de aceite, se presenta de acuerdo a las reacciones obtenidas utilizando la siguiente reacción:



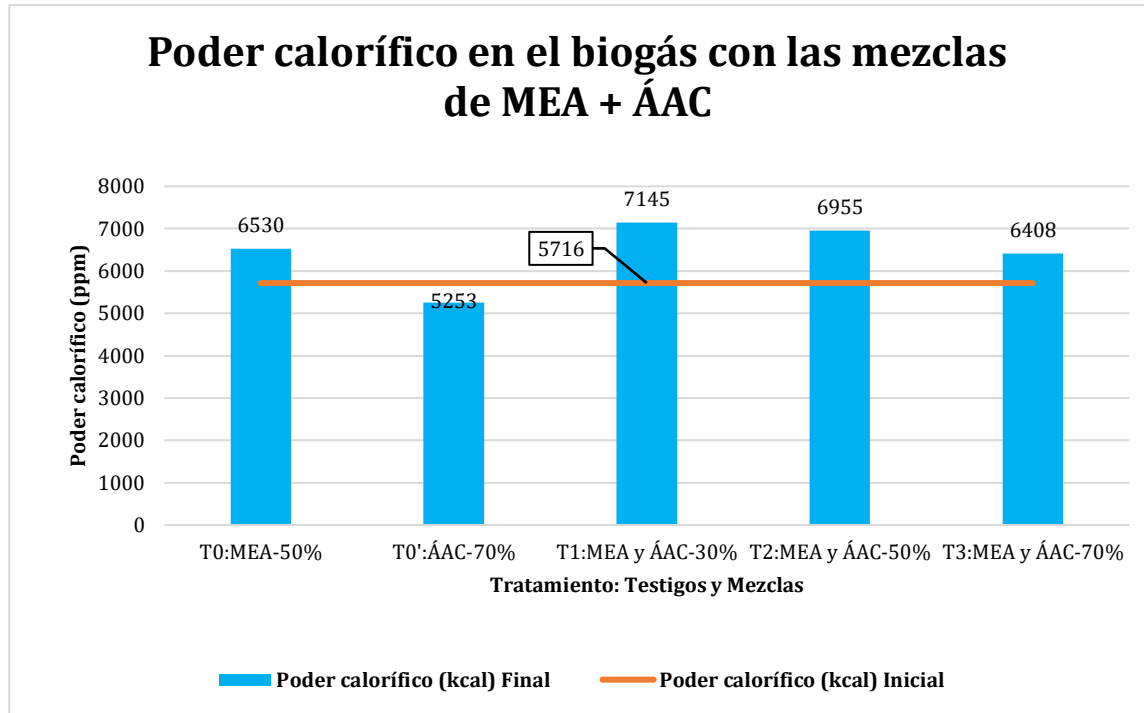
Donde 1m³ es igual a 44,64 mol

Por lo tanto, se utiliza y relacionando este valor con las concentraciones de CH₄ medido en cada tratamiento, tenemos que:

El T₁ con 7145 kcal, el T₂ con 6955 kcal, el T₃ con 6408 kcal, el T₀ muestra un poder calorífico de 6530 kcal, el T_{0'} tiene 5253 kcal, garantizando que el biogás obtenido es de alta calidad, como concluye Gutiérrez & *et al* (2012), indica que un biogás de calidad contiene entre 50 a 80% de CH₄ en su composición y un poder calorífico de 5000 a 6000 kcal/m³, el poder calorífico real se prueba en motores de combustión de cuatro tiempos con ingreso dual (biogás-gasolina) al respecto Escobedo (2011), manifiesta que el biogás como combustible alternativo en motores de combustión interna encendidos por chispa, únicamente puede ser aprovechado para el funcionamiento de los motores de cuatro tiempos, ya que los motores de dos tiempos no se pueden adaptar a biogás; en estos, el combustible debe ir mezclado con el aceite que lubrica las partes móviles del motor, por otro lado (Cambero, 2018), reporta un biogás con 53% de CH₄ y un poder calorífico real de 378,33 Kcal/m³ de biogás. Otros usos que se le puede dar al biogás es la inyección a la red de gas natural o la conversión en gas natural comprimido (GNC) para su utilización en vehículos (Morero, 2014).

Figura 24.

Poder calorífico en el biogás con los testigos y tratamientos (mezcla).



La Figura 24, se muestra que el T₁ generó mayor poder calorífico con 7145 kcal, seguido por el T₂ con 6955 kcal, el testigo T₀ con 6530 kcal, el T₃ con 6408 kcal y 5253 kcal para el T₀'.

La prueba estadística de ANOVA (Analysis Of Variance) muestra que existe diferencia significativa de 0,000 a un nivel del 95% de confianza, entre la varianza de las medias del poder calorífico, obtenido para los tratamientos (T₁, T₂, T₃) y testigos (T₀ T₀').

La prueba de Tukey HSD muestra que el mayor poder calorífico es para el T₁, seguido por el T₂, T₀, T₃ y para el T₀'.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. Para el tratamiento químico el cual se realizó una mezcla de MEA y AAC en solución llamada metilpropanolamina para la purificación del biogás, fue mejor con la mezcla de 70% de MEA y 30% AAC, reflejada en la concentración final de 25% de CO₂ y 75% de CH₄.
2. Se logró reducir la concentración de gases contaminantes CO₂, H₂S, sin embargo, la producción de CH₄ solo ha llegado a 75% y no ha permitido la obtención de biometano (concentración de CH₄ superior a 95%).
3. El tratamiento 1 (mezcla al 30% MEA y 70% AAC) generó mayor poder calorífico con 7145 kcal, puede ser utilizado en la cocción de alimentos o como combustible, gas comprimido para los motores de combustión interna de cuatro tiempos con garantías del alto poder calorífico sin riesgos de corrosión de las partes metálicas del equipo porque la concentración del H₂S está por debajo del límite permisible (50 ppm).

5.2. Recomendaciones

1. Tener en cuenta la evaluación de la temperatura durante el proceso de absorción química, manteniendo constante el flujo de biogás como factores de estudio para mejorar la eficiencia de absorción o purificación de los gases indeseados (CO_2 y H_2S) en el biogás.
2. Realizar las mezclas de la MEA y AAC con otras Amina terciarias, en busca de la reducción de costos, porque la eficiencia ya se demostró en diferentes estudios.
3. Realizar tratamiento de MEA y AAC con diferentes proporciones con un sistema de refrigeración para controlar la temperatura de la reacción química.
4. Las próximas investigaciones sobre este tema, deberán incluir al Hidróxido de calcio llamada también cal muerta/cal apagada $\text{Ca}(\text{OH})_2$, debido a que las referencias indican que remueven completamente el CO_2 y H_2 , además de mejorar el pH.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abatzoglou, N., & Boivin, S. (2009). *Biofuels, Bioprod. Biorefin.*, 3: 42-71.
- Abu-Zara, M. R., Shcneiders, L. H., Niederer, J. P., Feron, P. H., & Versteeg, G. F. (2007). CO₂ capture from power plants. PArt I. A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine. *Internacional Journal of Greenhause Gas Control*, 1: 37-46.
- Achina, S., Achinas, V., & Euverink, G. J. (2017). A technological overview of biogas production from biowaste. *Engineering*, 3(3):299-307.
- Alhassan, K. A., Abdullahi, B. T., & Shah, M. M. (2019). A review on biogas production as the alternative source of fuel. *Appl. Adv. Res.*, 4(2): 61-65.
- Budiyono, B., Widiassa, I. N., Johari, S., & Sunarso, S. (2010). *Int. J. Chem. Biol. Eng*, 3: 39-44.
- Camero, M. R. (2018). *Potencial de generación eléctrica con biogás a partir de efluente de la planta extractora de aceite de Palma INOLMASA, distrito de Neshuya, región Ucayali*. Pucallpa, Perú: Univerisdad Nacional de Ucayali, Escuela de Postgrado.
- Christ, P. M., Gopinath, L. R., & Divya, D. (2014). *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 34: 167-173.
- Erdmann, E., Ruiz, A., Martínez, L., Gutiérrez, J., Tarifa, J. P., & Enrique. (2012). Endulzamiento de gas natural con aminas. Simulación del proceso y análisis de sensibilidad paramétrico.

- Escobedo, J. R. (2011). *Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fábrica "Lubascher y Krausse"*. Temuco: Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería.
- Fernández, E. (2004). *Procedimiento para la purificación de biogás*. Habana, Cuba. 18 p: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Publicación CU 23003 AI. Oficina Cubana de la Propiedad Intelectual.
- Gosh, D. P. (2007). *The 2007 Tri-service Corrosion Conference*. Colorado, USA: Denver.
- Gunaseelan, V. N. (1997). *Biomass Bioenergy*, 13: 83-114.
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 712-725.
- Gutiérrez, G., Mondaca, I., Meza, M., Félix, A., Balderas, J., & Gortáres, P. (2012). Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía. *Ideas CONCYTEG*, 7(85): 881-894.
- Holm, J. B., Seadi, T., & Oleskowicz, P. (2009). *Bioresour. Technol*, 100: 5478-5484.
- Horikawa, M. S., Rossi, M. L., Gimenes, M. L., Costa, C. M., Da Silva, M. G., & Braz, J. (2004). 21: 415-422: Chem. Eng.
- Huertas, J. G. (2010). *Filtración de H₂S y CO₂ presentes en el biogás usado en plantas eléctricas de potencia*. Toluca, México: Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (Informe final del proyecto MOPESA).

- Jenkins , J. L., & Haw, R. (2002). *Understanding gas treating fundamentals, Refining Gas Processing Petrochemicals*. Reprinted from PTQ (Petroleum Technology Quarterly) 2001-2 issue.
- Kohl, A., & Nielsen, N. (1997). *Gas Purification*. Houston, Texas: 5ed., 40-277. Gulf Publishing Company.
- Lunsford, K. M., & Bullin, J. A. (1996). *Optimization of Amine Sweetening Units, Bryan Research and Engineering, Inc. Technical Papers. Proceedings of the 1996 AIChE Spring National Meeting*. New York, NY: American Institute of Chemical Engineers.
- Marchaim, U. (1992). *Biogas technology as an environmental solution to pollution*. Roma, Italy: Bull. FAO Agric. Services.
- Morero, B. G. (14 de Octubre de 2009). *Biogás obtenido de la digestión anaerobia de diferentes residuos orgánicos: revisión de la principales tecnologías de purificación*. Obtenido de <http://www.ambienteaugm.ufscar.br/uploads/A2-026.pdf>
- Morero, B., & Campanella, E. A. (2013). Simulacion del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación de Biogás. *Información Tecnológica*, 23(1): 25-32.
- Morero, B., & Gropelly, E. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Cien. y Technol*, 10: 187-201.

- Morero, B., Croquer, M. C., Groppelli, E., & Campanella, E. A. (2011). Comparación de diferentes soluciones de aminas para la purificación de biogás. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15:97-103.
- Morero, B. (2014). *Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias*. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química, Tesis para la obtención del grado académico de Doctora en Tecnologías Químicas.
- Noyola, A., Morgan, J. M., & López, J. E. (2006). Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. *Rev. Environ Sci. Biotechnol*, 5: 93-114.
- Nuchitprasittichai, A., & Cremaschi, S. (2011). Optimization of CO₂ capture process with aqueous amines using response surface methodology. *Computers and Chemical Engineering*, 35: 1521-1531.
- Porpatham, E., Ramesh, A., & Nagalingam, B. (2007). *Int. J. Hydrogen Energy*, 32: 2057-2065.
- Quesada, R., Salas, N., Arguedas, M., & Botero, R. (2007). Generación de energía eléctrica a partir de biogás. *Revis de la Universidad EARTH*, 3(2): 227-235.
- Rashed, M., Torii, S., Rahman, M. M., & Razaul, M. (2019). Physico-chemical elimination of unwanted CO₂, H₂S and H₂O fractions from biometano. *Sustainable Energy & Fuels*, 19:166-172.

- 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.
- SORIANO MUNARRIZ, R. M. (2018). *Evaluación de la eficiencia de la MEA 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*. PUCALLPA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI.
- Tippayawong, N., & Thanampongachart, P. (2010). Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy*, 35(12): 4531-5.
- Treybal, R. (1996). *Operaciones de transferencia de Masa*. 2ed. Mc Graw Hill, pp. 865.
- Vargas, Y. k., & Pérez, L. I. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1): 59-72.
- Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación de energía eléctrica. *Información Tecnológica*, 23(2): 31-40.
- Viquez, J. (2010). Remoción del sulfuro de hidrógeno en el biogás. *ECAG Informa*, 53(1): 16-21.

WBA. (2018). *World Bioenergy Association*. Obtenido de Global Bioenergy
Statistics: <https://worldbioenergy.org/>

Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Appl.
Microbiol. Biotechnol*, 85:849-860.

ANEXOS

Anexo 1. Iconografía

Figura 25.

Sistema de generación de biogás.



Figura 26.

Sistema de almacenamiento de biogás.



Figura 27.

Inspeccionando cálculos.



Figura 28.

Solución de MEA + AAC



Figura 29.

Mezclando las soluciones de MEA + ÁAC



Figura 30.

Proceso de absorción y purificación



Figura 31.

Sensores de medición de CH₄, CO₂ y H₂S



Figura 32.

Llama color anaranjado prueba del Biogás Inicial



Figura 33.

*Llama de color Azul, prueba del Poder Calorífico después del tratamiento 1
(mezcla al 30% MEA y 70% AAC)*



Anexo 2. Tablas en general

Tabla 10.

Prueba de Anova para la concentración de CO₂ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	993.407	2	496.703	1082.404	.000
Dentro de grupos	2.753	6	.459		
Total	996.160	8			

Tabla 11.

Prueba de Tukey SHD para la concentración de CO₂ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).

Testigo con MEA	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
50% MEA	3	31.0		
30% MEA	3		49.8	
70% MEA	3			55.6
Sig.		1	1	1

Tabla 12.

Anova para la concentración de H₂S con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	119.709	2	59.854	379.359	.000
Dentro de grupos	.947	6	.158		
Total	120.656	8			

Tabla 13.

Prueba de Tukey SHD para la concentración de H₂S con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).

MEA	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
T ₀ : MEA al 50%	3	46.600		
T ₀ : MEA al 70%	3		51.100	
T ₀ : MEA al 30%	3			55.533
Sig.		1.000	1.000	1.000

Tabla 14.

Prueba de Anova para la concentración de CO₂ con el testigo ÁAC al (30%, 50% y 70%).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	6.736	2	3.368	2.294	.182
Dentro de grupos	8.807	6	1.468		
Total	15.542	8			

Tabla 15.

Anova para la concentración de H₂S con el testigo ÁAC al (30%, 50% y 70%).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0.000	2	0.000	0.000	1.000
Dentro de grupos	2.000	6	.333		
Total	2.000	8			

Tabla 16.

Prueba de Anova para la concentración de CO₂ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla) y testigo MEA y Acético a 30%, 50% y 70%.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	728.156	4	182.039	16.929	.000
Dentro de grupos	107.533	10	10.753		
Total	835.689	14			

Tabla 17.

Prueba de Tukey HSD para la concentración de CO₂ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla) y testigo MEA y Acético a 30%, 50% y 70%.

Tratamientos	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
T ₁ : MEA + ÁAC al 30%	3	24.5	
T ₂ : MEA + ÁAC al 50%	3	26.5	
T ₀ : MEA al 50%	3	31.0	
T ₃ : MEA + ÁAC al 70%	3	32.3	
T ₀ : ÁAC al 70%	3		44.5
Sig.		0.1	1.0

Tabla 18.

Prueba de ANOVA para la concentración de H₂S en el biogás obtenido con los tratamientos (MEA+ÁAC al 30%, 50% y 70%) y testigo MEA al 30% y ÁAC al 70%.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	713.163	4	178.291	11.697	.001
Dentro de grupos	152.427	10	15.243		
Total	865.589	14			

Tabla 19.

Prueba de HSD Tukey para la concentración de H₂S en el biogás obtenido con los tratamientos (MEA+ÁAC al 30%, 50% y 70%) y testigo MEA al 30% y ÁAC al 70%.

Tratamientos	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
T3:MEA+ÁAC al 70%	3	34.467		
T1:MEA+ÁAC al 30%	3	39.567	39.567	
T0:MEA al 50%	3		46.600	46.600
T2:MEA+ÁAC al 50%	3		46.733	46.733
T0':ÁAC al 70%	3			54.667
Sig.		.529	.238	.159

Tabla 20.

Prueba de Anova para la concentración de CH₄ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	993.407	2	496.703	1082.404	.000
Dentro de grupos	2.753	6	.459		
Total	996.160	8			

Tabla 21.

Prueba de Tukey HSD para la concentración de CH₄ con el testigo MEA (30%, 50% y 70%).

Testigo con MEA	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
70% MEA	3	44.367		
30% MEA	3		50.233	
50% MEA	3			69.000
Sig.		1.000	1.000	1.000

Tabla 22.

Prueba de Anova para la concentración de CH₄ con el testigo ÁAC al (30%, 50% y 70%).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	6.736	2	3.368	2.294	.182
Dentro de grupos	8.807	6	1.468		
Total	15.542	8			

Tabla 23.

Prueba de Anova para la concentración de CH₄ en el biogás obtenido con los tratamientos (mezcla a 30%, 50% y 70%) y testigos de MEA y ÁAC.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	728.156	4	182.039	16.929	.000
Dentro de grupos	107.533	10	10.753		
Total	835.689	14			

Tabla 24.

Prueba de Tukey HSD para la concentración de CH₄ en el biogás obtenido con los tratamiento (mezcla a 30%, 50% y 70%) y testigos de MEA y ÁAC.

Tratamientos	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
T0: ÁAC al 70%	3	55.5	
T3: MEA + ÁAC al 70%	3		67.7
T0: MEA al 50%	3		69.0
T2: MEA + ÁAC al 50%	3		73.5
T1: MEA + ÁAC al 30%	3		75.5
Sig.		1.0	0.1

Tabla 25.

Prueba de ANOVA para el poder calorífico obtenido de la mezcla de MEA+ÁAC y testigos al 30%, 50% y 70%.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	728.156	4	182.039	16.929	.000
Dentro de grupos	107.533	10	10.753		
Total	835.689	14			

Tabla 26.

Prueba HSD de Tukey para el poder calorífico obtenido de la mezcla de MEA+ÁAC y testigos al 30%, 50% y 70%.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
T0':ÁAC al 70%	3	55.5000	
T3:MEA+ÁAC al 70%	3		67.7000
T0:MEA al 50%	3		69.0000
T2:MEA+ÁAC al 50%	3		73.4667
T1:MEA+ÁAC al 30%	3		75.4667
Sig.		1.000	.091