

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y PROPUESTA DE UN PROCESO
PARA LA PRÁCTICA DEL ENVASADO DE BIOGÁS LIBRE DE
CO₂ Y H₂S EN EL SALVADOR.**

PRESENTADO POR:

**WILMER ERNESTO LINARES RIVERA
FÁTIMA GABRIELA LÓPEZ VARGAS
FRANCISCO ALEJANDRO MERINO FLORES**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

M.Sc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA:

Dra. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título:

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y PROPUESTA DE UN
PROCESO PARA LA PRÁCTICA DEL ENVASADO DE
BIOGÁS LIBRE DE CO₂ Y H₂S EN EL SALVADOR.**

Presentado por:

WILMER ERNESTO LINARES RIVERA

FÁTIMA GABRIELA LÓPEZ VARGAS

FRANCISCO ALEJANDRO MERINO FLORES

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Mto. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ

SAN SALVADOR, OCTUBRE 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

Mto. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

En primer lugar, agradecemos a la **Universidad de El Salvador (UES)**, por ser nuestra alma máter, que nos recibió como estudiantes y nos permitió cumplir la meta que nos trazamos al iniciar nuestros estudios, por apoyar a la sociedad salvadoreña, acogiendo estudiantes de cualquier nivel social, para forjarlos en su desarrollo profesional y personal.

A la **Facultad de Ingeniería y Arquitectura (FIA)**, que nos acogió como estudiantes desde el primer día, lugar donde pasamos días que nunca olvidaremos, gracias por convertirte en nuestra segunda casa.

A la **Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos (EIQA)**, que nos brindó las herramientas necesarias para adquirir nuestros conocimientos y alcanzar la meta de convertirnos en Ingenieros Químicos.

A los **docentes** de la Facultad, quienes han sido partícipes de nuestra formación, transmitiendo todos los conocimientos adquiridos en el desempeño de su papel como profesionales.

A nuestro asesor, **Msc. Miguel Francisco Arévalo**, que nos apoyó e instruyó en todo momento para la realización de este trabajo de graduación, sin su ayuda esto no habría sido posible.

A la **Asociación de Estudiantes de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos (ASEIQA)**, por acobijarnos durante toda nuestra carrera, donde conocimos tantas personas que hicieron inolvidable nuestro paso por la UES.

Y especialmente, al poke-equipo por ser personas increíbles y regalarnos su amistad sincera...
Gracias a todos, AMIGOS.

Hacia la Libertad por la Cultura.

Fátima, Francisco y Wilmer.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A **Dios Todopoderoso**, por el valioso regalo de la vida. Por permitirme cumplir uno de mis más anhelados sueños, gracias Padre por tanto amor y por darme la certeza de que jamás estuve sola en este camino. A la **Virgen María Santísima**, madre buena, por caminar de mi mano desde que era niña y nunca desampararme.

A **mis padres** los pilares más importantes de mi vida, Ramón Arístides López y Lorena Claribel Vargas. A ti papito, gracias por enseñarme que con amor todo se aprende más fácil, por las noches de desvelo y por ser mi maestro; a ti mamita, por el mejor ejemplo de mujer para mí, la más valiente e incansable, quien siempre estuvo a mi lado para celebrar mis victorias y alentar mis fracasos. Jamás podré retribuirles todo el esfuerzo y dedicación que han puesto en cada uno de mis hermanos y en mí. La vida no alcanza para pagarles tanto amor y entrega. Son los mejores padres del mundo, los amo infinitamente. Esto es gracias a ustedes y para ustedes. Dios les bendiga siempre.

A **mis hermanos** Claribel, Ligia, Ramón y Alejandrita por el apoyo incondicional y por todo el amor. Por estar para mí en cualquier situación y por hacerme sentir que en las buenas y en las malas tengo sus brazos abiertos de par en par para mí. Estoy muy orgullosa de cada uno e inmensamente agradecida por tenerlos, no pude haber pedido mejores hermanos, los amo.

A **mis sobrinos**, Valeria y Geovancito, por ser la alegría del hogar y regalarnos tantos lindos momentos. Una sonrisa suya es suficiente para hacernos feliz el día, mis niños.

A **Francisco Alejandro Merino**, por ser mi mejor amigo y compañero durante estos 6 años, por las palabras de aliento, las largas charlas, las risas, porque has sido tú quien ha dividido las cargas en dos en los momentos en que pensé que ya podía más, este logro no ha sido sólo mío. Me siento bendecida de haberte encontrado en el camino y alcanzar esta meta juntos. Todos estos años no hubieran sido lo mismo de no haberlos pasado contigo. Te amo, mi Ale.

A mi **Mama Eulogia**, por cuidar de mí en mis años de carrera, por todas sus oraciones, por cada consejo que me dio y por regalarme tanto cariño. Mayoya, gracias porque en los días más difíciles estuvo para mí.

A mi tía, **Marta Teresa López**, por acogerme como una hija más y abrirme las puertas de su hogar, por cada atención que tuvo conmigo, por su confianza y apoyo; a mis primos **Hernández López** por ser como mis hermanos, por hacerme sentir en casa desde el primer día. Muchas gracias.

A **mis abuelos**, José Arístides y Lilian Concepción, con especial cariño y respeto por ser un ejemplo de amor y humildad para todos sus nietos. Mi admiración para ustedes.

A **mis tíos, primos y demás familia** por estar en cada etapa de mi vida, por estar pendientes de mí en todo momento, mis más sinceros agradecimientos.

A la **Familia Merino Flores**, por hacerme sentir un miembro más de su familia, por todo el cariño recibido y porque con su apoyo han sido parte fundamental de este logro. Gracias familia.

A **mis amigos y compañeros**, todos los que hemos recorrido este camino, gracia por su amistad porque son el regalo más preciado que me llevo de mi Alma Máter, porque hemos compartido buenísimos momentos y otros no tanto, pero entre el estrés y el cansancio fueron ustedes los que hicieron este camino más fácil.

Y a todas las personas que han sido parte de este viaje y han aportado su granito de arena en mi formación, infinitas gracias. ¡Lo logramos!

Fátima Gabriela López Vargas.

En primer lugar, agradezco a Dios por regalarme la vida y darme la voluntad de seguir adelante en todos los momentos difíciles que pasé a lo largo de la carrera, y también por todas las experiencias buenas que viví en la institución.

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mi padre **Renato Francisco Merino**, por apoyarme durante mi desarrollo estudiantil y forjarme como una buena persona. A mi madre **Marlene Esmeralda Flores** por demostrarme que con esfuerzo y dedicación se puede salir adelante a pesar de todas las dificultades que se puedan presentar, infinitas gracias por todo el esfuerzo que dedicaste a mí y a mis hermanos y por nunca rendirte a pesar de todas las adversidades que sufriste. Gracias padres, no hay palabras que puedan describir lo infinitamente agradecidos que estoy con ustedes. ¡Los amo!

A mis hermanos **Andrea, Eduardo y José**, por apoyarme en todo momento, por siempre intervenir en momentos difíciles, por inspirarme a siempre dar lo mejor de mí y por reconocerme los logros que he alcanzado a lo largo de mi carrera universitaria. Espero que puedan encontrar en mí una fuente de inspiración para lograr sus futuras metas. A mi hermano mayor **Carlos**, que a pesar de la distancia siempre estuvo apoyándome. Gracias mis queridos hermanos los amo con todo mi corazón.

A mis abuelas, Catalina Machuca, Cruz Hernández y mi abuelo Carlos Flores quienes, a su única y especial manera, siempre me ayudaron sin esperar nada a cambio, gracias por darme las fuerzas y motivos para salir adelante como profesional.

A **Fátima Gabriela López**, sin tu ayuda nada de esto hubiera sido posible, gracias por siempre brindarme tu apoyo sin esperar nada a cambio y por brindarme tu amistad y amor durante los 6 años de estudiante que realice en la Universidad de El Salvador. Gracias por todos los momentos que me regalaste a tu lado y por la paciencia que me has tenido. Te amo Fatimita.

A mi padrino, **Ulises Edgardo Flores** quien desde que tengo memoria ha sido para mí un segundo padre, que desde pequeño sin importarle nada ha velado por mi bien y el de mis hermanos, gracias mi tío tapón, sin ti ni yo ni mis hermanos seríamos lo que somos ahora, te agradezco toda tu

dedicación hacia nosotros estaremos en deuda siempre contigo; y a mi madrina, Claudia Patricia Erazo, gracias por adoptarme como un hijo más para ti y por ayudarme siempre en cada momento. Cada detalle que ustedes tuvieron conmigo es un tesoro para mí. Los amo padrinos.

Al resto de mi familia, tíos, primos, a todos que a su manera siempre tuvieron la amabilidad de apoyarme y estar siempre para mí. Gracias a todos.

A la familia López Vargas, quienes han tenido a bien adoptarme como miembro de su familia, gracias por todo su apoyo y por alentarme a salir adelante.

A todos mis amigos y compañeros, quienes son pieza fundamental de este logro, les agradezco cada momento vivido, sus consejos y muestras de cariño, sin ustedes esta experiencia no habría sido tan gratificante, gracias a todos.

Y a todos los demás que de alguna u otra manera aportaron para alcanzar esta meta. ¡Gracias!

Francisco Alejandro Merino Flores.

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mi padre **Douwlas Ernesto Gálvez Linares**, por alentarme siempre a seguir mi desarrollo como profesional, darme siempre los mejores consejos y guiarme por el camino del bien. A mi madre **Sonia Margarita Rivera** por siempre estar a mi lado y ayudarme en todos los problemas que se me presentaron y con el mejor ejemplo, enseñarme el camino para lograr todos mis objetivos. infinitas gracias padres, estoy en infinita deuda por todo el apoyo que me han brindado durante todo este tiempo ¡Los amo!

A mi hermana **Katherine**, por apoyarme en todo momento, por acompañarme durante esta experiencia universitaria, gracias por siempre estar conmigo y por crecer a mi lado.

A todos mis amigos y compañeros, por hacer de esta experiencia universitaria inolvidable, sin todos ustedes nada de esto hubiese sido tan provechoso y lleno de recuerdos inolvidables, gracias por todos los buenos y no tan buenos momentos que pasamos juntos en la universidad. ¡Lo logramos!

Wilmer Ernesto Linares Rivera.

RESUMEN

El uso de energías renovables como alternativas de la energía fósil, se hace más común día con día, cada vez son más las empresas que buscan una alternativa renovable para satisfacer sus necesidades energéticas. En el Salvador, se hace cada vez más popular la utilización de biogás como fuente de energía. El biogás es un producto generado a partir de la digestión anaerobia de biomasa, posee entre sus principales gases, metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrogeno (H_2S).

Dos son las empresas elegidas como punto de partida para la realización de este trabajo de investigación, Industrias la Constancia y AGROSANIA S.A. de C.V. quienes, como subproceso, ya cuentan con producción de biogás a partir de lo que antes era considerado como desecho. Las aplicaciones pueden ser muy amplias, pero actualmente es muy común que la producción de biogás, sobrepase las necesidades energéticas que tienen las empresas, por lo que se ven en la necesidad de deshacerse de ese exceso.

Es aquí donde entra el trabajo de investigación, ya que presenta una recopilación de información acerca del muestreo, análisis, purificación, compresión y envasado de biogás, para el aprovechamiento de este exceso de recurso que se desperdicia. Para el caso de este trabajo, se utilizará un flujo diario de 150m^3 de biogás.

Entre los principales resultados obtenidos, se presenta una metodología de análisis de biogás bastante práctica, sencilla y precisa; este método consiste en la utilización del Sewerin Multitec 540 ® que de manera muy eficaz brinda datos acerca de la composición en volumen del biogás que se produce. Para el caso del biodigestor analizado, se obtuvieron datos de concentración de: Metano 70%, dióxido de carbono 15% y sulfuro de hidrógeno 600 ppm.

Luego la purificación del biogás sugerida, es un proceso que consiste en 2 etapas, la primera de ellas consiste en un filtro de óxido férrico, el cual, para el caso del flujo elegido, se utilizarían alrededor de 160 g diarios para la remoción del H_2S . Luego la segunda etapa consiste en una torre de absorción empacada, en la cual se utilizará un flujo de agua a contracorriente para remover el CO_2 que contiene el flujo de biogás. Según los cálculos realizados, para una completa eliminación

del CO₂, se necesita un flujo de agua de 178.64 m³/día, la torre tendrá 26.59 cm de diámetro por 35.7 cm de altura.

Finalmente, el biogás purificado conocido como biometano, es comprimido en envases de 31cm de diámetro por 50 cm de altura, los cuales deben tener cuidados especiales para su fabricación y manipulación. La compresión se lleva a cabo por medio de un compresor especial para biogás que debe llevar este biogás a una presión de 16 bares. El cilindro deberá tener colores específicos para poder reconocer el tipo de gas presente en él, para este caso, se sugiere el uso de una combinación de rojo en la parte superior, con una base negra para la identificación del metano.

INDICE

RESUMEN	i
INDICE.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.0 GENERALIDADES DEL BIOGÁS.....	3
1.1 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.	4
1.1.1 ESTRUCTURA DE UN BIODIGESTOR.....	6
1.1.2 MATERIAL DEL DOMO DE UN BIODIGESTOR.	6
1.1.2.1 Geomembranas de PVC Temporales.....	7
1.1.2.2 Geomembranas de PVC Estándar (S).....	7
1.1.2.3 Geomembranas de PVC de Alta Resistencia (HR).	8
1.1.2.4 Geomembranas de PVC Reforzadas.....	9
1.1.2.5 Geomembranas de Polietileno de Alta Densidad (HDPE).	10
1.1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS BIODIGESTORES.....	12
1.1.3.1 Ventajas de los Biodigestores.....	12
1.1.3.2 Desventajas y Riesgos de los Biodigestores.....	12
1.1.4 TIPOS DE BIODIGESTORES.....	13
1.1.4.1 Pozos Sépticos.....	13
1.1.4.2 Biodigestor de Domo Flotante (India).....	14
1.1.4.3 Biodigestor de Domo Fijo (China).....	14
1.1.4.4 Biodigestor de Estructura Flexible.....	15
1.1.4.5 Digestor Flotante.....	16
1.1.4.6 Digestor con Tanque de Almacenamiento Tradicional y Cúpula de Polietileno. ..	17
1.1.4.7 Biodigestores de Alta Velocidad o Flujo Inducido.	18
1.1.4.8 Instalaciones Industriales.....	19
1.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL SALVADOR.	21
1.2.1 BIODIGESTOR INDUSTRIAS LA CONSTANCIA.....	22
1.2.1.1 Etapa Anaerobia	23

1.2.1.2	Etapa Aerobia	24
1.2.2	BIODIGESTOR AGROSANIA S.A. DE C.V.....	26
1.2.2.1	Descripción General.....	26
1.2.2.2	Producción de Biogás.....	26
CAPÍTULO II: MÉTODOS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....		29
2.0	MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE CO ₂ Y H ₂ S.....	29
2.1	MÉTODOS DE SEPARACIÓN H ₂ S-CH ₄	31
2.1.1	ABSORCIÓN QUÍMICA	31
2.1.1.1	Tecnologías Secas.....	31
2.1.1.2	Tecnologías Húmedas.....	32
2.1.2	MÉTODOS BIOTECNOLÓGICOS	33
2.1.2.1	Diseño de Filtros Biológicos para la Purificación de Biogás.....	37
2.1.3	ADSORCIÓN FÍSICA.....	41
2.1.4	SEPARACIÓN POR MEMBRANA	43
2.2	MÉTODOS DE SEPARACIÓN CO ₂ -CH ₄	44
2.2.1	MÉTODO DE ABSORCIÓN	44
2.2.1.1	Absorción con Agua.....	44
2.2.1.2	Separación por Absorción Química.....	51
2.2.2	SEPARACIÓN CON MEMBRANA.....	53
2.2.2.1	Separación de Gas a Alta Presión.....	53
2.2.2.2	Membranas de Absorción Líquido-Gas.....	54
2.2.3	SEPARACIÓN CRIOGÉNICA	55
2.2.4	ADSORCIÓN EN UNA SUPERFICIE SÓLIDA	55
2.2.4.1	Materiales Adsorbentes de CO ₂	56
CAPÍTULO III: PROPUESTA DE UN PROCESO PARA LA PRÁCTICA DEL ENVASADO DE BIOGAS LIBRE DE CO ₂ Y H ₂ S EN EL SALVADOR.....		60
3.0	MUESTREO Y ANÁLISIS DE MUESTRA DE BIOGÁS	60
	MÉTODOS EXTRACTIVOS.....	61
	MÉTODOS NO EXTRACTIVOS.....	61
3.1	PROPUESTA DE TÉCNICAS DE MUESTREO DE GASES.....	62
3.2	ANÁLISIS DE MUESTRA DE BIOGÁS.....	63
3.2.1	ANÁLISIS INSTRUMENTALES DE MUESTRA DE BIOGÁS.....	63
3.2.1.1	Medición de CH ₄ y CO ₂	63
3.2.1.2	Medición de H ₂ S.....	64
3.2.2	EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS IN SITU DE BIOGÁS.....	65

	Sewerin Multitec 540®.....	65
	Sewerin Multitec 560®.....	65
	MCA 100 Bio-P®.....	65
3.2.3	PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS DE BIOGÁS.....	66
3.2.4	RESULTADOS.....	66
3.2.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
3.3	PROPUESTA DE METODOLOGÍAS PARA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.....	67
3.3.1	SEPARACIÓN H ₂ S-CH ₄	67
3.3.2	SEPARACIÓN CO ₂ -CH ₄	69
3.3.2.1	Cálculos de parámetros de operación.....	69
3.3.2.2	Parámetros Geométricos de la torre de absorción.....	77
3.3.2.3	Material de la torre.....	80
3.3.3	FILTRO DE HUMEDAD.....	80
3.4	PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA COMPRESIÓN Y ENVASADO DE BIOMETANO.....	81
3.4.1	COMPRESIÓN DE BIOMETANO.....	81
3.4.2	EQUIPOS PARA COMPRESIÓN DE BIOMETANO.....	84
3.4.3	SISTEMA COMPRESIÓN Y ENVASADO DE BIOMETANO.....	85
3.4.4	FACTORES DE RIESGO EN COMPRESORES.....	89
3.5	CARACTERIZACIÓN DE CILINDROS PARA ENVASADO DE BIOGAS. ...	90
3.5.1	ENVASADO DE GASES.....	90
3.5.1.1	Partes de un tanque de almacenamiento.....	91
3.5.1.2	Etiquetado de un cilindro de almacenamiento.....	92
3.5.1.3	Color del tanque.....	93
3.5.2	CARACTERIZACIÓN DEL CILINDRO.....	94
3.5.2.1	Material.....	94
3.5.2.2	Diseño.....	94
3.5.2.3	Almacenamiento de cilindros de gas.....	95
3.5.2.4	Manipulación y transporte de cilindros.....	97
	CAPÍTULO IV: PROPUESTA PILOTO DE PROCESO DE PURIFICACIÓN Y ENVASADO DE BIOGÁS.....	99
	CONCLUSIONES.....	102
	RECOMENDACIONES.....	103

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	104
ANEXOS.	112
ANEXO A. SOLUBILIDAD DE DIÓXIDO DE CARBONO EN AGUA A DIFERENTES PRESIONES Y TEMPERATURAS.	112
ANEXO B. ALTURA DE LA UNIDAD DE TRANSFERENCIA HL.	113
ANEXO C. CONSTANTES DE LENNARD-JONES.	114
ANEXO D. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPAQUES ALEATORIOS.	115
ANEXO E. CORRELACIÓN PARA PREDECIR LA CAÍDA DE PRESIÓN EN TORRES EMPACADAS.	116
ANEXO F. HOJAS DE SEGURIDAD DE COMPONENTES DE BIOGÁS.	117
ANEXO F.1 HOJA DE SEGURIDAD DE METANO.	117
ANEXO F.2 HOJA DE SEGURIDAD DE DIÓXIDO DE CARBONO.	122
ANEXO F.3 HOJA DE SEGURIDAD DE SULFURO DE HIDRÓGENO.	128
ANEXO G. MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA LA MANIPULACION DE GASES INFLAMABLES.	134

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 BIODIGESTOR DE DOMO FLOTANTE.....	14
FIGURA 1.2 BIODIGESTOR DE DOMO FIJO.....	15
FIGURA 1.3 BIODIGESTOR DE ESTRUCTURA FLEXIBLE.....	16
FIGURA 1.4 BIODIGESTOR FLOTANTE.....	17
FIGURA 1.5 DIGESTOR CON TANQUE DE ALMACENAMIENTO TRADICIONAL Y CÚPULA DE POLIETILENO	18
FIGURA 1.6 INSTALACIONES INDUSTRIALES DE BIODIGESTORES	19
FIGURA 1.7 DIAGRAMA DE ELABORACIÓN DE BIOGÁS INDUSTRIAS LA CONSTANCIA	25
FIGURA 1.8 DIAGRAMA DE ELABORACIÓN DE BIOGÁS AGROSANIA S.A. DE C.V.	28
FIGURA 2.1 A) ALAMBRINA. B) ALAMBRINA OXIDADA	31
FIGURA 2.2 LAVADO DE GASES	32
FIGURA 2.3 BIOLAVADOR	38
FIGURA 2.4 BIOFILTRO DE LECHO FIJO	38
FIGURA 2.5 BIOFILTRO DE LECHO ESCURRIDO.....	40
FIGURA 2.6 ESQUEMA DEL MÉTODO DE ABSORCIÓN CON AGUA CON RECIRCULACIÓN PARA ELIMINACIÓN DE CO ₂ Y/O H ₂ S	45
FIGURA 2.7 A) EMPAQUES AL AZAR. B) EMPAQUES ESTRUCTURADOS.....	47
FIGURA 2.8 A) ANILLOS RASHING B) ANILLOS LESSING C) SILLA BERL D) SILLAS INTALOX	48
FIGURA 2.9 COLUMNA DE ABSORCIÓN CON PLATOS.....	50
FIGURA 2.10 A) TORRE DE PLATOS PERFORADOS. B) TORRE DE PLATOS DE CAPUCHONES	50
FIGURA 2.11 ESQUEMA DE UNA COLUMNA DE ABSORCIÓN A CONTRACORRIENTE	52
FIGURA 3.1 BOLSAS UTILIZADAS PARA EL MUESTREO DE GASES.....	63
FIGURA 3.2 FILTRO DE ÓXIDO FÉRRICO	68
FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO A CONTRACORRIENTE	71
FIGURA 3.4 CURVA DE OPERACIÓN MÍNIMA	73
FIGURA 3.5 CURVA DE OPERACIÓN REAL	74
FIGURA 3.6 CURVA DE OPERACIÓN MÍNIMA Y REAL DEL SISTEMA	76
FIGURA 3.7 COMPRESORES DE PISTÓN.....	83
FIGURA 3.8 ESTRUCTURA DE UN COMPRESOR PARA BIOGÁS	86

FIGURA 3.9 DIAGRAMA DEL PROCESO DE PURIFICACIÓN Y ENVASADO DE BIOMETANO	88
FIGURA 3.10 DIAGRAMA DE MOLDEO DE TANQUES	90
FIGURA 3.11 PARTES DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO	92
FIGURA 3.12 CÓDIGO DE COLORES PARA TANQUES DE METANO	93
FIGURA 3.13 DISEÑO DE CILINDROS PARA ALMACENAMIENTO DE GAS	95
FIGURA 3.14 ALMACENAMIENTO DE CILINDROS	95
FIGURA 3.15 CILINDROS EXPUESTOS A ALTAS TEMPERATURAS.	96
FIGURA 3.16 A) CILINDRO ASEGURADO B) CILINDROS DE FORMA VERTICAL C) EVITAR GOLPES DE CILINDROS	96
FIGURA 3.17 TRANSPORTE DE CILINDROS	98
FIGURA 3.18 MALA MANIPULACIÓN DE CILINDROS	98
FIGURA 3.19 CORRECTO USO DE CILINDROS.....	98
FIGURA 4.1 DIMENSIONES DE LA TORRE DE ABSORCIÓN	100
FIGURA 4.2 DIMENSIONES DEL CILINDRO DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 APLICACIONES DE LAS GEOMEMBRANAS PVC TEMPORALES	7
TABLA 1.2 APLICACIONES DE LAS GEOMEMBRANAS DE PVC ESTÁNDAR	8
TABLA 1.3 APLICACIONES DE LAS GEOMEMBRANAS PVC DE ALTA RESISTENCIA	9
TABLA 1.4 APLICACIONES DE LAS GEOMEMBRANAS PVC REFORZADAS	10
TABLA 1.5 APLICACIONES DE LAS GEOMEMBRANAS DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD	11
TABLA 2.1 PARÁMETROS COMPARATIVOS DE LOS MÉTODOS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS	59
TABLA 3.1 MÉTODOS NO EXTRACTIVOS DE CARACTERIZACIÓN DE GASES	61
TABLA 3.2 METODOLOGÍA DE MUESTREO DE GASES	62
TABLA 3.3 EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS IN SITU DE BIOGÁS	65
TABLA 3.4 COMPOSICIÓN PROMEDIO DEL BIOGÁS	66
TABLA 3.5 DATOS DE SOLUBILIDAD DEL CO ₂ EN AGUA A 25°C.....	70
TABLA 3.6 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS PARA LA COMPRESIÓN DE BIOMETANO	84
TABLA 3.7 REQUERIMIENTOS DE COMPRESORES DE BIOGÁS Y BIOMETANO	85
TABLA 3.8 OPCIONES DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS	87
TABLA 3.9 FACTORES DE RIESGO EN COMPRESORES.....	89
TABLA 4.1 RESUMEN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA TORRE DE ABSORCIÓN	100
TABLA 4.2 REQUERIMIENTOS DE COMPRESOR A UTILIZAR	101

INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una alta dependencia de combustibles fósiles, recursos de carácter no renovable y no amigables con el medio ambiente, por esta razón también se le apuesta en gran manera a la sustitución de estos combustibles por fuentes renovables de energía.

Una fuente renovable de energía muy utilizada hoy en día es el biogás producido de residuos orgánicos (biomasa), que puede provenir a partir de diferentes fuentes (industriales, municipales y/o agrícolas). La producción de biogás es un proceso natural que se puede dar de forma espontánea o de forma controlada por medio de un reactor llamado biodigestor, el cual, es un sistema que en condiciones anaerobias transforma la biomasa en biogás.

La composición aproximada del biogás se estima en 60% de metano (CH_4), 35% de dióxido de carbono (CO_2), 4% de vapor de agua y un máximo estimado de 1% de ácido sulfhídrico (H_2S). Estos compuestos diferentes al metano pueden resultar perjudiciales para los equipos que utilizan biogás, causando problemas de corrosión, o simplemente disminuyendo la eficiencia del equipo, ya que el metano es el único compuesto con propiedades combustibles.

El biogás que se produce directamente en el biodigestor sale con una presión irregular muy baja aproximadamente 0.03 bar, por lo tanto, no puede aplicarse directamente a quemadores ya que estos requieren de una presión constante entre los 10 y 14 bares, para su correcto funcionamiento. Para esto se hace necesaria la aplicación de una herramienta capaz de elevar la presión del biogás de forma eficaz y sin representar algún riesgo tanto para las instalaciones como para quienes permanecen en el área de su utilización.

El biogás que es producido en el biodigestor es almacenado directamente en una manta encauchada a la presión con la que sale, por lo tanto, si se quiere almacenar grandes volúmenes de biogás a esta presión, se necesitaran mantas mucho más grandes, es por eso que se hace necesario almacenarlo en recipientes de alta presión para disminuir su volumen, y facilitar su manejo.

Por esto nace la iniciativa de desarrollar un procedimiento que permita la disposición de biogás en recipientes de alta presión que puedan ser empleados en hogares de la población salvadoreña, que suponga un menor costo al del gas propano actualmente utilizado.

CAPÍTULO I: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.0 GENERALIDADES DEL BIOGÁS.

Según la Real Academia de la Lengua Española, entenderemos como biogás, el gas obtenido por la degradación anaerobia de residuos orgánicos mediante bacterias, que se debe utilizar como combustible.

El biogás es un gas combustible que se puede obtener a partir de la biomasa, tal como son los desechos de animales, residuos agrícolas y municipales. Este gas puede ser utilizado, por ejemplo, como combustible para motores que mueven una bomba de agua, en alumbrado y en la cocción de alimentos. (Alemán y Vásquez Cortés, 2017)

El mecanismo predominante para la conversión de la biomasa en biogás es la conversión bioquímica o digestión de biomasa orgánica que debe entenderse como un proceso natural que involucra varios procesos bacterianos y enzimáticos simultáneamente.

El biogás se produce mediante un proceso de degradación de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas, o sea en ausencia de oxígeno. La digestión anaeróbica es producto de la acción de bacterias, las cuales se denominan metanogénicas, y las cuales degradan la materia, liberando metano en el proceso. Dichas bacterias metanogénicas son el último eslabón de una cadena de microorganismos encargados de degradar las materias orgánicas y devolver los productos descompuestos al medio ambiente. De esta forma el biogás es generado como una fuente de energía renovable.

La composición aproximada del biogás se estima en 60% de metano (CH_4), 35% de anhídrido carbónico (CO_2), 4% de vapor de agua y un máximo estimado de 1% de ácido sulfhídrico (H_2S). Estos compuestos diferentes al metano pueden resultar perjudiciales para los equipos que finalmente utilizan biogás, causando problemas de corrosión, o simplemente disminuyendo la eficiencia del equipo, ya que el metano es el único compuesto con propiedades combustibles. Además, dependiendo de la procedencia del biogás, puede

contener ciertos compuestos que pueden resultar nocivos para la salud de las personas. Por esto, cuanto mayor sea la concentración de metano en el biogás, mejor será su aprovechamiento como fuente alternativa de energía segura y sustentable. (Morero y Campanella, 2013)

La producción de biogás es un modo útil de tratar residuos biodegradables y a su vez se puede utilizar para diversas aplicaciones tales como: producción de energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, en hornos para el calentamiento, en diversos procesos industriales, en estufas para la cocción de alimentos, calderas, o cualquier sistema de combustión a gas que previamente han sido adaptados para tal efecto.

Cada año entre 590-880 millones de toneladas de metano son liberados al medio ambiente en el mundo, todo debido a la actividad microbológica. Cerca del 90% de dicho metano emitido se deriva de fuentes biológicas tales como la descomposición de biomasa. (Hidalgo, Maravilla, y Ramírez, 2010)

1.1 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.

Un biodigestor es un contenedor hermético que permite la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas resultante para su uso como energía. El biodigestor cuenta con una entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula de control para el gas (biogás), y una salida para el material ya procesado (bioabono).

Los biodigestores toman su término de digestivo o digestión, son sistemas ecológicos o contenedores de concreto, polietileno, hormigón, metal e incluso bolsas, cerrados herméticamente e impermeables que producen biogás y abono natural a partir de desechos orgánicos, los cuales pueden ser, excrementos de origen animal y humano, así como restos vegetales.

Es necesario cumplir con ciertas condiciones para la biodigestión, las cuales se describen a continuación:

- La temperatura es muy importante para la producción de biogás, ya que los microorganismos que realizan la biodigestión disminuyen su actividad fuera de estas temperaturas. La temperatura en la cámara digestiva debe ser entre los 20° C y 60° C; para optimizar el tiempo de producción es deseable mantener una temperatura entre los 30° C y 35° C.
- El nivel de acidez determina como se desenvuelve la fermentación del material orgánico. El pH del material debe tener un valor entre 6.5 y 7.5. Al estar fuera de este rango neutro la materia orgánica corre el riesgo de pudrirse, ya que se aumenta la actividad relativa de los microorganismos equivocados; esto normalmente produce un olor muy desagradable.
- El contenedor debe de estar perfectamente sellado para evitar que entre el Oxígeno y de esta manera tener un procedimiento anaeróbico adecuado; también evita fugas del biogás.
- Debe de contener entre el 80% y 90% de humedad.
- Los materiales más comúnmente utilizados para producir biogás son el estiércol de vaca, caballo, puerco y humana, sin embargo, también se pueden utilizar otros materiales orgánicos.
- Para lograr una descomposición eficiente, la materia orgánica debe de ser en tamaños digeribles pues entre más chica más rápida la producción del biogás.
- Se deberá tener un equilibrio del carbono y el nitrógeno.

1.1.1 ESTRUCTURA DE UN BIODIGESTOR.

Existen muchas variaciones en el diseño del biodigestor. Algunos elementos que comúnmente se incorporan son:

- **Cámara de fermentación:** El espacio donde se almacena la biomasa durante el proceso de descomposición.
- **Cámara de almacén de gas:** El espacio donde se acumula el biogás antes de ser extraído.
- **Pila de carga:** La entrada donde se coloca la biomasa.
- **Pila de descarga:** La salida, sirve para retirar los residuos que están gastados y ya no son útiles para el biogás, pero que se pueden utilizar como abono (bioabono).
- **Agitador:** Desplaza los residuos que están en el fondo hacia arriba del biodigestor.
- **Tubería de gas:** La salida del biogás. Se puede conectar directamente a una estufa o se puede transportar por medio de la misma tubería a su lugar de aprovechamiento.

1.1.2 MATERIAL DEL DOMO DE UN BIODIGESTOR.

El material empleado para la elaboración del domo de un biodigestor en el caso que este no sea del tipo chino, es comúnmente mencionado como un plástico, y de hecho lo es, pero dicho de tal forma queda un poco ambiguo debido a la gran diversidad de plásticos que existen. Para que esto no quede a la deriva se presentan los principales materiales para la elaboración de domos los cuales son:

- Geomembranas de PVC.
- Geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE)
- Polietileno tubular

1.1.2.1 Geomembranas de PVC Temporales.

Las Geomembranas de Cloruro de Polivinilo Temporales (PVC) están fabricadas por un 50% de resina virgen de PVC y un 50% de aditivos que generan excelentes propiedades mecánicas entre las que es notoria su gran elongación, resistencia a la tensión y punzonamiento. Son muy Flexibles.

Estas Geomembranas no poseen aditivos que las hagan resistentes al ataque de rayos ultravioleta, ni al ataque de químicos., ya que deben permanecer enterradas. En estas condiciones su durabilidad es muy alta. De utilizarse en condiciones expuestas (es decir al sol y al agua) deben ser proyectos con una vida útil esperada muy corta entre 6 meses a 1 año.

APLICACIONES:

Algunas de las aplicaciones de ésta geomembranas se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Aplicaciones de las geomembranas PVC temporales. *(Elaboración propia)*

Base de vías.
Diques siempre y cuando estén cubiertos con losas de concreto.
Cimentaciones.
Sótanos.
Espalda de muros en tierra armada, etc.

1.1.2.2 Geomembranas de PVC Estándar (S).

Las Geomembranas de PVC Estándar están fabricadas por un 50% de resina virgen de Cloruro de Polivinilo (PVC.), un porcentaje de negro de humo (aditivo que le da la resistencia al ataque de los rayos ultravioleta), y un porcentaje de estabilizantes y antioxidantes que les proveen excelentes propiedades mecánicas entre las que es notoria su gran elongación,

resistencia a tensión y punzonamiento. Son muy Flexibles. Estas Geomembranas poseen una mediana resistencia al ataque químico, por lo cual están diseñadas para la impermeabilización de proyectos tales como: Almacenamiento de aguas limpias o aguas blancas. En condiciones expuestas (es decir al sol y al agua), tienen una durabilidad entre 5 a 7 años.

Se utilizan con éxito en la impermeabilización de una amplia gama de proyectos y algunas soluciones que se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Aplicaciones de las Geomembranas de PVC estándar. *(Elaboración propia)*

Reservorios agrícolas para almacenamiento de aguas limpias.
Piscinas de recolección de lodos de perforación base agua.
Estanques piscícolas
Diques
Presas
Coberturas finales de Rellenos Sanitarios
Cimentaciones
Lagos ornamentales
Cubiertas arquitectónicas (Tenso estructuradas)
Canales.

1.1.2.3 Geomembranas de PVC de Alta Resistencia (HR).

Las Geomembranas de PVC de Alta Resistencia (HR) están fabricadas por un porcentaje de resina virgen de Cloruro de Polivinilo (PVC.), un porcentaje de negro de humo (aditivo que le da la resistencia al ataque de los rayos ultravioleta), y un porcentaje de modificadores, estabilizantes y antioxidantes que les proveen excelentes propiedades mecánicas entre las que es notoria su gran elongación, resistencia a tensión y punzonamiento, gran resistencia al

ataque de químicos fuertes y son muy flexibles. Las Geomembranas HR no requieren ser cubiertas, pues están diseñadas para trabajar en condiciones expuestas.

Las aplicaciones se muestran en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Aplicaciones de las geomembranas PVC de alta resistencia. *(Elaboración propia)*

Rellenos sanitarios.
Piscinas de recolección de lodos de perforación base aceite.
Plantas de tratamiento de aguas residuales.
Lagunas de oxidación.
Presas.
Coberturas finales de rellenos sanitarios.
Lagos Ornamentales
Tanques de almacenamiento de Químicos.

1.1.2.4 Geomembranas de PVC Reforzadas.

Cualquiera de las calidades de Geomembranas anteriormente mencionado puede ser fabricada con un alma de poliéster de alta tenacidad, lo que le genera una mayor resistencia a la tensión y al rasgado.

Las Geomembranas reforzadas son ideales para aquellas aplicaciones en que se requiere trabajo mecánico de la Geomembranas, algunas aplicaciones se muestran en la tabla 1.4.

Tabla 1.4 Aplicaciones de las geomembranas PVC reforzadas. *(Elaboración propia)*

Membranas Arquitectónicas.
Piscinas.
Tanques.
Geotanques de armado rápido.
Geotanques Helitransportables.
Geotanques auto contenibles.
Tapas flotantes.

1.1.2.5 Geomembranas de Polietileno de Alta Densidad (HDPE).

Estas Geomembranas están fabricadas a partir de 93% de resina de Polietileno de Alta Densidad que mezcladas con un 3% de aditivos antioxidantes y negro de humo, las hace muy resistentes al ataque de los rayos ultravioleta lo que garantiza una larga duración en condiciones expuestas y químicamente inertes, en otras palabras, son resistentes al ataque de ácidos, sales, alcoholes, bases, aceites e hidrocarburos, ya sean concentrados o diluidos. Su proceso de fabricación es por extrusión. A diferencia de las Geomembranas de PVC, en estas encontramos un solo tipo.

La única variación existente es el calibre en que se fabrica, los cuales son: 20, 30, 40, 60 y 80 milésimas de pulgada. Dependiendo de las necesidades del proyecto estas también pueden ser lisas o Texturizadas por una o las dos caras.

Estas Geomembranas son semi rígidas por lo que su instalación debe realizarse completamente en el sitio de la obra y aunque en los calibres bajos permite premodulación, no son recomendables, ya que al doblar el material se ocasionan esfuerzos de falla en los dobleces. La presentación de estas es en rollos de 5,8 a 7 metros de ancho y longitudes variables entre 380 m y 150 m, según el calibre.

BENEFICIOS DE LAS MEMBRANAS HDPE.

- Su principal función es ser una barrera impermeable.
- Por su baja permeabilidad son la mejor alternativa para la contención de cualquier tipo de fluido.
- Previene la contaminación por filtración del subsuelo y /o terrenos adyacentes donde se encuentren ubicados los proyectos.
- Evita la pérdida de fluidos.
- Evita las humedades en cimentaciones.
- Presenta una alta relación beneficio costo versus otros sistemas de impermeabilización.

El polietileno tubular es una presentación alternativa a la geomembrana de polietileno, simplemente se diferencian en su forma ya que el de este es alargado y viene en rollos.

Según Pedraza (2002) en un estudio comparativo realizado sobre los materiales reporta que el uso de cualquiera de estos materiales no afecta en la producción del biogás, así como tampoco afecta a los parámetros de operación de un biodigestor.

Se utilizan con éxito en la impermeabilización de una amplia gama de proyectos y soluciones de geotecnia como las mostradas en la tabla 1.5.

Tabla 1.5 Aplicaciones de las geomembranas de polietileno de alta densidad. *(Elaboración propia)*

Reservorios agrícolas para almacenamiento de aguas limpias.
Piscinas de recolección de lodos petroleros.
Diques y Presas.
Rellenos Sanitarios.
Pilas de lixiviación.
Lagunas de Oxidación.
Tanques de almacenamiento de líquidos.

1.1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS BIODIGESTORES.

1.1.3.1 Ventajas de los Biodigestores.

- Es una energía renovable y sustentable.
- Aprovecha la producción natural del biogás.
- Es posible utilizar los productos secundarios como abono o fertilizante.
- Evita el uso de leña local, reduciendo así la presión sobre los recursos forestales.
- Fomenta el desarrollo sustentable.
- Redirige y aprovecha los gases de efecto invernadero producidos por los vertederos y granjas industriales, lo cual reduce la huella de carbono de estos establecimientos y disminuye su contribución al cambio climático.
- Cumple con la normatividad nacional e internacional.
- Impide la contaminación de mantos acuíferos.
- Crea empleos especializados.
- Crea la posibilidad de incursionar un proyecto de vanguardia.

1.1.3.2 Desventajas y Riesgos de los Biodigestores.

- Idealmente, la ubicación debe de estar cerca de donde se recolecta la biomasa.
- La temperatura de la cámara de digestión debe mantenerse entre 20° C y 60° C; puede ser limitante en lugares extremos.

- El biogás contiene un subproducto llamado sulfuro de hidrógeno, el cual es un gas corrosivo y tóxico para los seres humanos.
- Al igual a cualquier otro gas combustible, existe el riesgo de explosión o incendios por un mal funcionamiento, mantenimiento o seguridad.

1.1.4 TIPOS DE BIODIGESTORES.

Hay muchos tipos de plantas de biogás, pero los más comunes son el domo flotante (indio) y el domo fijo (chino). La pobre aceptabilidad de muchos de estos biodigestores ha sido principalmente debida a los costos altos, la dificultad de instalación y problemas en la consecución de las partes y repuestos.

1.1.4.1 Pozos Sépticos.

Es el más antiguo y sencillo digestor anaerobio que se conoce, utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas. Se cree que de allí deriva el uso potencial de los gases producidos por la fermentación anaeróbica, para el uso doméstico.

Para la correcta operación de estos pozos es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en él, de las que contienen jabón o detergentes. El efecto de los jabones y en especial los detergentes, inhibe la acción metabólica de las bacterias, razón por la que los pozos se colmatan con rapidez y dejan de operar, haciendo necesario destaparlos frecuentemente para recomenzar la operación. Cuando no es posible separar las aguas negras de las jabonosas, como en el alcantarillado urbano, es necesario hacer un tratamiento químico con polímeros a esta agua a fin de solucionar el problema antes de iniciar la fermentación anaeróbica.

1.1.4.2 Biodigestor de Domo Flotante (India).

Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero, pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón.

Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que se desplaza por una guía central. Este biodigestor trabaja a presión constante y es muy fácil su operación ya que fue ideado para ser manejado por campesinos de muy poca preparación. El reactor se alimenta semicontinualmente a través de una tubería de entrada. (Ver figura 1.1)

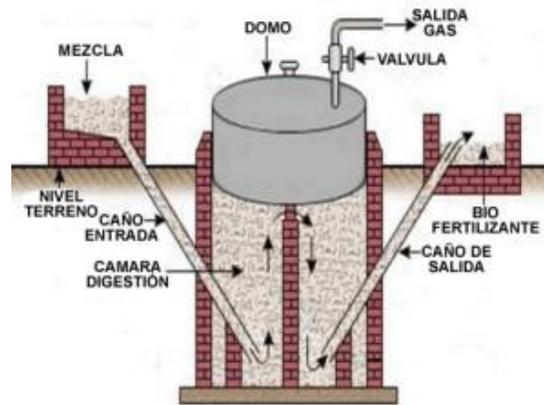


Figura 1.1 Biodigestor de Domo Flotante. (ONI, 2004)

1.1.4.3 Biodigestor de Domo Fijo (China).

Este reactor consiste en una cámara de gas de volumen constante construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cúpula y el fondo son hemisféricos y están unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas de mortero para hacerlo firme. La tubería de la entrada es recta y los extremos nivelados. Hay un tapón para inspección en la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo que al no ser flexible varía los volúmenes del digestor en la cámara del efluente, con presiones en el domo entre 1 y 1.5 m de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante

altas y es la razón por lo que la cúpula y el fondo deben ser redondos. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor. (Ver figura 1.2)

Más de cinco millones de biodigestores se han construido en China y ha funcionado correctamente (FAO, 1992) pero, desgraciadamente, la tecnología no ha sido tan popular fuera de China. Esta instalación tiene como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a 20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

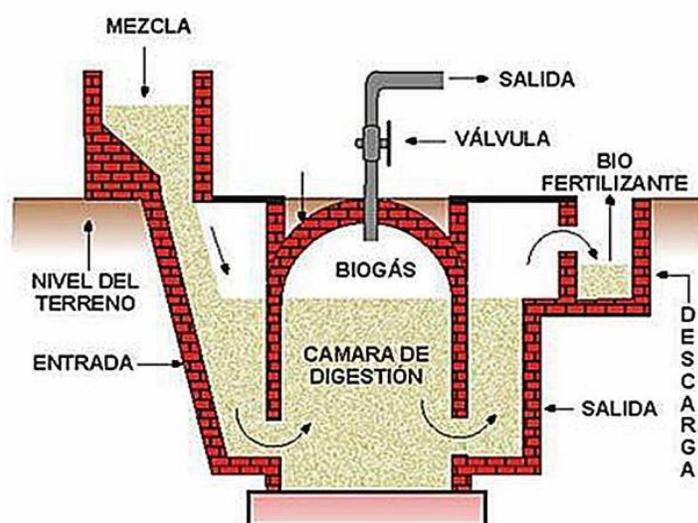


Figura 1.2 Biodigestor de domo fijo. (ONI, 2004)

1.1.4.4 Biodigestor de Estructura Flexible.

La inversión alta que exigía construir el biodigestor de estructura fija resultaba una desventaja limitante para el bajo ingreso de los pequeños granjeros. Esto motivó a ingenieros en la Provincia de Taiwán alrededor de 1960 (FAO, 1992) a hacer biodigestores de materiales flexibles más baratos. Inicialmente se usaron nylon y neopreno, pero demostraron ser relativamente costosos. Estos materiales fueron reemplazados después por polietileno (generalmente una lámina de plástico de las que se usan en los invernaderos) menos costoso y que es ahora el material más comúnmente usado en América Latina, Asia, África.

Desde 1986, el Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), ha estado recomendando biodigestores de plástico económico como la tecnología apropiada por hacer mejor uso de excrementos del ganado, reduciendo la presión en otros recursos naturales.

En este digestor el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con Biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma. (Ver figura 1.3)



Figura 1.3 Biodigestor de Estructura Flexible. (ONI, 2004)

1.1.4.5 Digestor Flotante.

Un rasgo innovador de usar polietileno tubular es que los biodigestores pueden localizarse para flotar en cualquier superficie de agua, con la mitad sumergida, su boca se localiza sobre el nivel de agua más alto, mientras la toma de corriente debe ajustarse a un objeto flotante, como un coco seco o un recipiente de plástico. (Ver figura 1.4)

En Vietnam más de 5% de los biodigestores flotantes se ubican en estanques que facilitan su instalación, generalmente donde el espacio de las granjas es limitado.



Figura 1.4 Biodigestor Flotante. (ONI, 2004)

1.1.4.6 Digestor con Tanque de Almacenamiento Tradicional y Cúpula de Polietileno.

Otro tipo de planta de producción de biogás que ha logrado disminuir los costos hasta un 30 % con respecto a los prototipos tradicionales, es la que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales. (Ver figura 1.5)

Este tipo de instalación posee a su favor que resulta más económica que los sistemas tradicionales; por ejemplo, una instalación de 4 m³ puede costar, aproximadamente, \$550 USD, y la estructura de polietileno flexible puede llegar a alcanzar hasta diez años de vida útil.

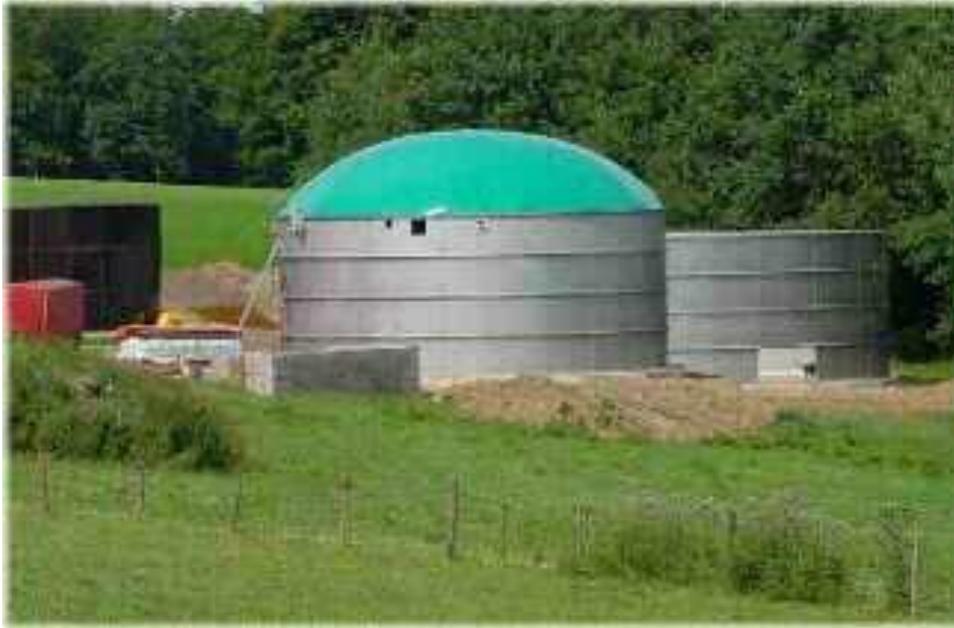


Figura 1.5 Digestor con Tanque de Almacenamiento Tradicional y Cúpula de Polietileno.
(Cubasolar, 2007)

1.1.4.7 Biodigestores de Alta Velocidad o Flujo Inducido.

Estos son los utilizados comúnmente en instalaciones industriales o semi-industriales. Generalmente trabajan a presión constante, por lo que se podrían catalogar como digestores tipo hindú modificado.

Se diferencian de los digestores convencionales en que se les ha agregado algún tipo de agitación mecánica, continua o intermitente, que permite al material aún no digerido, entrar en contacto con las bacterias activas y así obtener buena digestión de la materia orgánica, con tiempos de retención hidráulica relativamente cortos, de hasta 15 días. Esto se consigue gracias a la desintegración de partículas grandes en otras más pequeñas, que aumentan el área de contacto y por lo tanto la velocidad de digestión.

Este es un concepto nuevo dentro de la tecnología de fermentación anaeróbica, combina las ventajas de varios tipos de digestores en una sola unidad, facilitando el manejo y procesamiento de material biodegradable de diverso origen y calidad.

1.1.4.8 Instalaciones Industriales.

Las instalaciones industriales de producción de biogás emplean tanques de metal que sirven para almacenar la materia orgánica y el biogás por separado (Ver Figura 1.6). Este tipo de planta, debido al gran volumen de materia orgánica que necesita para garantizar la producción de biogás y la cantidad de biofertilizante que se obtiene, se diseña con grandes estanques de recolección y almacenamiento construidos de ladrillo u hormigón.

Con el objetivo de lograr su mejor funcionamiento se usan sistemas de bombeo para mover el material orgánico de los estanques de recolección hacia los biodigestores, y el biofertilizante de los digestores hacia los tanques de almacenamiento. También se utilizan sistemas de compresión en los tanques de almacenamiento de biogás con vistas a lograr que éste llegue hasta el último consumidor. Para evitar los malos olores se usan filtros que separan el gas sulfhídrico del biogás, además de utilizarse válvulas de corte y seguridad y tuberías para unir todo el sistema y hacerlo funcionar según las normas para este tipo de instalación.

La tendencia mundial en el desarrollo de los biodigestores es lograr disminuir los costos y aumentar la vida útil de estas instalaciones, con el objetivo de llegar a la mayor cantidad de usuarios de esta tecnología.



Figura 1.6 Instalaciones industriales de biodigestores. (*Sustentarty, 2012*)

En función de los flujos de entrada y salida, la operación de un biorreactor puede ser de tres modos distintos:

I) Lote o discontinuo (Batch):

Se cargan de una vez en forma total, descargándose cuando han dejado de producir biogás o la biomasa está suficientemente degradada.

Consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás. Este sistema es aplicable en situaciones particulares, como de materia orgánica a procesar está disponible en forma intermitente. En estos casos normalmente se usa varios digestores cargados en diferentes tiempos para mantener la continuidad del suministro de gas.

II) Lote alimentado o semicontinuo (Fed-Batch):

Es el tipo de digestores más usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los que más difusión tuvieron en un principio, fueron el tipo Chino y el tipo Hindú. Más adelante se han desarrollado nuevas tecnologías de diversas aplicaciones.

III) Continuo:

Fueron desarrollados principalmente para el tratamiento de aguas negras, extendiéndose su uso, en la actualidad, al manejo de otros sustratos.

En general son plantas muy grandes en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto este tipo genera una gran cantidad de biogás el que a su vez es aprovechado en aplicaciones de las grandes industrias o en la demanda de gas de una población, colocándolos dentro de la red de la ciudad.

1.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL SALVADOR.

A continuación, se presentan algunos de los biodigestores que se encuentran en el país.

A) Biodigestor Granja San José:

La granja San José está ubicada en el Km 63 de la carretera que conduce a San Isidro y Sensuntepeque. Posee tres biodigestores de iguales dimensiones que se utilizan para el tratamiento de las excretas de los cerdos provenientes de la granja; por lo que previamente fueron dimensionados para ajustarse a la disponibilidad y producción de las excretas porcinas, así como a la topografía del lugar de construcción.

B) Biodigestor Hacienda Miravalle:

El biodigestor Miravalle se encuentra ubicado en la Hacienda del mismo nombre, cantón El Rosario, Municipio de El Porvenir, Santa Ana. Fue construido en el año 2008, con una capacidad proyectada de 15 kW, utilizando como materia prima estiércol de ganado bovino. Cuenta con una sección de 9.8 x 7.2 m, con 6 cámaras de carga a efecto que el material sea distribuido uniformemente en el reactor. Posee una zona efectiva de reacción de 170 m³, aunque la estructura original contaba con una zona de descarga aproximada de 61.6 m³ para la acumulación del material previamente tratado en el digestor.

C) Beneficio Atapasco:

El Beneficio Atapasco, perteneciente al grupo CAFECO S.A. de C.V., se dedica al procesamiento de café de exportación. Dicho Beneficio está ubicado en las afueras del municipio de Quezaltepeque, departamento de La Libertad. Desde el año 2000 han implementado medidas orientadas al aprovechamiento de los productos excedentes, así como de los productos de desperdicio del procesamiento del café (transformación del grano uva en grano oro de café), todo esto enfocado en la minimización de los impactos ambientales ocasionados por la liberación de estos desechos que son nocivos para el medio ambiente. Con el propósito de tratar las aguas residuales (aguas mieles) que se generan, dicho beneficio construyó un reactor tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), el cual entró en

funcionamiento en la temporada 2000-2001. Originalmente el reactor fue construido con el único fin de tratar las aguas de procesos y no concibió la utilización del biogás, producto del proceso anaeróbico del mismo. Hoy en día, en busca de mejorar la eficiencia energética del beneficio, se ha proyectado la utilización del biogás en los procesos de producción, para lo cual se han considerado dos opciones:

- Generación de energía eléctrica
- Utilización del biogás como combustible para la generación de vapor en las calderas.

Luego del proceso de tratamiento, el agua una vez que ha sido retenida por aproximadamente ocho horas, se libera en un estanque adyacente al reactor, el cual se utiliza para riego. Los valores de acidez (pH) que se manejan en el influente oscilan entre 4 y 11 unidades, y los cuales son modificados (en caso de ser necesario) mediante la añadidura de Hidróxido de Sodio (NaOH). En el efluente los valores de acidez que se encuentran oscilan entre 6.5 y 7.20 unidades. El agua obtenida luego del proceso de tratamiento se almacena en un estanque aledaño y sirve como medio de riego en época seca.

Nuestra investigación tendrá de referencia los Biodigestores ubicados en Industrias la Constancia y AGROSANIA S.A de C.V. que se mencionan a continuación:

1.2.1 BIODIGESTOR INDUSTRIAS LA CONSTANCIA.

Industrias la constancia es uno de los productores de biogás más importantes en el país, este proceso inicio en el año 2008 con el proyecto del levantamiento de una planta de tratamiento de aguas, provenientes de diferentes procesos que se llevan a cabo en la planta de producción de cervezas.

El primer paso es hacer pasar los efluentes por una criba automática que separa los sólidos que son demasiado grandes para la planta, los cuales son descartados del proceso y se pasa al siguiente paso.

1.2.1.1 Etapa Anaerobia

Primera etapa

Luego, el proceso de tratamiento de agua inicia con la descarga de los efluentes en un tanque de homogenización, en donde se deja reposar esta agua un tiempo entre 24 y 27 horas. En esta primera etapa se comienzan a producir ciertos gases en un inicio esta etapa era realizada con un domo de hule para evitar el escape de los olores producidos por los gases, pero dado que el mantenimiento de este domo era un gasto demasiado grande para la empresa se decidió deshacerse del mismo en esta etapa y quedar a merced de los gases producidos en este tanque. Un factor importante a controlar en esta etapa es el pH del agua, que debe permanecer en un valor entre 8 y 10. En general las aguas que entran en el tanque poseen estas condiciones, sin embargo, cuando la producción es de un producto en específico, las condiciones de pH varían, por lo que se activa la alimentación de ácido clorhídrico si el pH es demasiado alto, o en su defecto, hidróxido de sodio si el pH es demasiado bajo.

Cabe destacar que, según el encargado de la planta de tratamiento, en su experiencia trabajando en este lugar, las bacterias regulan el ambiente que a ella les conviene para poder desarrollarse, y no ha tenido necesidad de controlar el pH, pero no es un hecho demostrado, por lo que no está de más contar con el sistema de regulación de pH.

Segunda etapa

Luego pasa a un tanque de acidificación, donde las bacterias acetogénicas comienzan la descomposición anaeróbica, también conocida como hidrólisis. En esta etapa las cadenas largas de carbono son atacadas por estas bacterias y convertidas a cadenas cortas de carbono, para facilitar la producción de biogás en la siguiente etapa. El tiempo de retención en este tanque es de alrededor de 13 horas. En esta etapa ya hay formación de biogás, aunque en cantidades muy pequeñas, por lo tanto, no se aprovechan.

Tercera etapa

En esta etapa es en donde se da la producción de biogás, se divide en dos fases, una de carga alta, en donde se reciben los lodos de la etapa anterior, y la de carga baja que recibe los lodos tratados de la etapa de alta carga. En esta etapa se da la actividad de las bacterias metanogénicas, las cuales son las encargadas de producir el biogás. El biogás producido en esta etapa es utilizado como combustible de calderas en el proceso de producción de cerveza. En ciertas ocasiones la producción de biogás es más grande que la demanda energética de la planta, por lo que se recurre a la quema de este exceso por medio de una antorcha, evitando así la descarga de metano a la atmósfera, gas que tiene 21 veces el potencial de calentamiento global del CO₂ (GWP por sus siglas en inglés).

1.2.1.2 Etapa Aerobia

Finalmente, los lodos son trasladados a una piscina en donde se bombea oxígeno al agua, por medio de tuberías que pasan a lo largo de la piscina de recolección, que además de la función de inyección de oxígeno, también funciona como mezclador del agua. Finalmente se obtiene dos efluentes, el de agua tratada, y el lodo, que es prensado y puede ser utilizado como abono.

La figura 1.7 presenta un diagrama del proceso:

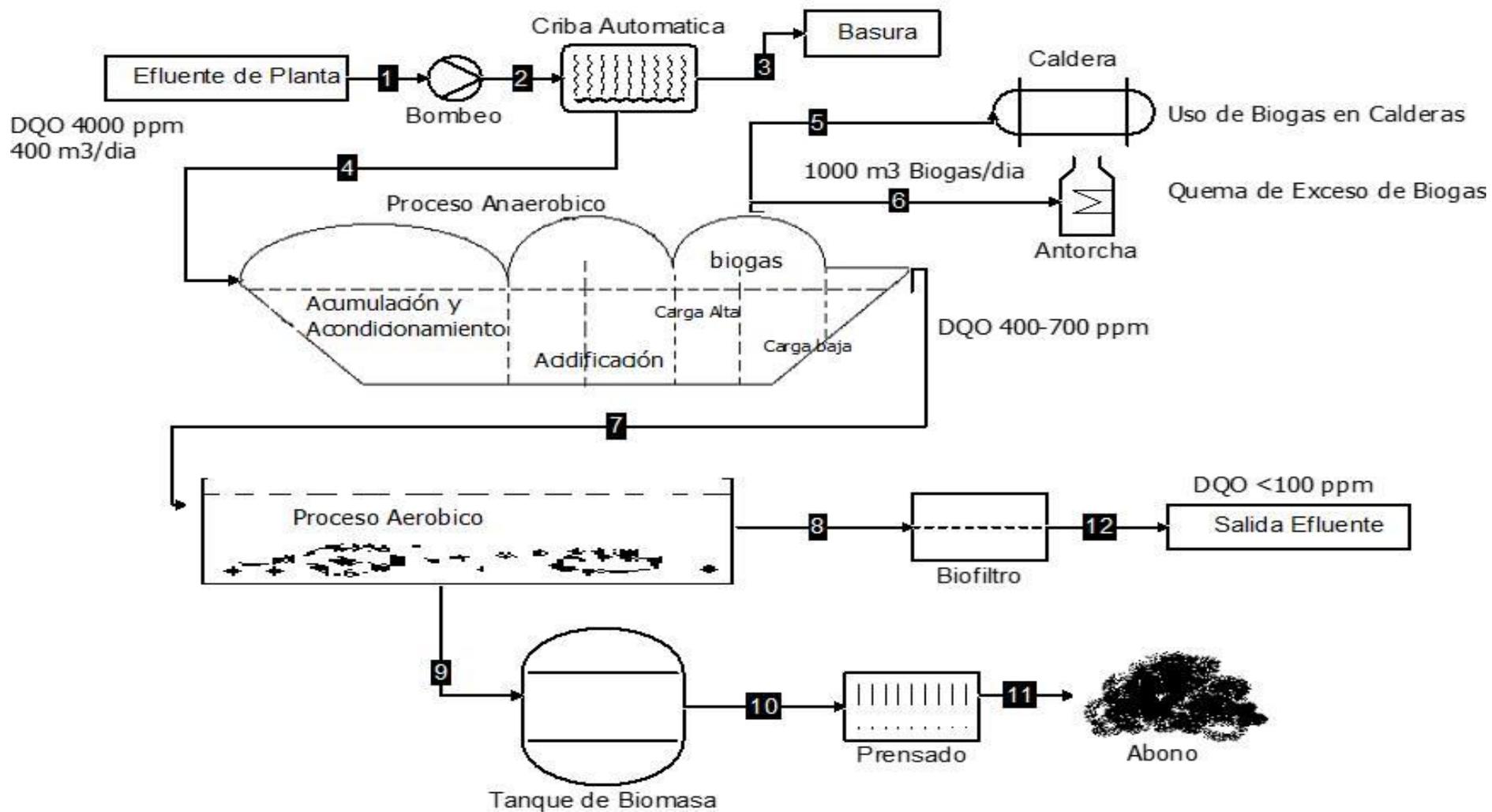


Figura 1.7 Diagrama de elaboración de biogás Industrias la Constancia. *(Elaboración propia)*

1.2.2 BIODIGESTOR AGROSANIA S.A. DE C.V.

1.2.2.1 Descripción General.

AGROSANIA San Julián es una empresa que se dedica al procesamiento de productos lácteos, siembra de café, crianza de ganado porcino y la producción de biogás a partir de los desechos generados en sus rubros.

Otro factor a destacar es que producen biogás, el cual es utilizado como combustible de calderas que se utilizan en el proceso de operación de la planta. La producción de biogás en la planta de AGROSANIA es a partir de los residuos de la industria y desechos de la granja porcina.

Actualmente, además de utilizar el biogás como combustible de calderas, también se inyecta energía eléctrica a la red pública, cabe destacar que la demanda energética de la planta, no es cubierta por el biodigestor, por lo que se utiliza energía externa para el proceso de producción.

1.2.2.2 Producción de Biogás.

Los residuos de la planta láctea como sueros, grasas y aguas blancas son mezclados con las aguas residuales de la granja porcina, estas aguas mezcladas son bombeadas 600 m hacia el tanque de equalización que es el pozo de alimentación para el biodigestor. Al tanque de equalización se le agregan cantidades de suero dependiendo de las necesidades que tenga el biodigestor. Las aguas del tanque de equalización son transportadas por medio de una tubería de 8", 200 m hasta el biodigestor.

El biodigestor con el que se cuenta en la planta tiene unas medidas de 13 m de ancho x 16 m de largo con 5 m de profundidad tipo trapecio.

Las condiciones de operación del biodigestor son de pH = 6.5-7.5 con una presión entre 1-2 mbar, el biodigestor recibe agitación por periodos de 30 minutos por las noches, para evitar

la localización en lugares específicos de las bacterias y la materia orgánica. El biogás obtenido posee una concentración de 100 ppm de H₂S por lo que por medio de un compresor son alimentados 60 L de O₂ cada 2 horas para lograr bajar la concentración del H₂S.

Los lodos residuales del proceso en el biodigestor son bombeados por medio de bombas positivas hacia unas pilas de secado, pasando primero por un secado bajo el sol y luego continúa el secado bajo techo. El gas obtenido es enviado 600 m hacia la planta por medio de un compresor, antes de ser utilizado en las calderas es enviado a un proceso de filtración con carbón y un filtro de óxido ferroso para lograr reducir la concentración de H₂S hasta las 30 ppm.

El biogás que se obtiene posee una concentración máxima de metano de 65 % con un flujo de 75 m³/h con un poder calorífico de 36000 BTU/m³. Además de esto el proceso posee una antorcha que se activa cuando la presión excede los 2 mbar, para evitar cualquier tipo de accidentes.

La figura 1.8 muestra un esquema del proceso de producción de biogás en la planta de AGROSANIA:

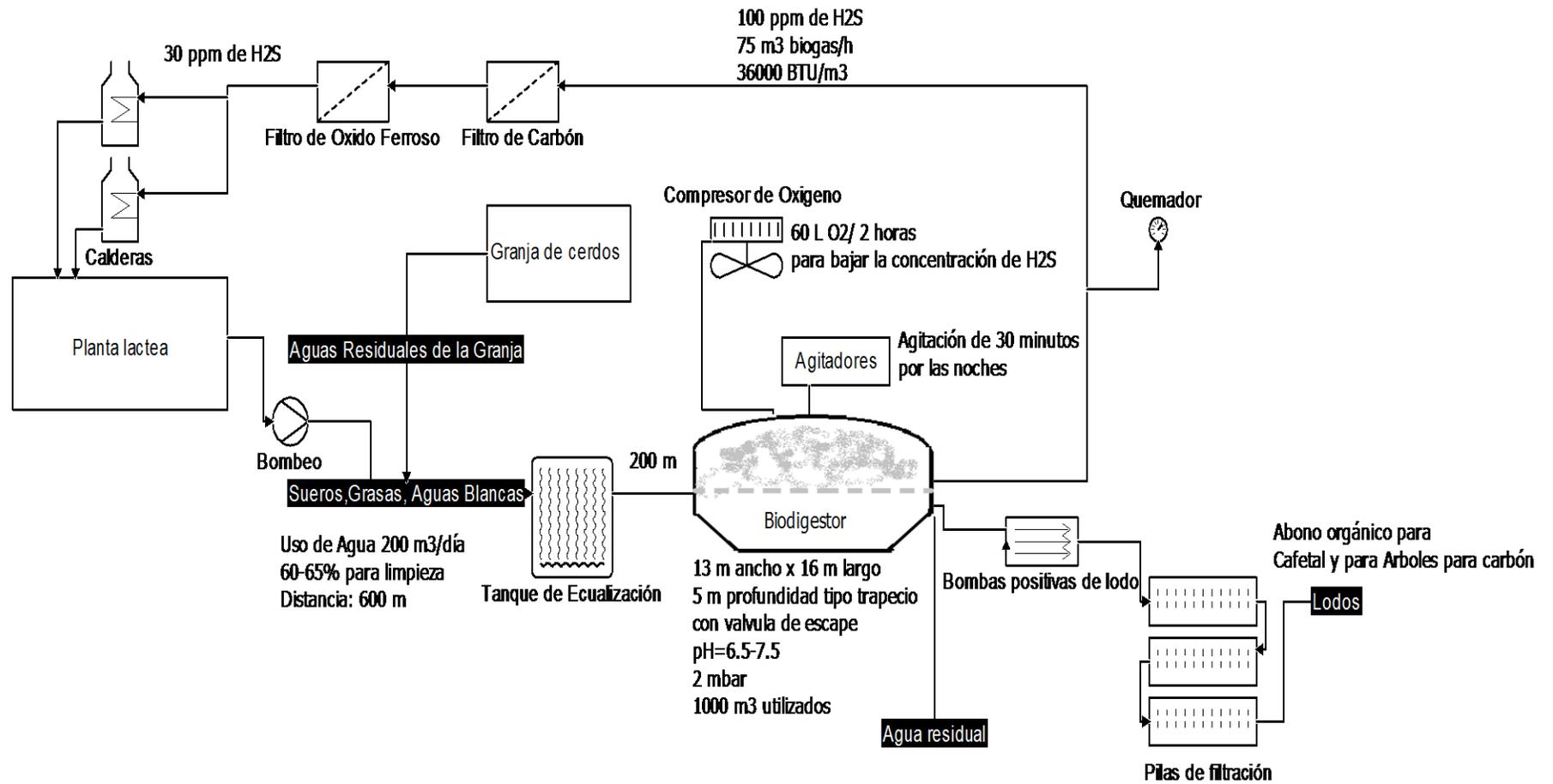


Figura 1.8 Diagrama de elaboración de biogás AGROSANIA S.A. de C.V. (Elaboración propia)

CAPÍTULO II: MÉTODOS DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.

2.0 MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE CO₂ Y H₂S.

El biogás, a pesar de su bajo poder calorífico, puede ser quemado directamente y convertido en energía eléctrica, mientras que el biogás purificado puede ser inyectado en la red de gas natural, utilizado como combustible para vehículos, como materia prima para la industria química o bien como combustible con un mayor poder calorífico para generar electricidad y calor. (Álvarez, 2016)

La mejora o purificación del biogás consiste en la remoción de gases no combustibles, considerados contaminantes, tales como CO₂ y H₂S, los cuales reducen el valor calorífico del biogás y hacen poco rentable el proceso de compresión del biogás. De esta manera se logra la obtención de un alto porcentaje del CH₄, el cual se caracteriza por ser incoloro, insípido e inodoro, además de ser efectivo energéticamente para su aplicación como combustible. (Kapdi *et al.*, 2004)

El CO₂ es uno de los principales componentes del biogás, y al no tener un valor energético como el CH₄, conlleva a que el biogás producido no tenga una alta eficiencia como combustible. Su remoción es necesaria para que el biogás presente un alto valor energético. Además, debe ser eliminado para poder obtener un porcentaje conocido de CH₄, que asegure una calidad consistente de biogás. Igualmente, al remover el CO₂, se asegura un volumen fijo o constante del metano almacenado. (Valerio, 2010)

Se están usando una variedad de procesos para eliminar CO₂ del biogás en industrias petroquímicas. Varios mecanismos básicos están implicados para lograr separación de los componentes del gas. Estos pueden incluir la absorción física o química, adsorción sobre una superficie sólida, separación por membrana, separación criogénica y conversión. (Kapdi *et al.*, 2004)

Otro de los contaminantes del biogás es el sulfuro de hidrógeno (H_2S) cuya eliminación se ha convertido en el principal motivo de investigación. Al reaccionar con el agua forma ácido sulfúrico que es altamente corrosivo, lo que constituye una gran desventaja, pues causa la corrosión severa de las partes o el equipo metálico utilizado para el aprovechamiento del biogás. Además, el H_2S es altamente inflamable, por lo que con concentraciones en el aire entre 4.3 y 46% puede generar una explosión por ignición. (Valerio, 2010)

El H_2S siempre está presente en el biogás, aunque las concentraciones dependen de la materia prima. Es preciso la separación de H_2S del biogás para evitar la corrosión en compresores, tanques de almacenamiento de gas y motores. El H_2S es venenoso y corrosivo, además, mediante combustión es convertido en dióxido de azufre (SO_2), otro contaminante tóxico que contribuye al fenómeno de la lluvia ácida en la atmósfera. (Kapdi *et al.*, 2004)

Además, el sulfuro de hidrógeno genera contaminación del aire, ya que su presencia o liberación conlleva a malos olores, lo que afecta el establecimiento de biodigestores a nivel industrial. (Valerio, 2010)

Considerando esas características tan particulares del sulfuro de hidrógeno se requiere de procesos prácticos y de bajo costo para la desulfuración y el manejo adecuado de un biodigestor productor de biogás de calidad. (Acosta *et al.*, 2009)

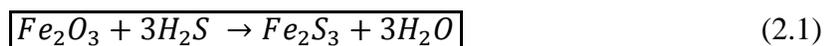
Actualmente, existen tecnologías de purificación de biogás de tipo físico-químico, eficientes, pero presentan altos costos de adquisición y de operación, y sólo en los últimos años se ha dado importancia a posibles métodos biológicos de purificación. Mediante éstos últimos, distintos tipos de microorganismos pueden utilizarse como agentes de transformación, conformando biofiltros con potencialidad de separar mezclas gaseosas, y de esta manera poder disminuir los altos costos presentados por los sistemas de purificación que emplean métodos físicos y químicos. (Varnero *et al.*, 2012)

2.1 MÉTODOS DE SEPARACIÓN H₂S-CH₄

2.1.1 ABSORCIÓN QUÍMICA

2.1.1.1 Tecnologías Secas

Las tecnologías secas se conforman de sustratos por donde fluye el biogás libremente, reaccionando química o físicamente con el mismo reteniendo así el H₂S, a su paso. El sustrato seco más utilizado es óxido de hierro, el cual reacciona con el H₂S, para formar sulfuro de hierro, (ecuación 2.1) un compuesto no gaseoso, por tanto, no podrá seguir el flujo con el biogás (Viquez 2010).



Comúnmente en los biodigestores se ha utilizado alambriña para limpiar el biogás, pero este método no daba los resultados esperados. Existen decenas de manuales, en los que se indica la colocación de una alambriña dentro de la tubería, con la indicación de que la misma será suficiente para la remoción de H₂S en el biogás.

La alambriña, conforme se aprecia en la Figura 2.1 a), es acero, o sea una aleación de hierro y carbono. Como se expresa en la ecuación 1, la reacción de H₂S con hierro, es con óxido de hierro (Fe₂O₃), en otras palabras, la misma debe estar oxidada para poder surtir efecto Figura 2.1 b). (Viquez 2010).



Figura 2.1 a) Alambriña. b) Alambriña oxidada. (Viquez, 2010)

Existen más de 60 formas de óxido de hierro, formando diferentes tipos de estructuras cristalinas y cada uno tendrá una reacción química diferente con el H_2S , por tanto, su eficiencia es variable. Por otro lado, las reacciones de oxidación son difíciles de controlar, lo que cuestiona el uso de las alambresas oxidadas caseramente, para efectos de remoción del sulfuro de hidrógeno en el biogás. Por último, aunque se busque tener Fe_2O_3 , a veces, las reacciones de oxidación forman Fe_3O_4 ($Fe_2O_3 \cdot FeO$) (McKinsey, 2003).

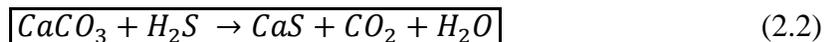
2.1.1.2 Tecnologías Húmedas

Otra forma de remover el H_2S en el biogás es utilizando sustratos líquidos. Una de las opciones es el uso de agua, pues el H_2S presenta una gran capacidad de disolución. Para esto, se utilizan equipos llamados lavador de gases (Figura 2.2), la cual hace pasar la corriente de biogás contra una corriente de agua en sentido contrario.



Figura 2.2 Lavado de gases. (Viquez, 2010)

Otra sustancia líquida de uso común es el agua de cal (carbonato de calcio disuelto en agua). Para esto, se utiliza el mismo concepto de lavado de gases; pero en lugar de emplear agua, se usa carbonato de calcio disuelto en agua. Químicamente, la reacción que ocurre es la siguiente:



Lo anterior significa que por cada mol de H₂S, que se quiera filtrar, se requiere de 1 mol de CaCO₃. En otras palabras y luego de una serie de cálculos, por cada m³ de biogás, que contenga 1000 ppmv (en volumen) de H₂S, se necesitan 4.5 g de CaCO₃ puro. (Viquez, 2010).

2.1.2 MÉTODOS BIOTECNOLÓGICOS

Además de las técnicas fisicoquímicas para la purificación de biogás, existen métodos biológicos o de biofiltración, que han sido probados a escala de laboratorio y piloto. El tratamiento biológico o purificación biológica en términos generales es un proceso en el cual los gases contaminados son tratados al hacerlos entrar en contacto con un medio biológicamente activo (Environmental Protection Agency; EPA, 2004).

Los procesos biológicos enfocados a la purificación de gases son generalmente de oxidación, dando como resultado dióxido de carbono, agua, sulfato y nitrato (González, 2006).

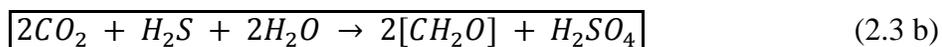
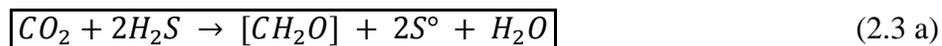
Estos métodos, utilizan la capacidad metabólica de algunos microorganismos que degradan sustancias contaminantes. El uso de microorganismos (Soreanu *et al.*, 2008) en la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, se basa en la oxidación microbiológica de H₂S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental (S⁰) o sulfatos (SO₄⁻²), fijando CO₂ simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro. De

esta forma, se puede lograr un enriquecimiento en metano, al remover CO₂ y eliminar el elemento (H₂S) más corrosivo y limitante respecto a usos posteriores del gas purificado.

La gran ventaja que presentan estas técnicas, respecto de los sistemas fisicoquímicos es la carencia de contaminantes secundarios, menores costos de inversión y operación por el bajo consumo de reactivos, menor consumo energético al poder trabajar a temperatura ambiente, altas eficiencias de degradación, biomasa inmovilizada en el sistema (Pérez y Villa, 2005). Sin embargo, el procedimiento es lento, siendo necesario buscar nuevos microorganismos que reduzcan los tiempos de residencia y hagan más competitivo el proceso a nivel industrial.

Estos sistemas biológicos, utilizan bioreactores o biofiltros de amplio uso (Soreanu *et al.*, 2005) para degradar contaminantes orgánicos como inorgánicos de una corriente gaseosa. En estos biofiltros se ubican los cultivos puros o mixtos de microorganismos (Kleerebezem y Mendez, 2002).

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



Existe una variedad de bacterias que oxidan el sulfuro de hidrógeno y, por lo tanto, pueden ser utilizadas como potenciales candidatos para la tecnología de desulfuración del gas (Friedrich *et al.*, 2001). Se encuentran bacterias aerobias azufre oxidantes tanto en condiciones alcalinas, neutras como ácidas, con rangos de temperatura de crecimiento mesófilo y termófilo; que pertenecen a géneros como *Acidianus*, *Acidithiobacillus*, *Aquaspirillum*, *Aquifex*, *Bacillus*, *Beggiota*, *Methylobacterium*, *Paracoccus*, *Pseudomonas*, *Starkeya*, *Sulfolobus*, *Thermitiobacillus*, *Thiobacillus* y *Xanthobacter*.

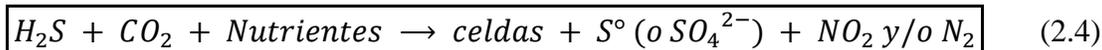
En cambio, las bacterias anaerobias azufre oxidante son comúnmente neutrófilas y mesófilas de géneros como *Allochromatium*, *Chlorobium*, *Rhodopseudomonas*, *Rhodovulum* y *Thiocapsa*. (Friedrich *et al.*, 2001). En cuanto a necesidades de fuente de energía y de carbono, se pueden distinguir los siguientes grupos:

- *Fotoautotrofos*, diversos estudios (Prescott *et al.*, 2003) demuestran que bacterias fototróficas del tipo "bacteria verde sulfurosa", tal como *Chlorobium limicola*, remueve H₂S en presencia de luz, CO₂ y nutrientes inorgánicos bajo condiciones estrictamente anaeróbicas, hasta la formación de azufre (ecuación 2.3 a) o de sulfato (ecuación 2.3 b).
- *Quimiolitotrofos o Quimioautótrofos*, los cuales fijan CO₂ como fuente de carbón y obtienen energía celular de la oxidación de compuestos inorgánicos, sin la necesidad de luz. Sin embargo, se tiene que evitar la oxidación de metano presente en biogás en concentraciones igual o mayor que la de CO₂. Por lo tanto, se tiene que fijar CO₂ bajo condiciones estrictamente anaeróbicas. Se logra la asimilación de CO₂ por quimioautótrofos mediante el Ciclo de Calvin-Benson en ausencia de luz.
- *Mixotrofos*, microorganismos que presentan metabolismo facultativo, pudiendo usar una fuente de carbono orgánica o inorgánica y la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos como fuentes de energía (Syed *et al.*, 2006).

Los principales microorganismos estudiados y que se emplean para la desulfuración, corresponden a los géneros *Beggiatoa*, *Xanthomonas Sulfolobus*, *Lectospirillum* y, especialmente, *Chlorobium* y *Thiobacillus* Uno de los géneros más estudiados para la purificación de sulfuro de hidrógeno, corresponde a la cepa *Pseudomona putida* aislada desde aguas residuales agrícolas con un pH óptimo entre 6 y 8. Se evaluó, que el principal producto metabólico de la oxidación del sulfuro de hidrógeno fue azufre elemental. Cuando fue inmovilizada en alginato de calcio, las células exhibieron una alta eficiencia de remoción del sulfuro de hidrógeno, que excedieron al 96 por ciento, a concentraciones de sulfuro de hidrógeno desde 10 hasta 150 partes por millón (ppm). La cepa inmovilizada tiene un alto

potencial para ser usada como agente para la remoción del sulfuro de hidrógeno (Valencia, 2002).

Otro de los géneros que destacan por los estudios realizados corresponde a *Thiobacillus*. Es así como, Soreanu *et. al* (2008), informan que se operó un sistema biológico anóxico, diseñado para tratar biogás y se inoculó con *Thiobacillus denitrificans* como parte de un consorcio cultivado de microorganismos, obtenidos a partir de lodo recuperado de una planta de tratamiento de aguas sanitarias, y enriquecido en nitrato. Se logró un nivel de remoción de H₂S de casi 100% durante un plazo operativo de 3,5 meses, lo que representa un tiempo de remoción excesivo, atribuible al hecho de trabajar con cultivos puros, con una bacteria específica. Esto se podría revertir utilizando cultivos mixtos (Soreanu *et al.*, 2005). Se asumió que el microorganismo desnitrificador, *T. denitrificans*, facilitó las transformaciones indicadas en ecuación 2.4.



Sin embargo, para evitar la oxidación de metano, se tendría que operar el sistema biológico bajo condiciones estrictamente anaeróbicas y además inhibir a la enzima metano monooxidasa (MMO), responsable de la oxidación, mediante la adición de inhibidores conocidos, como amonio, nitrato y nitrito. Los estudios que demuestran que nitrato, nitrito y el ion de amonio actúan como inhibidores de MMO y la oxidación de metano, señalan niveles de inhibición con cinéticas tipo Michaelis-Menton (Campos, *et al.*, 2008). Esto permite disponer de un aceptor de electrones para la cepa, facilitando las conversiones químicas deseadas y evitando la transformación no deseada. Bacterias clasificadas como desnitrificadores, como, por ejemplo, cepas de los géneros *Clostridium*, y *Bacillus* entre otras, podrían facilitar la fijación de CO₂, la oxidación de sulfuros y reducción de nitrato a nitrito. Esta situación tiene lugar, ya que, reductores de sulfato, a veces pueden coexistir con oxidantes de sulfuros, regenerando el donador de electrones utilizado por microorganismos desnitrificadores en la reducción de CO₂.

Al realizar pruebas con *Pseudomonas putida* (S1), *Citrobacter sp.* (S4) y *Enterobacter sp.* (S5), Valencia (2002) observó la decoloración del efluente en un 97%; además se redujo la DBO5, la DQO, compuestos fenólicos y el sulfuro de hidrógeno. Este último hasta un 96,67% en 24 horas de aireación. Se han empleado cultivos puros de células de *Thiobacillus thiooxidans* JCM 7814 utilizando como agente tampón el citrato de sodio. Otra alternativa es el empleo de bacterias fotosintéticas como la *Chlorobium limicola* (Friedrich *et al.*, 2001) y la forma de *Thiosulfatophilum* las cuales pueden convertir el sulfuro de hidrógeno a azufre elemental o sulfato. Posee altas velocidades de remoción, simples requerimientos de nutrientes y no necesita oxígeno ni esterilización. Este tipo de bacterias absorbe la mayor cantidad de luz cercana a longitudes de onda de 460 y 760 nanómetros (nm).

2.1.2.1 Diseño de Filtros Biológicos para la Purificación de Biogás.

Los microorganismos descritos anteriormente, necesitan de un soporte donde se puedan llevar a cabo los procesos y vías metabólicas. Para ello, existen sistemas que permiten que los microorganismos seleccionados, que se encuentren inmovilizados o en suspensión, mineralicen los compuestos a tratar. Los sistemas más utilizados son los biolavadores, biofiltros de lecho fijo (BLF) y biofiltros de lechos escurrido.

- **Biolavadores (Bioscrubbers)**

Esta tecnología está diseñada en base a dos etapas (Figura 2.3). En la primera (absorción) el contaminante a extraer es absorbido con agua en una torre de aspersion o columna. En la segunda (oxidación), la corriente líquida es tratada en un reactor biológico, de regeneración (Revah y Ortiz, 2004).

En la etapa de absorción, los contaminantes son transferidos a un medio acuoso hasta llegar a condiciones próximas a la saturación, el líquido proveniente de este proceso es recirculado al reactor biológico donde se lleva a cabo la oxidación por microorganismos, estos pueden

encontrarse libres o inmovilizados. Luego de haber disminuido la concentración del contaminante en el líquido éste es reciclado al absorbedor. El líquido contiene nutrientes inorgánicos que sostienen una población microbiana estable. Cuando la concentración del contaminante es muy alta, es posible inyectar aire para completar la oxidación (Revah y Ortiz, 2004).



Figura 2.3 Biolavador. (Revah y Ortíz, 2004)

- **Biofiltros de lecho fijo**

Como se observa en la figura 2.4, los biofiltros de lecho fijo es una tecnología en la cual se usan microorganismos fijados a un medio poroso (lecho) con el fin de degradar contaminantes presentes en las corrientes de aire de salida de procesos. (EPA, 2004).



Figura 2.4 Biofiltro de lecho fijo. (Revah y Ortíz, 2004)

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

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

El material orgánico cumple la función de entregar soporte (medios sobre los cuales viven los microbios) y en algunos casos proporcionar nutrientes necesarios para los microorganismos (Ramírez, 2007).

La eficiencia de remoción de partículas, dependerá de varios factores relacionados con el diseño de los biofiltros y las propiedades de los contaminantes presentes en el gas a tratar. El coeficiente de Henry y las solubilidades en agua son propiedades de los contaminantes que deben considerarse para lograr una remoción eficiente. La eficiencia de remoción del H_2S , lograda por los biofiltros oscila entre un 90 y un 100%. La eficiencia de remoción lograda por los compuestos orgánicos volátiles (VOCs), en general oscila entre un 20 a un 90%, incluso con aquellos contaminantes fácilmente biodegradables como el tolueno y la acetona.

- **Biofiltros de Escurrimiento (biotrickling filters)**

Esta tecnología consiste en un biofiltro empaquetado con un soporte sintético, y es en éste donde se forma una película microbiana (Figura 2.5). La corriente de gas contaminado es inyectada en la parte inferior del biorreactor y atraviesa el lecho, al mismo tiempo por la parte superior se añade una solución recirculada encargada de aportar nutrientes, humedad, pH y eliminar los productos de degradación. Aquí la absorción de gases y degradación de contaminantes suceden dentro del mismo reactor (Ramírez, 2007).

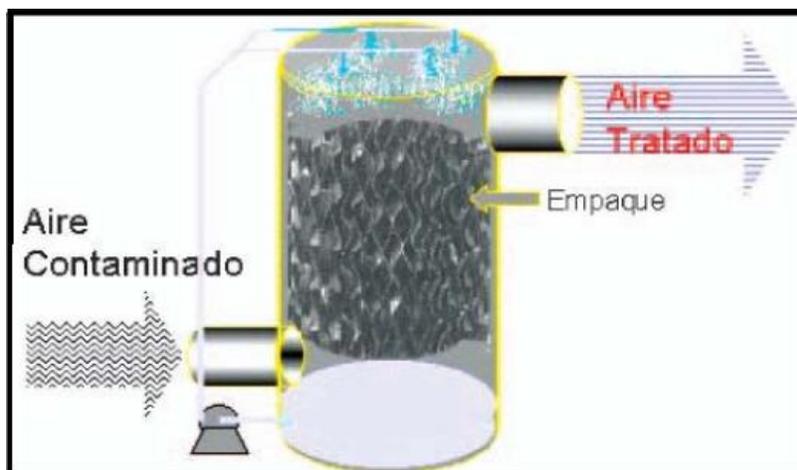


Figura 2.5 Biofiltro de lecho escurrido. (Revah y Ortíz, 2004)

En los filtros de escurrimiento los procesos de absorción de gases y regeneración de la fase líquida ocurren simultáneamente. Generalmente sus columnas se encuentran empaquetadas con un material generalmente de plásticos estructurados o aleatorios, el cual permite el desarrollo de una biopelícula, ayudando al aumento de la densidad celular volumétrica (Revah y Ortiz, 2004).

Por lo general el área específica del empaque (área de contacto por unidad de volumen de columna) es relativamente baja (100 a $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$) y se recomienda volúmenes vacíos altos (90 a 95%) para minimizar la caída de presión en la columna y el riesgo de que el espacio vacío sea obstruido por el crecimiento microbiano (Revah y Ortiz, 2004).

En los filtros de escurrimiento se alcanzan valores de densidad de microorganismos de hasta $60 \text{ kg. SST m}^{-3}$ (sólidos suspendidos totales) lo que incrementa la eficiencia de remoción volumétrica (Revah y Ortiz, 2004).

Esta configuración de biorreactor es recomendada cuando se trabaja con compuestos de oxidación que no son volátiles y existe acumulación en la fase líquida, como por ejemplo cuando se origina sulfato por la oxidación del sulfuro. Al existir acumulación disminuye el

pH durante la degradación y en concentraciones altas son inhibitorios para los microorganismos (Revah y Ortiz, 2004).

Generalmente como soporte se utilizan materiales como polímeros, cerámicas, zeolita, carbón activo o mezcla de varios materiales (Ramírez, 2007).

La mayoría de la descomposición lograda por los filtros ocurre en la película bacteriana, aunque en ciertos casos, un nivel de actividad significativa se encuentra en la fase líquida reciclada. La remoción de contaminantes es el resultado de una combinación compleja de transferencias de masa, difusión, convección y procesos biológicos. Todos los factores afectan las condiciones operativas del sistema y también influyen en la eficiencia de remoción de contaminantes, como en las condiciones, las cinéticas y dinámicas del filtro.

2.1.3 ADSORCIÓN FÍSICA

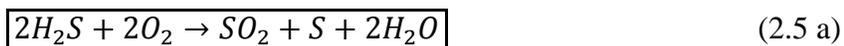
La adsorción es la unión de los átomos, iones o moléculas de un gas o de un líquido (adsorbato) a la superficie de un sólido (adsorbente). Las operaciones de adsorción se basan en la capacidad de ciertos sólidos de extraer con preferencia ciertas sustancias de una solución, concentrándola sobre su superficie. A estos procesos también se les denomina de lecho seco y para la purificación de gases combustibles, los adsorbentes más empleados son: alúminas, sílicagel, carbón activado y tamices moleculares (González 2006).

El proceso de adsorción ocurre sobre la superficie del adsorbente donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles y los factores que influyen en el mismo son la humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de partículas. Si la superficie utilizada contiene óxido de hierro (II) (FeO) u óxido de zinc (ZnO), la adsorción es química e irreversible. Para casos de superficies de zeolitas o carbón activado, la reacción es física, por lo tanto, los lechos pueden ser regenerados (Ortega *et al.*, 2015).

Las tecnologías que emplean los pellets de hierro son muy utilizadas porque se logra reducir los niveles de $H_2S_{(g)}$, desde 3 600 mg/L a 1 mg/L. Esta operación presenta beneficios tales

como operación simple y efectiva, no obstante, hay desventajas críticas de esta tecnología que han llevado a la disminución de su uso en los últimos años. Este proceso es altamente químico intensivo, los costos de operación pueden ser altos y, además, se puede acumular una corriente continua de material de desecho agotado. En ocasiones, los pellets agotados, pueden considerarse residuos peligrosos que requieren procedimientos especiales de tratamiento (Ortega *et al.*, 2015).

Para el caso de escalas industriales, el carbón activado es impregnado de hidróxido de potasio (KOH) o yoduro de potasio (KI), estos procesos ocurren a temperatura ambiente y presión atmosférica. El $H_2S_{(g)}$ es transformado en azufre elemental y agua, de acuerdo con la reacción de Claus (ecuaciones 2.5 a y 2.5 b). En este caso es preciso conservar los niveles de oxígeno entre un 0,3 y un 0,5%. El carbón activado es el encargado de adsorber el azufre elemental, producto de la reacción. El diseño habitual es constituido por dos o más lechos adsorbentes dispuestos en paralelo, de esta forma hay uno siempre funcionando, mientras los saturados se regeneran, generalmente con una corriente de aire o vapor de agua. Estas tecnologías permiten un nivel de remoción del 100% de $H_2S_{(g)}$. (Ortega *et al.*, 2015).



Los métodos de purificación por adsorción son muy efectivos y reducen las cantidades de contaminantes hasta los niveles requeridos, pero, el empleo de cualquiera de los cuatro adsorbentes: alúminas, carbón activado, sílicagel y tamices moleculares, tiene como limitante fundamental su elevado costo en los mercados especializados. Además, presentan costos de operación altos, por lo que su aplicación en países en vías de desarrollo se encuentra limitada (Ortega *et al.*, 2015).

2.1.4 SEPARACIÓN POR MEMBRANA

Este proceso tiene como objetivo filtrar el biogás (Fernández, 2004). Así, la corriente gaseosa a purificar se hace fluir a través de una membrana selectiva, gracias a la fuerza motriz generada por diferencias de presión. El factor determinante es la permeabilidad que poseen las moléculas que componen la corriente gaseosa a purificar (González, 2006), por lo tanto, el material a escoger será función de la solubilidad y difusividad (temperatura, presión y naturaleza) de los componentes gaseosos que presente el gas a filtrar. En ocasiones se utiliza un transportador, para ayudar a la transmisión (Llaneza *et al.*, 2010).

Las membranas empleadas hasta el momento son muy frágiles y tienen poros excesivamente pequeños, por lo que se requiere que el gas de entrada a las membranas esté limpio de material con partículas en suspensión. Estos sistemas son caros y generalmente son adecuados para aplicaciones a pequeña escala, aunque se han obtenido resultados satisfactorios en estudios a nivel piloto usando membranas de poliamida y acetato de celulosa, las que demostraron ser efectivas en la remoción de $\text{CO}_2(\text{g})$ y $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$ del biogás (Rodríguez, 2009).

Últimos avances en materiales de fabricación de membranas han permitido la aplicación de membranas poliméricas no rugosas en la separación selectiva del H_2S de corrientes gaseosas. Este proceso está basado en la permeación de un gas, el cual consiste en hacer pasar un elemento químico a través de una película protectora, y no por los poros u otras aberturas. Las moléculas individuales penetran la película, y atraviesan entre las moléculas del material. Es un proceso complicado que puede implicar los siguientes pasos: Adsorción del gas en una interfase de la membrana, solución del gas en la membrana en esa interfase, difusión activada del gas en, y a través de la membrana, desprendimiento del gas de la solución por la interfase opuesta, desorción del gas de la última interfase. (Fernández, 2004).

2.2 MÉTODOS DE SEPARACIÓN CO₂-CH₄

La eliminación del CO₂ aumenta el valor calorífico del biogás y lleva a una calidad consistente del biogás, similar al gas natural. Al usar técnicas de remoción del CO₂, es importante mantener bajas pérdidas del metano por razones económicas y ambientales puesto que el CH₄ es un gas de efecto invernadero 21 veces más que el CO₂.

Algunos de los métodos utilizados para la separación CO₂-CH₄ se mencionan a continuación.

2.2.1 MÉTODO DE ABSORCIÓN

2.2.1.1 Absorción con Agua.

La absorción física con agua se utiliza habitualmente para la purificación de biogás ya que es efectiva incluso para pequeños caudales. Además, requiere poca infraestructura y, en general, su coste es bajo. Se basa en que el CO₂ tiene mayor solubilidad que el CH₄ en el agua utilizada como absorbente. (Kapdi *et al.*, 2004)

Además, el H₂S también puede ser eliminado mediante la absorción, aunque por lo general se retira antes del proceso de purificación junto con otros contaminantes. El biogás crudo es comprimido (normalmente a una presión de 5-20 bar) y alimentado a una columna de absorción en sentido ascendente y el agua presurizada es rociada desde la parte superior, permitiendo el contacto agua-biogás en contra-corriente. Se instala material de relleno dentro de la columna con el fin de que haya gran superficie de contacto entre el agua y el biogás. CO₂ y/o H₂S se disuelven en agua, se eliminan por la base de la columna y se alimentan a una columna de regeneración donde CO₂ y/o H₂S se recuperan mediante la adición de aire a presión atmosférica. El agua se recircula a una torre donde se purifica mediante el aumento de la temperatura o la despresurización del sistema. Mientras, el biogás purificado se recupera por la parte superior de la torre con una pureza de hasta el 97% para posteriormente someterlo a un proceso de secado. (Álvarez, 2016)

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



Se establece que la solubilidad del CO₂ en el agua es de 1.7 g CO₂/kg de H₂O (a 1 atm y 20° C) (Ver anexo A). A pesar de que se requieren mayores cantidades de agua ya que el CO₂ es menos soluble en ella que el H₂S, la absorción física del CO₂ permite la recirculación del agua ya que puede ser removido fácilmente con tan sólo reducir la presión, como se puede ver en la figura 2.6. (Valerio, 2010)

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

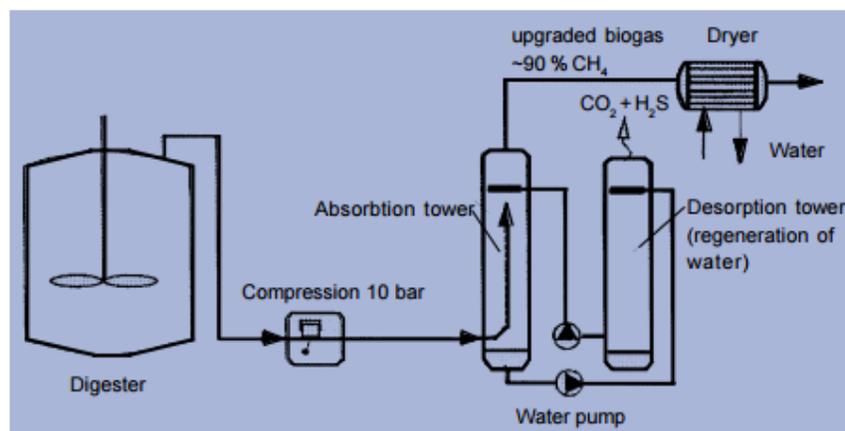


Figura 2.6 Esquema del método de absorción con agua con recirculación para eliminación de CO₂ y/o H₂S. (Wellinger y Lindberg, 2000)

○ **TORRES DE ABSORCIÓN**

En una torre de absorción la corriente de gas entrante a la columna circula en contracorriente con el líquido. El gas asciende como consecuencia de la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la columna. El contacto entre las dos fases produce la transferencia del soluto de la fase gaseosa a la fase líquida, debido a que el soluto presenta una mayor afinidad por el disolvente. Se busca que este contacto entre ambas corrientes sea el máximo posible, así como que el tiempo de residencia sea suficiente para que el soluto pueda pasar en su mayor parte de una fase a otra. (Moreno, 2013)

Las torres de absorción se dividen en dos grandes grupos: aquellas rellenas con empaques o aquellas en cuyo interior existen platos, bandejas o etapas. En general, si los flujos son pequeños se prefieren las torres empacadas, también si los líquidos hacen espuma o son corrosivos. En los otros casos se prefieren las torres de platos. (Valiente, 2010)

a) Torres de absorción empacadas.

En las torres de absorción empacadas mediante el uso de empaques o rellenos se busca principalmente el establecimiento de una gran interfase, a fin, de poner en contacto íntimo las fases gaseosa y líquida. La cantidad de transferencia de materia, (de soluto en este caso), depende directamente de la superficie interfacial y de la naturaleza de los componentes.

Las torres empacadas se usan en contacto continuo a contracorriente. Son columnas verticales y están rellenas con empaque. El líquido se distribuye en el empaque y desciende a través del él exponiendo una gran superficie de contacto con el gas. Reciben el nombre de *empaques*, las piezas que se colocan dentro del equipo y que se utilizan para aumentar el área interfacial. (Valiente, 2010)

En general, según Valiente (2010) un buen empaque debe cubrir las especificaciones siguientes:

- Proporcionar una gran superficie interfacial entre el líquido y el gas.
- Debe poseer buenas características de flujo. Esto es, que el empaque debe permitir el paso de grandes volúmenes de flujo a través de pequeñas secciones de la torre, sin provocar grandes caídas de presiones en la fase gaseosa.
- Debe ser químicamente inerte a los fluidos del proceso.
- Su estructura debe permitir el fácil manejo e instalación.
- Debe tener un costo relativamente bajo.

Existen dos tipos de empaques dependiendo de cómo se acomoden en la torre de absorción, como se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7 a) Empaques al azar. b) Empaques estructurados. (Valiente, 2010)

Los empaques al azar son aquellos que simplemente se arrojan en la torre durante la instalación y que se dejan caer en forma aleatoria. Generalmente, los tamaños más pequeños de empaques al azar ofrecen superficies específicas mayores (y mayores caídas de presión), pero los tamaños mayores cuestan menos por unidad de volumen. A manera de orientación general: los tamaños de empaque de 25 mm o mayores se utilizan generalmente para un flujo

de gas de $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$, 50 mm o mayores para un flujo del gas de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Durante la instalación, los empaques se vierten en la torre, de forma que caigan aleatoriamente; con el fin de prevenir la ruptura de empaques de cerámica o carbón. (Coulson *et al.*, 1981)

En un principio como empaque se usaban materiales tales como trozos de vidrio, grava, pedazos de coque. Posteriormente se emplearon los empaques geométricos manufacturados, tales como anillos Raschig y Lessing o las sillas Berl, Intalox y los Telleretes. (Figura 2.8). Hoy en día, se emplean frecuentemente los empaques estructurados, de alta eficiencia ya sea tejidos o no, tales como los de mallas segmentadas o en forma de espiral, que reciben nombres de acuerdo a los fabricantes. Estos empaques son de gran tamaño y ocupan totalmente el área interna de la torre. (Valiente, 2010)

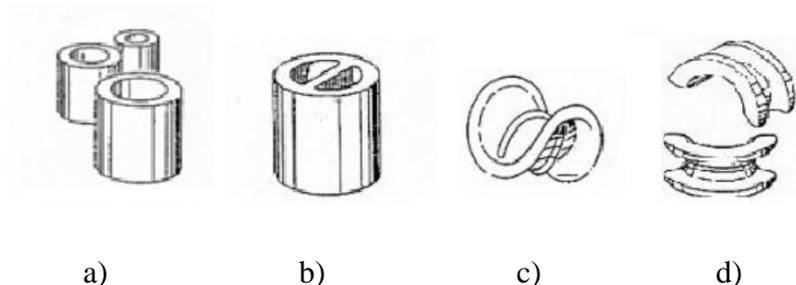


Figura 2.8 a) Anillos Raschig. b) Anillos Lessing. c) Silla Berl. d) Sillas Intalox. (Coulson *et al.*, 1981)

Los anillos de Raschig son cilindros huecos, cuyo diámetro va de 6 a 100 mm o más. Pueden fabricarse de porcelana industrial, que es útil para poner en contacto a la mayoría de los líquidos, con excepción de álcalis y ácido fluorhídrico; de carbón que es útil, excepto en atmósferas altamente oxidantes; de metales o de plásticos. Los anillos de Lessing y otros con particiones internas se utilizan con menos frecuencia. Los empaques con forma de silla de montar, los de Berl e Intalox y sus variaciones se pueden conseguir en tamaños de 6 a 75 mm; se fabrican de porcelanas químicas o plásticos. (Coulson *et al.*, 1981)

Los empaques regulares ofrecen las ventajas de una menor caída de presión para el gas y un flujo mayor, generalmente a expensas de una instalación más costosa que la necesaria para los empaques aleatorios. Los anillos hacinados de Raschig son económicos solo en tamaños muy grandes. Hay varias modificaciones de los empaques metálicos expandidos. Las rejillas o "vallas" de madera no son caras y se utilizan con frecuencia cuando se requieren volúmenes vacíos grandes; como en los gases que llevan consigo el alquitrán de los hornos de coque, o los líquidos que tienen partículas sólidas en suspensión. El tamaño del empaque suelto está relacionado con el diámetro de la torre. En general el diámetro del empaque está entre 1/8 a 1/20 del diámetro de la torre. En el equipo más usual, el líquido entra por la parte superior de la torre y puede ser puro o una solución diluida conteniendo algo de soluto. El líquido se vierte sobre un distribuidor y de allí llega a la parte superior del empaque al que debe humedecer uniformemente. (Valiente, 2010)

b) Absorción en columna de Platos.

La absorción de gases puede realizarse en una columna equipada con platos perforados u otros tipos de platos normalmente utilizados en destilación (ver figura 2.9). Con frecuencia se elige una columna de platos perforados en vez de una columna de relleno para evitar el problema de la distribución del líquido en una torre de gran diámetro y disminuir la incertidumbre en el cambio de escala. (Coulson *et al.*, 1981)

El número de etapas teóricas se determina trazando escalones para los platos en un diagrama y-x, y el número de etapas reales se calcula después utilizando una eficacia media de los platos. (Moreno, 2013)

Según Moreno (2013) existen tres tipos de torres de platos: plato perforado, plato de válvulas y plato de capuchones. (Ver figura 2.10)



Figura 2.9 Columna de absorción con platos. (Valiente, 2010)

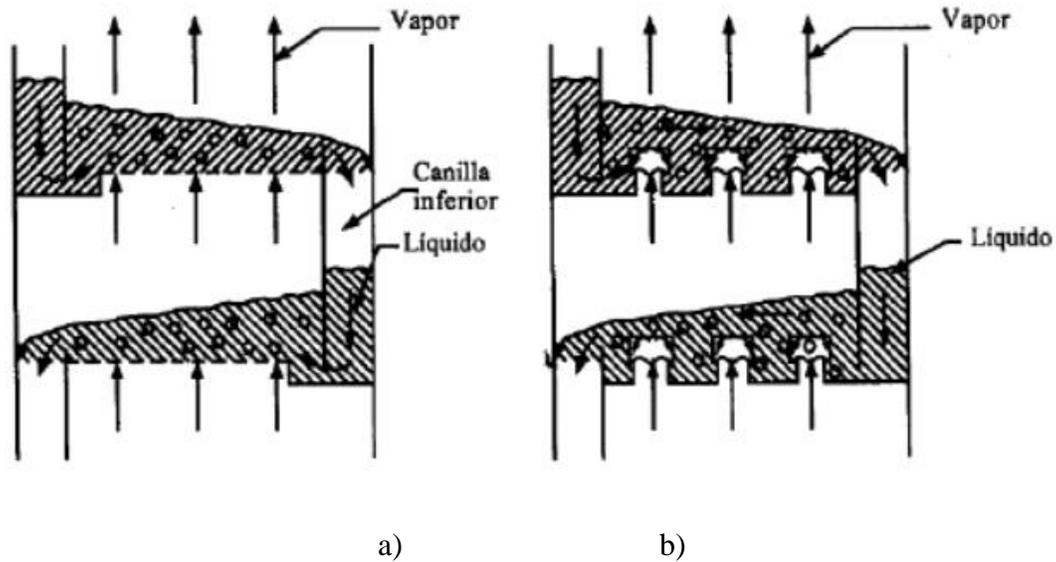


Figura 2.10 a) Torre de platos perforados. b) Torre de platos de capuchones. (Moreno, 2013)

2.2.1.2 Separación por Absorción Química.

Uno de los métodos químicos para la purificación del biogás es la absorción química, la cual consiste en la formación reversible de enlaces químicos entre el soluto y la solución química establecida. (Valerio, 2010)

La absorción química funciona bajo el mismo principio que la absorción con agua. La principal diferencia es que utiliza soluciones químicas para absorber, formando enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. La regeneración del solvente, por tanto, comprende la ruptura de esos enlaces y el correspondiente aporte de energía. Los solventes químicos generalmente emplean soluciones acuosas de aminas (ej., mono, di o trietanolamina) o soluciones acuosas de sales alcalinas (ej., hidróxido de sodio, potasio y calcio). (Álvarez, 2016)

Para realizar la absorción química, generalmente se utiliza una columna de absorción similar a la que se emplea en la absorción física, por la que el biogás debe pasar a contracorriente a la solución química que así logre entrar en contacto con el compuesto absorbente y generar la reacción necesaria para que el contaminante se asocie a la solución, como se muestra en la figura 2.7. (Valerio, 2010)

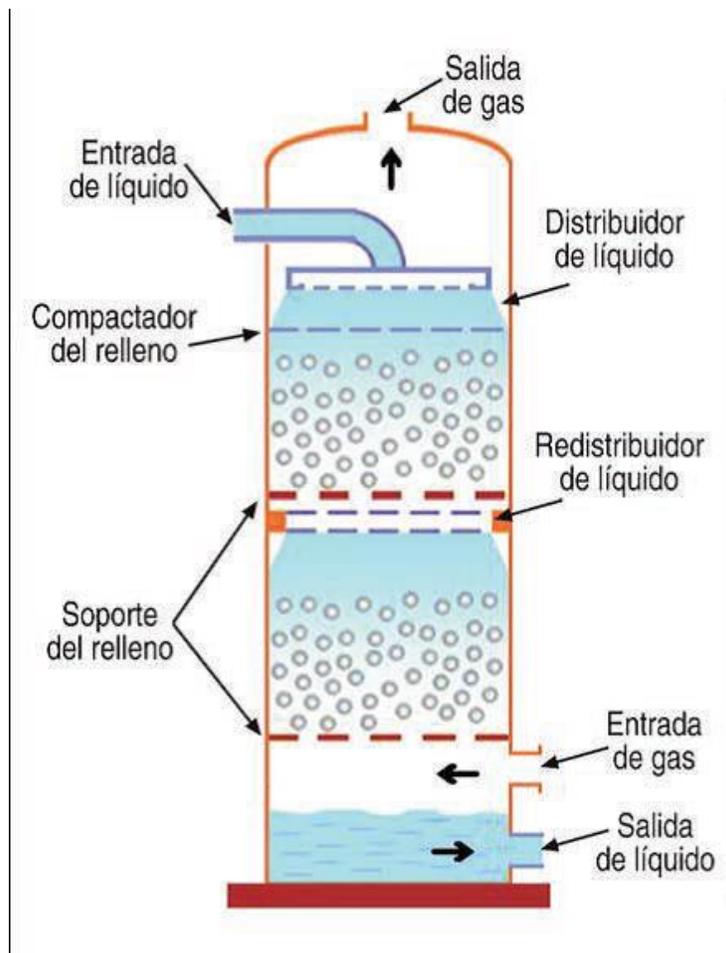


Figura 2.11 Esquema de una columna de absorción a contracorriente. (Valerio, 2010)

En términos generales, la tecnología consiste en un absorbedor, en el que se absorbe el CO_2 presente en el biogás, y un lavador o stripper en el que se libera el CO_2 de la solución de amina. La presión de funcionamiento del absorbedor es de 1-2 bar mientras que la presión del stripper es ligeramente superior a la presión del absorbedor, por lo general de 1,5 a 3 bar. Con esta tecnología se consigue metano de pureza superior a la absorción con agua (por encima de 99,5 %), debido a que el metano no reacciona con la amina. La amina puede ser regenerada por calentamiento, aunque gran parte debe ser reemplazada debido a su evaporación. (Álvarez, 2016)

2.2.2 SEPARACIÓN CON MEMBRANA

El principio de esta técnica es que algunos componentes del gas crudo pueden ser transportados a través de una membrana delgada (menor a 1 mm) mientras que otros son retenidos. 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. Para alta purificación del metano, la permeabilidad debe ser alta. La membrana sólida construida a partir de polímeros de celulosa-acetato tiene una permeabilidad para el CO₂ y el H₂S de 20 a 60 veces, respectivamente superiores al CH₄. Sin embargo, para este proceso se requiere una presión de 25-40 bar. (Morero, Gropelli y Campanella, 2010)

En esta tecnología la corriente de gases se hace circular por una de las caras de la membrana, que realiza la separación según la afinidad químico-física hacia los diferentes componentes del biogás. La membrana retiene el metano mientras que la mayor parte de dióxido de carbono pasa a través de ella. Una sola unidad de separación no permite una separación completa de metano y dióxido de carbono. Sin embargo, los procesos de separación multietapas pueden lograr un metano con una pureza superior a 96 % aunque la presión necesaria para esta operación puede ser tan alta como 40 bar. (Álvarez, 2016)

Wellinger y Lindberg describieron dos sistemas básicos de lavado de gases con membranas: una separación de gas a alta presión con fases gaseosas en ambos lados de la membrana y una absorción de gas líquido de baja presión en la separación donde un líquido absorbe la molécula que se difunde a través de la membrana. La membrana de separación de gas a alta presión puede durar hasta 3 años, que es comparable al tiempo de vida de las membranas utilizadas para la purificación de gas natural, que duran por lo general de 2 a 5 años.

2.2.2.1 Separación de Gas a Alta Presión.

El gas presurizado (36 bar) se limpia por primera vez, por ejemplo, en un lecho de carbón activado para eliminar los hidrocarburos (halogenados) y sulfuro de hidrógeno del gas en

bruto, así como el vapor del aceite del compresor. Seguido al lecho de carbono se pasa por un filtro de partículas y un calentador. Las membranas hechas de acetato-celulosa separan las moléculas polares pequeñas como dióxido de carbono, humedad y el sulfuro de hidrógeno restante. Estas membranas no son eficaces para separar nitrógeno del metano.

El gas bruto luego de las 3 etapas se convierte en un gas limpio con metano al 96% o más.

El gas residual de las dos primeras etapas se recicla y puede recuperarse el metano.

Los gases residuales de la etapa 3 (y en parte de la etapa 2) son utilizados en una caldera de vapor ya que todavía contiene de 10 a 20% de metano. (Wellinger y Lindberg, 2000)

2.2.2.2 Membranas de Absorción Líquido-Gas.

Es una técnica de separación que fue desarrollado para la modernización del biogás recientemente. El elemento esencial es una membrana hidrófoba microporosa para separar el gas del líquido. Las moléculas de la corriente de gas, que fluye en una dirección, las cuales son capaces de difundirse a través de la membrana serán absorbidas en el otro lado por el líquido que fluye en contra corriente. Las membranas de absorción funcionan a aproximadamente a presión atmosférica (1 bar) lo que permite una construcción de bajo costo. La eliminación de componentes gaseosos es muy eficiente.

El CO₂ se elimina mediante una solución de amina. El biogás se purifica eficientemente de 55% de CH₄ (43% de CO₂) a más de 96% de CH₄. La solución de amina se regenera por calentamiento. El CO₂ liberado es puro y se puede vender para aplicaciones industriales. (Wellinger y Lindberg, 2000)

2.2.3 SEPARACIÓN CRIOGÉNICA

Esta tecnología se basa en que los diferentes compuestos químicos tienen distintos puntos de ebullición. La temperatura de ebullición del CH₄ es de -160 °C a presión atmosférica y la del CO₂ es de -78 °C. Esto significa que se puede separar el CO₂ del metano en forma de líquido, enfriando la mezcla gaseosa a alta presión. Además, si se sigue enfriando y se condensa el CH₄ se consigue separar del N₂, que tiene un punto de ebullición aún menor. Por este motivo, esta tecnología puede ser interesante para la purificación de biogás de vertedero que puede tener concentraciones de N₂ relativamente elevadas. (Álvarez, 2016)

El método criogénico de separación implica la separación de la mezcla de gas por condensaciones fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas. En la separación criogénica, el biogás crudo es comprimido a aproximadamente 80 bar. La compresión se realiza en múltiples etapas. El gas comprimido se seca para evitar que se congele durante el proceso de enfriado. El biogás es enfriado en intercambiadores y el CO₂ condensado es removido en un separador. El CO₂ es además procesado para recuperar el metano disuelto, que es reciclado a la entrada del gas. A partir de este proceso se obtiene más de 97% de metano puro. (Morero *et al.*, 2010)

Aparte de la alta pureza obtenida, con la separación criogénica se logra recuperar o separar un compuesto gaseoso en su forma líquida, lo que puede ser conveniente para hacer productos derivados y/o para su transporte. (Kapdi *et al.*, 2004)

Entre las desventajas de esta tecnología están el consumo elevado de energía para la refrigeración, la necesidad de eliminar impurezas que puedan congelarse y bloquear el equipo, así como los elevados costes energéticos asociados al proceso. (Álvarez, 2016)

2.2.4 ADSORCIÓN EN UNA SUPERFICIE SÓLIDA

Los procesos de adsorción involucran la transferencia de un componente en la corriente de biogás a la superficie de un material sólido donde se concentra, principalmente, como

resultado de fuerzas físicas de tipo 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 y otras impurezas selectivamente o de forma simultánea desde el biogás. (Morero *et al.*, 2010)

Los materiales adsorbentes que se utilizan habitualmente son carbón activado, gel de sílice, alúmina o zeolitas. Estos materiales se caracterizan por tener una alta superficie específica. Industrialmente los procesos de adsorción involucran una o varias columnas de sólido adsorbente dependiendo de si se quiere funcionar en discontinuo o en continuo. Para realizar el proceso en continuo y así reducir el consumo energético de compresión, se necesitan normalmente tres o cuatro columnas de modo que cada una se encuentre en una etapa del proceso: adsorción, despresurización, desorción y presurización son las etapas fundamentales.

Entre las ventajas de esta tecnología se encuentran la baja demanda energética y bajas emisiones. La principal desventaja es la necesidad de eliminar en una etapa previa el H₂S ya que se adsorbe irreversiblemente en la mayoría de los adsorbentes. (Álvarez, 2016)

2.2.4.1 Materiales Adsorbentes de CO₂.

Según Álvarez (2016), la elección del material que adsorba selectivamente el dióxido de carbono de la corriente de biogás es crucial para el funcionamiento de la unidad de purificación basada en la tecnología de adsorción. El adsorbente es un sólido poroso con un área específica elevada a fin de maximizar el contacto sólido-gas.

Existen diversos adsorbentes capaces de llevar a cabo la separación de CO₂ de una corriente de biogás constituida, principalmente, por una mezcla CO₂/CH₄. Algunos materiales adsorbentes presentan fuertes interacciones con el CO₂ y adsorben grandes cantidades de este gas en comparación con el metano. Esos materiales son denominados *adsorbentes basados*

en el equilibrio y algunos ejemplos son: carbones activados, zeolita 13X, gel de sílice y compuestos organometálicos (*MOF*, acrónimo del inglés *Metal-Organic Framework*).

Otros materiales tienen capacidades de adsorción de CO_2 y CH_4 muy similares, pero son capaces de separarlos gracias al tamaño controlado de sus microporos. Estos son conocidos como *adsorbentes basados en la cinética* y entre ellos destacan los tamices moleculares SAPO-34, clinoptilolitas, DDR zeolitas y titanosilicatos.

La zeolita 13X, ampliamente estudiada, presenta elevada capacidad de adsorción de CO_2 y alta selectividad CO_2/CH_4 . Sin embargo, sus elevadas entalpías de adsorción de CO_2 conllevan que la desorción deba realizarse a temperaturas más elevadas.

Los compuestos organometálicos (MOF) son una nueva generación de materiales híbridos, formados por estructuras tridimensionales de iones metálicos unidos por puentes orgánicos. Su ventaja principal es su elevada capacidad de adsorción de CO_2 (especialmente a presiones elevadas; a presión atmosférica sus capacidades de adsorción de CO_2 se sitúan en torno al 10% en masa). La principal desventaja de estos materiales es que presentan adsorción preferencial de agua.

Los carbones activados también han atraído mucho interés como adsorbentes de CO_2 . Son carbones porosos amorfos que pueden ser preparados por pirólisis de diversas resinas carbónicas, carbón mineral, cenizas volantes, o biomasa. Las principales ventajas de los carbones activados frente a otros materiales adsorbentes de CO_2 son:

- Presentan adsorción preferencial de CO_2 frente a CH_4 .
- Su química superficial puede ser modificada para potenciar aún más su afinidad por el CO_2 .
- Su naturaleza hidrófoba hace que tengan una menor sensibilidad frente al agua que otros adsorbentes
- Son materiales con un coste reducido comparado con otros adsorbentes de CO_2 .

La selección de un adsorbente adecuado para la separación CO_2/CH_4 responde a criterios termodinámicos (equilibrio de adsorción) y cinéticos. Se deben considerar las isotermas de adsorción de todos los componentes de la mezcla, en las condiciones de presión y temperatura de operación. La adsorción es un proceso exotérmico y, como tal, las variaciones de temperatura en el lecho de adsorción van a influir tanto en el equilibrio de adsorción como en la transferencia de materia. (Álvarez, 2016)

En la tabla 2.1 se muestra un cuadro comparativo de los diferentes métodos antes mencionados y los parámetros de operación a los que deben ser aplicados, para poder seleccionar el que mejor se adapte a nuestras necesidades y así obtener el resultado que se ha planteado.

Tabla 2.1 Parámetros comparativos de los métodos de purificación de biogás. (García, 2016)

TÉCNICA PARÁMETROS	ADSORCIÓN FÍSICA	ABSORCIÓN CON AGUA	ABSORCIÓN CON SOLVENTES	SEPARACIÓN CON MEMBRANA	SEPARACIÓN CRIOGÉNICA
Presión (bar)	2,0 – 11,0	8,0 – 21,0	5,0 – 9,0	8,0 – 42,0	19-31
Temperatura (°C)	5,0 – 30	20 – 40	10 – 20	25 – 60	-45 – 59
Contenido en metano del biometano (%)	95 – 98	93 – 98	95 – 98	85 – 99	96 – 98
Pérdidas de metano (%)	3,5	3,0	4,0	20,0	3,0
Rendimiento de eliminación de CO₂	99,0	86,0	-	96,0	-
Pretratamiento para el azufre	Requerido	No necesario o aconsejable	No necesario o aconsejable	Aconsejable	Requerido o aconsejable
Consumibles	Adsorbente	Agua, agente de secado	Solvente orgánico	Membranas	Refrigerante

CAPÍTULO III: PROPUESTA DE UN PROCESO PARA LA PRÁCTICA DEL ENVASADO DE BIOGAS LIBRE DE CO₂ Y H₂S EN EL SALVADOR.

3.0 MUESTREO Y ANÁLISIS DE MUESTRA DE BIOGÁS

En las plantas de biogás la técnica de análisis de gases abarca dos tareas diferentes. Por un lado, se trata del análisis de la composición del biogás antes de entrar en fase de utilización (motor) y por otra parte el control ambiental por riesgos para la salud por biogás que se presenta inadvertidamente, como por ejemplo las fugas. Ambas tareas de medición tienen diferentes requisitos y que requieren una metodología específica. En esta parte primera hablamos de requisitos y de conceptos necesarios para el análisis de biogás. (Unruh, 2011)

Por lo general se analizan en el Biogás tres componentes: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S).

El metano y el dióxido de carbono contenido en el biogás participan con típicamente alrededor de 50 % Vol. El objetivo del control de la composición es el seguimiento del proceso de generación y el mantenimiento de las condiciones óptimas para el motor de generación de electricidad o para el tratamiento posterior de los gases. En circunstancias adversas el biogás llega a concentraciones de sulfuro de hidrógeno de hasta varios miles de ppm (100% Vol. = 1.000.000 ppm). El sulfuro de hidrógeno puede causar graves daños en los motores de gas. Por lo tanto, es de particular importancia el control de este gas agresivo para iniciar en su caso las contramedidas oportunas. (Unruh, 2011)

Existen distintos métodos válidos para determinación de los componentes gaseosos existentes en la corriente de biogás, podemos clasificarlos en dos grupos:

MÉTODOS EXTRACTIVOS.

Son aquellos métodos que aspiran la muestra fuera del foco de emisión, haciéndola pasar a continuación por un medio colector o por un instrumento de medida.

La muestra se recoge directamente en unos recipientes que pueden ser de distintos materiales y posteriormente son analizadas en el laboratorio. Los recipientes pueden tener o no, sustancias con las que los contaminantes puedan reaccionar. Un ejemplo de este tipo de muestreo son las muestras tomadas en bolsas de teflón. Este material es muy adecuado a este tipo de muestreos por ser inerte (no reacciona con la muestra ni tampoco adsorbe los componentes de la misma). (Crespo, 2008)

MÉTODOS NO EXTRACTIVOS.

En la tabla 3.1 se presentan dos métodos no extractivos para la caracterización de gases:

Tabla 3.1 Métodos no extractivos de caracterización de gases. *(Elaboración propia)*

MÉTODOS INSTRUMENTALES EN CHIMENEA.	MÉTODO DE MEDIDA A DISTANCIA.
Las técnicas instrumentales de análisis pueden ser adaptadas al foco de emisión, teniendo las precauciones necesarias para facilitar el mantenimiento y observación de los equipos. La determinación del contaminante se realiza directamente sobre el foco de emisión sin necesidad de realizar la extracción ni acondicionamiento de la muestra. Se hace atravesar una señal luminosa de características determinadas a través del conducto, la señal sufre una modificación al entrar en contacto con el gas contaminante. Esta modificación es captada por un detector situado en el extremo opuesto del diámetro y traducida electrónicamente a unidades de concentración. (Crespo, 2008)	La medida se realiza normalmente sobre el penacho una vez que ha salido de la chimenea, cerca de la boca de la misma. Las técnicas de medida a distancia son básicamente las mismas que las instrumentales. La diferencia fundamental es que en este tipo de medidas los equipos se encuentran localizados fuera de las chimeneas que se pretenden muestrear. (Crespo, 2008)

3.1 PROPUESTA DE TÉCNICAS DE MUESTREO DE GASES.

Para el procedimiento de toma de muestras, se utilizan bolsas de polifluoruro de vinilo (PVF) (ver figura 3.1), las cuales presentan estabilidad contra compuestos orgánicos volátiles, compuestos de azufre, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano entre otros.

Un estudio de laboratorio, determinó que las bolsas de PVF, específicamente hablando del tipo Tedlar, tienen una vida media de 8 horas para poder obtener mejor resultados de los análisis a realizar. (Bothi, 2007).

La metodología de muestreo de gases propuesta es la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Metodología de muestreo de gases. (Bothi, 2007)

1. Conectar un pequeño tubo de PVC limpio a la válvula de salida de biogás y a la bolsa de muestras de 6''*6'' (0.5L)
2. Abrir el seguro de la bolsa (ver figura 3.1) y poco a poco abrir la válvula de gas para llenar la bolsa de muestras, estar atento a la cantidad de biogás que ingresa en la bolsa para evitar que se sobrepresione.
3. Vaciar la bolsa completamente y repetir el procedimiento anterior 2 veces.
4. Después de purgar la bolsa 3 veces, reconectar la bolsa a la línea de extracción de gas, abrir la válvula de biogás y llenar la bolsa. Cerrar las válvulas y desconectar la bolsa de la línea.
5. Transportar la bolsa al laboratorio.
6. Analizar la muestra dentro de las primeras 8 horas para tener mejores resultados.



Figura 3.1 Bolsas utilizadas para el muestreo de gases. (www.levitec.com)

3.2 ANÁLISIS DE MUESTRA DE BIOGÁS

3.2.1 ANÁLISIS INSTRUMENTALES DE MUESTRA DE BIOGÁS.

3.2.1.1 Medición de CH₄ y CO₂

Para medir concentraciones de hasta 100 % volumen los principios de medición disponibles son absorción de infrarrojos (IR) –semiconductores- y combustión catalítica. El principio de medición de la absorción de infrarrojos cumple de forma exacta con los requisitos necesarios, ya que se mantiene libre de la interferencia por otros componentes de gas presentes en el biogás.

La precisión alcanzable es del + 1 % Vol. Otra ventaja es la larga vida de esta técnica, los analizadores actuales de IR no tienen partes móviles, por lo que evitan los inconvenientes que tenían los analizadores IR anteriores junto con el elevado costo y la necesidad de un mantenimiento caro. Este sistema se utiliza con más frecuencia en el análisis continuo.

La medición basada en el sistema de combustión catalítica tiene el inconveniente de reaccionar con casi todos los gases. A esto y trabajando con biogás se añade la circunstancia agravante que los dos componentes principales de CH_4 y CO_2 producen señales contrarias. Por ello solo se pueden conseguir resultados de análisis satisfactorios si se trabaja con medición cíclica y calculando luego el resultado en base a los valores medidos. Las posibles desviaciones que han de considerarse para este tipo de medición son de + 2...4% Vol. Por todo ello este tipo de medición solo es válida a título de somera orientación o cuando se quieren observar solo las tendencias de la evolución temporal. (Unruh, 2011)

3.2.1.2 Medición de H_2S

Normalmente se utilizan sensores electroquímicos por células de medición electroquímica de H_2S . Los sensores de H_2S están disponibles comercialmente para el control de niveles de exposición ocupacional con un margen de medida de alrededor de 100 ppm. Altas concentraciones suponen una sobrecarga del sensor, que causan daños permanentes en el mismo. En el caso de haberse dañado ya, no reacciona con la muestra o indica una concentración significativamente más baja. Para evitar esta clase de daños se utilizan diferentes métodos. La preselección de solo aquellos sensores de un suministro que son extremadamente resistentes solo es válida para medir concentraciones de H_2S particularmente bajas. Una concentración elevada y corta duración ya que puede dañar definitivamente el sensor. La medición con dilución previa del gas a analizar es susceptible a importantes errores ya que el ajuste de válvulas de mezcla de gas a medir/aire no garantiza una relación constante de la mezcla lo que da lugar a errores. Más adecuado para la protección del sensor son aquellos procesos que reducen el volumen de gas que entra en contacto con el sensor y – si en algún momento se presentan concentraciones por encima del rango de medida – corta la entrada de biogás al sensor y regenera el mismo circulando aire ambiente hasta la iniciación del siguiente ciclo de medición. (Unruh, 2011)

3.2.2 EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS IN SITU DE BIOGÁS

Tabla 3.3 Equipos para el análisis in situ de biogás. *(Elaboración propia)*

<p>Sewerin Multitec 540®</p>	<p>Es un analizador de biogás portátil puede medir hasta seis gases simultáneamente. La aplicación de la tecnología infrarroja permite la detección de metano y dióxido de carbono. Por consiguiente, es posible utilizarlo en plantas de biogás. Todas las mediciones se muestran paralelamente en la pantalla. Los datos de medición se almacenan en la memoria en archivos de registro y se transfieren sin problemas al PC por medio del conector USB.</p>	
<p>Sewerin Multitec 560®</p>	<p>El Multitec® 560 es un equipo combinado de detección y medición de gases. Si se utiliza como un medidor de gas, determina y registra la composición de los gases producidos durante los procesos biológicos. Para la producción rentable de biogás es importante detectar y analizar la composición de los gases y poder así optimizar los procesos. El Multitec® 560 opera con tecnología infrarroja.</p>	
<p>MCA 100 Bio-P®</p>	<p>Este sistema se utiliza para la medida del biogás en un monopunto, y realiza la medida continua del CH₄, del CO₂, del O₂ y de H₂S, útil para la muestra. Se ha diseñado para los que necesiten supervisar la composición del biogás en varios lugares. El analizador se monta dentro de un estuche rígido resistente a los choques, equipado de la pantalla táctil 5,7", capaz de análisis de hasta 1000 datos.</p>	

3.2.3 PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS DE BIOGÁS.

Para el análisis de biogás, se decidió utilizar el aparato llamado Sewerin Multitec 540®, el cual tiene un fácil funcionamiento y ayuda a obtener una medición muy rápida de la composición volumétrica del biogás. El equipo fue proporcionado por el encargado de uno de los biodigestores que se visitaron, quien mostró la manera en que es utilizado este equipo.

Cabe destacar que, para facilitar el uso de este equipo, el biodigestor posee una salida especial para la medición de su composición, por lo que para la utilización de este método de análisis es recomendable que los biodigestores posean una válvula adaptada para el equipo antes mencionado.

Finalmente se adapta el Sewerin Multitec 540® a la válvula del biodigestor y se leen los datos que arroja en su pantalla.

3.2.4 RESULTADOS.

Luego de realizado el análisis, se obtiene un promedio de composición en porcentaje volumen según lo mostrado en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Composición promedio del biogás. *(Elaboración propia)*

Componente	%V
CH ₄	70
CO	3
CO ₂	15
H ₂ S	600 ppm
H ₂ O _(g)	10

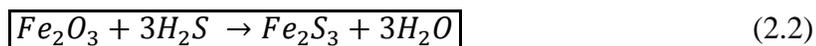
3.2.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el resultado del análisis realizado, se puede observar que a pesar de que la concentración de metano es relativamente alta, no es suficiente para poder ser utilizado en envases, por lo que se debe purificar el biogás, para poder obtener concentraciones de metano cercanas al 90%, asemejando las concentraciones de este gas a las del gas natural. A continuación, se presentan las propuestas de purificación.

3.3 PROPUESTA DE METODOLOGÍAS PARA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.

3.3.1 SEPARACIÓN H₂S-CH₄

Para la purificación de biogás, el primer paso es la eliminación de ácido sulfhídrico (H₂S), mediante un filtro de óxido férrico (Fe₂O₃) (Figura 3.2). Por lo cual se hará uso de la ecuación 2.2 antes mencionada.



La producción de biogás elegida es tomada en base a la producción de una de las plantas que se visitaron, el cual corresponde a una producción de 150m³ de biogás en un día de producción. Además, la composición media de ese biogás se presentó en la tabla 3.4.

Según Cepero *et al.* (2012) las virutas de óxido férrico (Fe₂O₃) pueden ser obtenidas mediante tratamiento previo de limaduras de hierro que inicia con un lavado de las virutas, con detergente, para eliminar la grasa y otras suciedades, y se dejan secar. Posteriormente las virutas se sumergen en una solución de HCl al 5,0% durante 5-10 minutos, se extraen y se secan al aire; por último, son sumergidas en una solución de NaOH al 5,0%, por 5 a 10

minutos, y de nuevo se dejan secar al aire. Como resultado, las virutas se convierten en Fe_2O_3 , compuesto que reacciona rápidamente con el H_2S .



Figura 3.2 Filtro de óxido férrico. (www.alibaba.com)

Luego con la concentración de H_2S obtenida se tiene:

$$\frac{600 \text{ mg de H}_2\text{S}}{\text{m}^3 \text{ de biogas}} * \frac{150 \text{ m}^3 \text{ de biogas}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ g de H}_2\text{S}}{1000 \text{ mg de H}_2\text{S}} = \frac{90 \text{ g de H}_2\text{S}}{\text{día}}$$

$$= 0.09 \frac{\text{Kg de H}_2\text{S}}{\text{día}}$$

Además, Según McKensy (2003), cada kilogramo de hierro, puede absorber 56% en peso de H_2S .

$$\frac{0.09 \text{ kg de H}_2\text{S}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ kg de Fe}_2\text{O}_3}{0.56 \text{ kg de H}_2\text{S}} =$$

$$= \frac{0.16 \text{ kg de Fe}_2\text{O}_3}{\text{día}}$$

Finalmente, para una producción diaria de 150m^3 de biogás, con una concentración de H_2S de 600 ppm, se necesitan 160 gramos de óxido férrico.

3.3.2 SEPARACIÓN CO₂-CH₄

El método propuesto es la separación del CO₂ presente en la corriente de biogás a través de una torre de absorción.

3.3.2.1 Cálculos de parámetros de operación.

Para el diseño de una columna de relleno debemos tener en cuenta conseguir el máximo de transferencia del contaminante con el mínimo consumo de energía y tamaño de la columna. El cálculo principal en el diseño de la columna es la altura de relleno necesaria para conseguir la transferencia de contaminante al líquido deseada, en función del equilibrio que tenga entre gas y líquido. Aunque existen otros parámetros importantes, como son el diámetro de la columna, los caudales de gas residual y líquido, el tipo de relleno y la pérdida de presión. Para calcular todos estos datos comenzamos con los parámetros que conocemos para nuestro caso: las condiciones a las que operará nuestra columna (P y T), la composición del gas de entrada, el equilibrio del contaminante entre gas y líquido, la eficiencia que perseguimos en la separación, las propiedades de los contaminantes y el flujo de gas residual que queremos tratar.

Además, se debe destacar que los resultados presentados en este apartado, obtenidos mediante los cálculos realizados, son estimaciones de pilotaje y si se quisiera llevar a escala real, deben realizarse nuevamente para obtener valores más precisos y más acordes a la realidad con la que se enfrenta en una determinada situación.

Las condiciones a las que se espera trabaje el sistema de filtración de CO₂ son:

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con un caudal de 150 m³/día de alimentación de biogás a la torre, el cual posee una concentración del 15 % V/V de CO₂, el cual se quiere reducir hasta el 5 % V/V. Se cuenta con

los datos de solubilidad de CO₂ en agua, que aparecen en la tabla 3.5, dadas a las condiciones del sistema. Ver además figura 3.3.

Tabla 3.5 Datos de solubilidad del CO₂ en agua a 25°C. (Carroll et al., 1991)

% CO ₂ w/w en la solución	0.00003	0.00006	0.00012	0.00018	0.00024	0.00030	0.00061
	1	2	3	5	7	8	4
Presión parcial de CO ₂ en el gas (kPa)	5	10	20	30	40	50	100

El cálculo se simplifica al trabajar con razones molares en lugar de fracciones molares, por lo tanto, se transforman estas últimas por medio de la ecuación 3.1:

$$Y_i = \frac{y_i}{1-y_i} \quad (3.1)$$

Sustituyendo los valores de las concentraciones inicial y final; $y_1 = 0.15$ y $y_2 = 0.05$ se obtiene:

$$Y_1 = 0.176 \frac{\text{mol de CO}_2}{\text{mol de biogas libre de CO}_2}$$

$$Y_2 = 0.053 \frac{\text{mol de CO}_2}{\text{mol de biogás libre de CO}_2}$$

$$X_2 = 0.000 \frac{\text{mol de CO}_2}{\text{mol de H}_2\text{O libre de CO}_2}$$

El balance de masa se expresa de la siguiente manera para un flujo en contracorriente como se muestra en la ecuación 3.2:

$$Ls(X_{1,\text{CO}_2} - X_{2,\text{CO}_2}) = Gs(Y_{1,\text{CO}_2} - Y_{2,\text{CO}_2}) \quad (3.2)$$

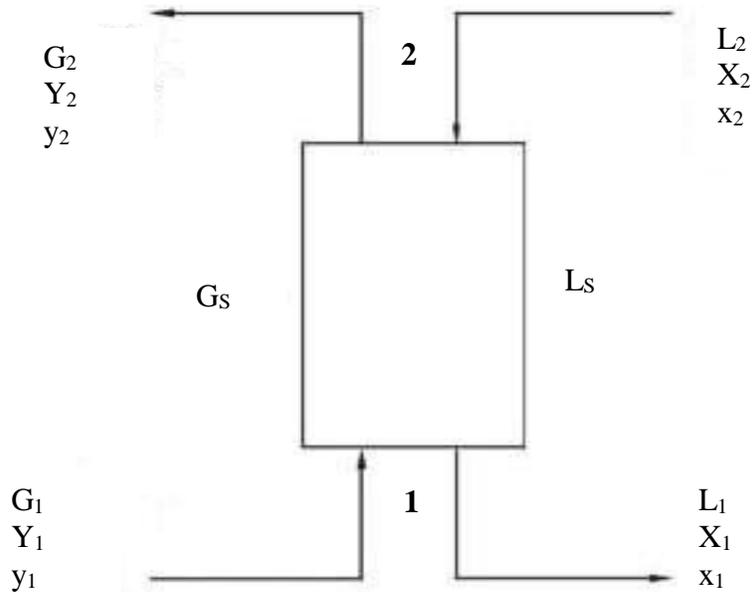


Figura 3.3 Diagrama de flujo de proceso a contracorriente. (Moreno, 2013)

La ecuación 3.2 requiere conocer los flujos molares libres del gas que se quiere absorber o sus razones molares. Se conocen las razones molares en la fase gaseosa, la razón molar a la entrada del líquido, el flujo molar del biogás se puede determinar a partir del caudal del mismo, como sigue

$$G = \frac{VP}{RT} \quad (3.3)$$

G/A: flujo molar total de biogás por unidad de área transversal

$$G = \frac{\frac{150 \text{ m}^3}{\text{día}} * 1 \text{ atm}}{8.205746 * 10^{-5} \frac{\text{atm} * \text{m}^3}{\text{mol} * \text{K}} * 298.15 \text{ K}}$$

$$G = 6131.1 \frac{\text{mol biogás}}{\text{día}}$$

$$G_s = \left(\frac{G}{A}\right) (1 - y_{1,CO_2}) \quad (3.4)$$

G_s : flujo molar de biogás libre de CO_2 .

$$G_s = 6131.1 \frac{\text{mol biogás}}{\text{día}} * (1 - 0.15)$$

$$G_s = 5211.43 \frac{\text{mol biogás libre de } CO_2}{\text{día} * m^2}$$

Aún se desconoce el flujo de líquido requerido para cumplir las condiciones requeridas y la razón molar a la salida del líquido. Para determinar estos valores es necesario hacer uso de una curva de equilibrio para obtener la curva de operación del sistema y una relación entre la curva de operación mínima y la curva de operación real del sistema.

$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)$: Pendiente de la curva de operación.

De acuerdo a Martínez, P. Martínez, E. operaciones de separación en Ingeniería Química, Métodos de Cálculo, la relación entre las curvas de operación real y mínima es óptima cuando:

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{Real}} = 1.4 \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{min}} \quad (3.5)$$

Valor con el cual se determinará la pendiente de la curva de operación para nuestro sistema.

Ahora bien, la curva de operación mínima se obtiene graficando los X_i vs Y_i . El valor de la razón molar del líquido a la salida de la torre será aquel en que la curva de equilibrio coincida con la curva de operación, como se ilustra en la figura 3.4.

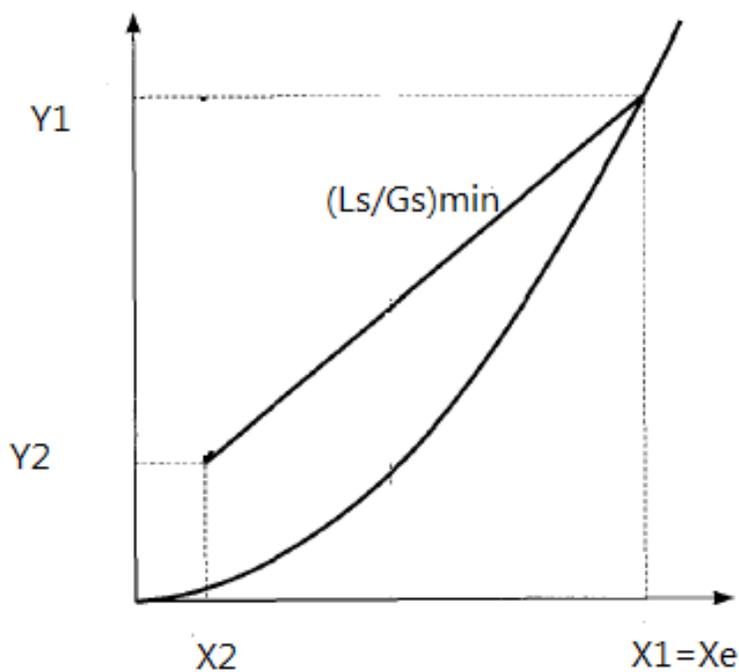


Figura 3.4 Curva de operación mínima. (Elaboración propia)

A partir del gráfico construido para nuestro sistema se hace la lectura de la razón molar del líquido a la salida del absorbedor, obteniéndose un valor de $X_e = 0.915 \times 10^{-4}$. (Ver figura 3.10)

Ahora puede sustituirse en el balance de masa para obtener el valor de $(Ls/Gs)_{min}$ despejado de la ecuación 3.2:

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{min} = \frac{Y_{1,CO_2} - Y_{2,CO_2}}{X_{1,CO_2} - X_{2,CO_2}}$$

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{min} = \frac{0.159 - 0.0534}{0.915 \times 10^{-4} - 0}$$

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{min} = 1355.19 \frac{\text{mol de H}_2\text{O libre de CO}_2}{\text{mol de biogas libre de CO}_2}$$

A partir de la curva mínima se obtiene el valor real a partir de la ecuación 3.5:

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{\text{Real}} = 1355.19 \frac{\text{mol de H}_2\text{O libre de CO}_2}{\text{mol de biogas libre de CO}_2} * 1.4$$

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{\text{Real}} = 1897.27 \frac{\text{mol de H}_2\text{O libre de CO}_2}{\text{mol de biogas libre de CO}_2}$$

La curva de operación real se representa como puede verse en la figura 3.5:

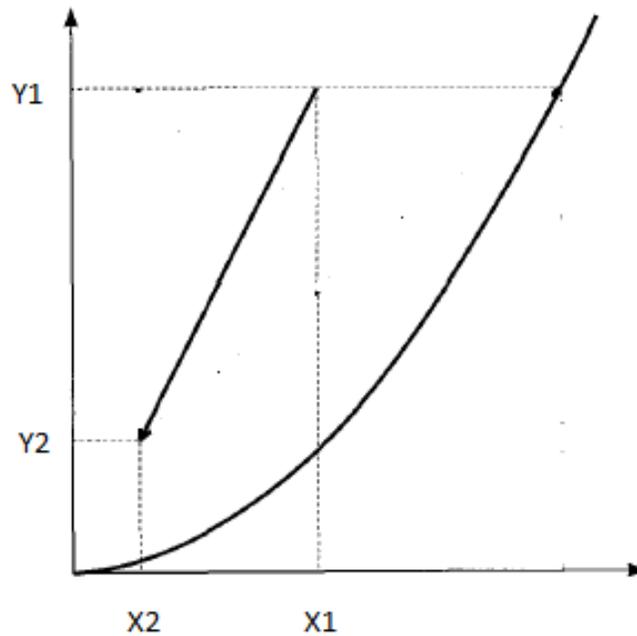


Figura 3.5 Curva de operación real. (Elaboración propia)

Conociendo la pendiente de la curva de operación real se determina la razón molar del líquido a la salida

$$\left(\frac{Ls}{Gs}\right)_{\text{Real}} = \frac{X_{1,\text{CO}_2} - X_{2,\text{CO}_2}}{Y_{1,\text{CO}_2} - Y_{2,\text{CO}_2}}$$

$$1897.27 \frac{\text{mol de H}_2\text{O libre de CO}_2}{\text{mol de biogás libre de CO}_2} = \frac{0.176 - 0.053}{X_{1,\text{CO}_2} - 0}$$

$$X_{1,CO_2} = 0.654 \times 10^{-4} \frac{\text{mol de } CO_2}{\text{mol de } H_2O \text{ libre de } CO_2}$$

El flujo de líquido es básicamente constante en todo el proceso y se determina con la ecuación 3.6:

$$L_s = \left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{\text{Real}} * G_s \quad (3.6)$$

$$L_s = 1897.27 \frac{\text{mol de } H_2O \text{ libre de } CO_2}{\text{mol de biogas libre de } CO_2} * 5211.43 \frac{\text{mol biogas libre de } CO_2}{\text{día}}$$

$$L_s = \mathbf{9887487.06} \frac{\text{mol } H_2O \text{ libre de } CO_2}{\text{día} * m^2}$$

Para convertir a flujo másico se utiliza el peso molecular del agua, con la ecuación 3.7:

$$L = L_s * PM_{H_2O} \quad (3.7)$$

$$L = 9887487.06 \frac{\text{mol } H_2O}{\text{día} * m^2} * 18.01528 \frac{\text{g } H_2O}{\text{mol } H_2O}$$

$$L = \mathbf{178126.85} \frac{\text{kg } H_2O}{\text{día} * m^2}$$

Y para llevarlo a flujo volumétrico se utiliza la densidad del agua que a 25 °C tiene un valor de 997.13 g/L, con la ecuación 3.8:

$$Q_{H_2O} = \frac{L}{\rho_{H_2O}} \quad (3.8)$$

$$Q_{H_2O} = \frac{178126.85 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{día}}}{997.13 \frac{\text{kg } H_2O}{m^3 H_2O}} = \mathbf{178.639} \frac{m^3 H_2O}{\text{día}}$$

Este será el flujo volumétrico de agua requerido para satisfacer la remoción requerida de CO_2 en el biogás.

Las curvas de operación mínima y real del sistema se muestran en la figura 3.6:

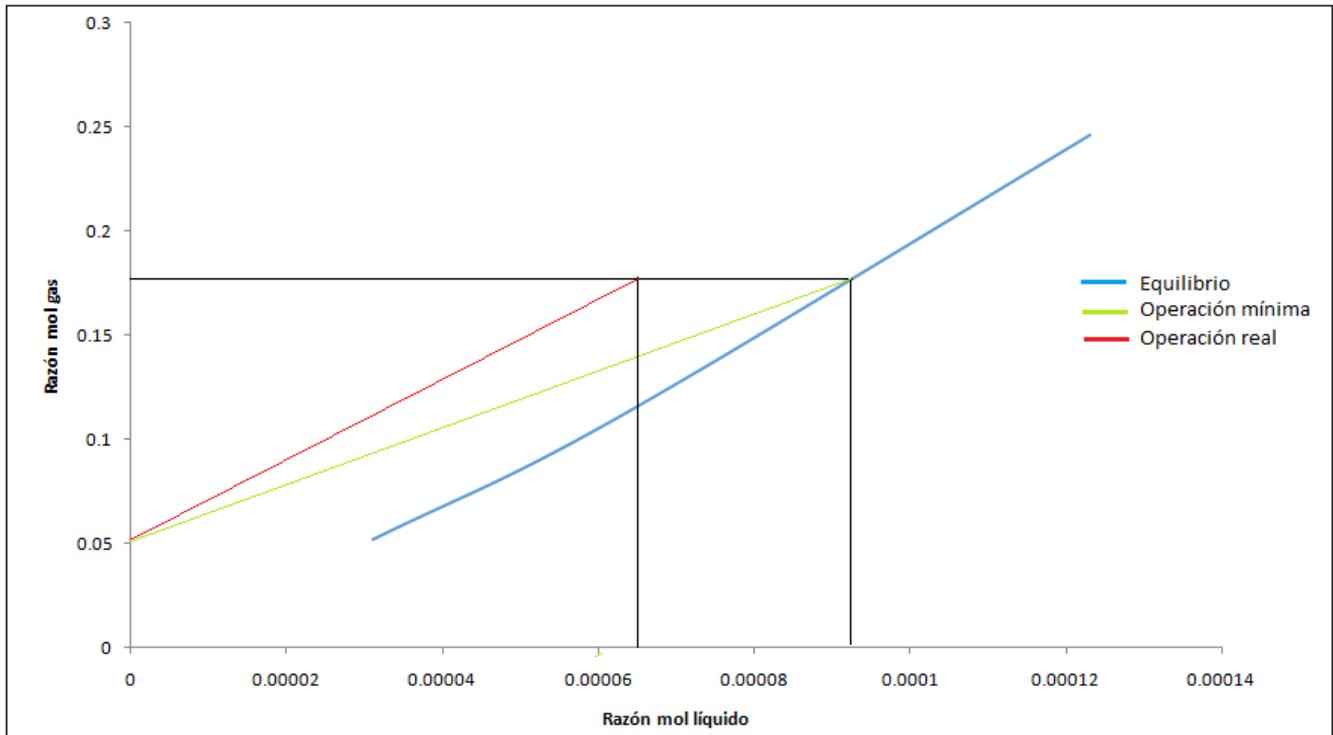


Figura 3.6 Curva de operación mínima y real del sistema. *(Elaboración propia)*

3.3.2.2 Parámetros Geométricos de la torre de absorción.

El tipo de torre a diseñar será torre empacada, con un empaque aleatorio de anillos Rasching cerámicos de 1 pulgada.

a) Altura de la Torre.

Para determinar la altura de la torre se empleará el método de unidades de transferencia, dado por:

$$Z = \text{HOG} * \text{NOG} \quad (3.9)$$

Donde:

Z: altura de la torre empacada.

HOG: altura total de la unidad de transferencia.

NOG: número de unidades de transferencia.

$$\text{HOG} = \text{HL} = \phi \left(\frac{L}{\mu_L} \right)^n \text{Sc}^{0.5} \quad (3.10)^1$$

L/A y μ_L se expresan en unidades por kg/h y kg/m³*h respectivamente.

En los sistemas CO₂-agua, la fase líquida es la fase dominante por esa razón se toma HL como HOG. La ecuación 3.10 está diseñada para sistemas en donde la fase líquida es dominante, y ya que en el sistema CO₂-agua, la fase líquida gobierna, la ecuación 3.10 es válida para el problema en cuestión.

ϕ y n valores dados para cada tipo de empaque 23.5×10^{-4} y 0.22, respectivamente, para empaque de anillos Rasching cerámicos de 1 pulgada. (Ver anexo B)

¹ Ecuación de Sherwood y Holloway

Sc número de Schmidt dado por:

$$Sc = \frac{\mu_L}{D_{AB}\rho_L} \quad (3.11)$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$HL = 23.5 * 10^{-4} * \left(\frac{7421.91 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{3.26426 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}}} \right)^{0.22} * \left(\frac{906.738 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{997.13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1.83236 * 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \right)^{0.5}$$

$$\boxed{HL = 0.286 \text{ m}}$$

El número de unidades de transferencia está dado por

$$NOG = \frac{\text{Ln} \left[(1-\varphi) \left(\frac{Y_i - mX_i}{Y_f - mX_i} \right) + \varphi \right]}{1-\varphi} \quad (3.12)$$

$$\varphi = m \frac{G}{L} \quad (3.13)$$

m: pendiente línea de equilibrio 162.337

$$\varphi = 162.337 \frac{\text{mol H}_2\text{O libre CO}_2}{\text{mol biogás libre CO}_2} * \frac{5211.43 \text{ mol biogás libre CO}_2}{9887487.06 \text{ mol H}_2\text{O libre CO}_2} = 0.086$$

$$NOG = \frac{\text{Ln} \left[(1 - .086) \left(\frac{0.176 - 162.337 * 0}{0.053 - 162.337 * 0} \right) + 0.086 \right]}{1 - 0.09}$$

NOG = 1.245 Unidades de transferencia.

$$Z = 0.2867 \text{ m} * 1.245$$

$$\boxed{Z = 0.357 \text{ m}}$$

Se requieren 35.7 cm de torre empacada para realizar la absorción desde una concentración de 15% hasta el 5% en mol, utilizando agua como solvente.

b) Diámetro de la Torre.

El cálculo del diámetro de la torre se realizará de forma analítica, como se presenta a continuación.

$$\ln \left[\frac{\left(\frac{a}{\varepsilon^3}\right) (G'/A)^2 \mu_L^{0.2}}{g \rho_G \rho_L} \right] = -4 \left(\frac{L}{G}\right)^{0.5} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.25} \quad (3.14)$$

Donde:

G: velocidad másica total del gas = 6131.1 mol/día = 0.001478 kg/s

G'/A: velocidad másica de inundación del gas, kg/h*m²

L: velocidad másica total del líquido = 2.06164 kg/s

ρ_L: densidad del líquido a las condiciones del sistema = 997.13 kg/m³

ρ_G: densidad del gas a las condiciones del sistema = 0.851471 kg/ m³

μ_L: viscosidad del líquido a las condiciones del sistema 0.906738 cP

ε, a_p características de empaque en torre: anillo Rasching cerámica 1 pulg. = 0.73, 190 m²/m³ respectivamente. (Ver anexo D)

Al sustituir y resolver para la ecuación 3.14 se obtiene una velocidad de inundación G'/A de 95.8536 kg/h*m².

El área de la torre se obtiene de la relación entre la velocidad del gas y la velocidad de inundación G/G'/A.

El área resulta ser de 0.05552 m². El diámetro se obtiene de la fórmula para el área de una circunferencia A= πD²/4, la torre tendrá un diámetro de:

$$\boxed{D = 26.59 \text{ cm.}}$$

c) Caída de Presión de la Torre.

$$\Delta P_T = \Delta P + \Delta P_i \quad (3.15)$$

$$\Delta P = \alpha(10^{\beta*L}) \left(\frac{G^2}{\rho_G} \right) \quad (3.16)$$

$$\Delta P_i = 93.9 F_p^{0.7} \quad (3.17)$$

$$\rho_G = \frac{PM_G * P}{T * R} \quad (3.18)$$

Donde:

PM: peso molecular de biogás a las condiciones dadas = 20.8316 g/mol

F_p , α , β : características de empaque en torre: anillo Rasching cerámica 1 pulg. = 179 ft²/ft³, 0.97 y 0.25 respectivamente. (Ver anexo E)

g: factor de conversión 1.27*10⁸.

ΔP en inH₂O/ft, ΔP_i en Pa/m

La caída de presión ΔP_T de 3545.39 Pa/m, con una altura de empacada de 26.59 cm la caída de presión total es 942.72 Pa.

3.3.2.3 Material de la torre.

Tomando en cuenta las geometrías de la torre de absorción, el material elegido para construir dicha torre es el policloruro de vinilo (PVC), ya que al trabajar en condiciones ambientales, este no presenta riesgo de degradación.

3.3.3 FILTRO DE HUMEDAD.

Cuando se extrae, el biogás está saturado de agua que hay que eliminar. La forma más común de hacerlo es mediante refrigeración. Tener agua en el gas puede ser peligroso porque puede

condensar junto con el H_2S y puede formarse H_2SO_4 y, por tanto, corrosión en las tuberías y equipos de proceso. Es por ello que el H_2S debe eliminarse antes de la refrigeración (Petersson y Wellinger, 2009).

Cuando el gas se enfría o se incrementa la presión, el vapor de agua condensa y el agua se puede retirar. El enfriamiento se puede conseguir conduciendo una tubería por el suelo, conectando una trampa de condensado o un condensador para retener el agua. (García, 2016)

3.4 PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA COMPRESIÓN Y ENVASADO DE BIOMETANO.

3.4.1 COMPRESIÓN DE BIOMETANO.

Un factor a tener en cuenta en un sistema de compresión de biogás es la necesidad de combustible para ser utilizado en motores de compresores, filtración, bombeo, iluminación, entre otros. (De Souza y Schaeffer, 2013)

En el proceso de purificación del biogás y conversión de este para biometano se retira el dióxido de carbono (CO_2) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) hasta que el porcentaje de metano quede próximo al del gas natural, para que pueda ser utilizado en los mismos usos finales. Ya que la quema del biogás sin la filtración del sulfuro de hidrógeno puede causar serios daños al medio ambiente (Horikawa, *et al.*, 2004).

En la quema del biogás sin remoción del sulfuro de hidrógeno ocurre la formación del dióxido de azufre (SO_2), causante de la lluvia ácida. La mayoría de los biodigestores produce un biogás que contiene entre 0,3 a un 3% de sulfuro de hidrógeno que puede ser eliminado por un filtro compuesto de óxido de hierro. La filtración del sulfuro de hidrógeno, entre otros componentes, es necesaria para la utilización eficiente, aumento del poder calorífico,

concentración de metano y no agresión a las partes metálicas de motores y equipamientos de quema. (De Souza y Schaeffer, 2013)

Con la compresión del biocombustible se viabiliza el envase y transporte. Eso permite la utilización del biocombustible en lugares distantes de los centros de producción. Biorreactores y fábricas de biometano por sí sólo no viabilizan la utilización del gas en lugares alejados del local de producción. La compresión, así como el tratamiento del biometano es el primer paso para la ampliación de la utilización de este biocombustible y para la comercialización del mismo. Esta tecnología podrá contribuir en el aumento del consumo de biometano de forma a cooperar con acciones tomadas para el incremento de biocombustibles en la matriz energética latinoamericana. (De Souza, 2010)

El compresor es un equipo destinado a aumentar la presión de un fluido gaseoso (Aire, hidrógeno, vapores, etc.). Este dispositivo convierte la energía mecánica en neumática encerrando el gas en un depósito que se utiliza en el cilindro de compresión. (De Souza *et. al.*, 2012)

Existen varios tipos de compresores, teniendo como principales dos tipos, definidos a partir de su modo de operación, compresores de desplazamiento positivo o también llamados compresores de pistón, (que se subdividen en alternativos y rotativos) y compresores de paletas (o dinámicos).

En los compresores alternativos (Ver figura 3.7) la compresión se realiza en una cámara que varía el volumen a través de un pistón que mueve comprimiendo el gas. Una válvula permite que el gas escape con una presión constante y otra permite que llene la cámara a medida que el pistón se mueve. (De Souza *et. al.*, 2012)

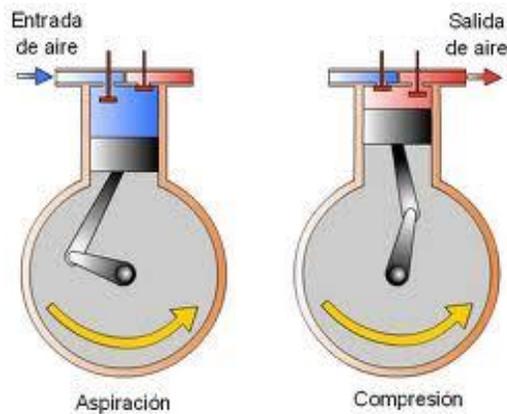


Figura 3.7 Compresores de pistón. (De Souza *et. al.*, 2012)

El biogás producido en el biorreactor, puede ser canalizado a través de conductos de composición polimérica como el polietileno de alta densidad (PEAD) para una estación de compresión, a continuación, luego de pasar por un filtrado y purificación para la reducción de gases y elementos no deseados transformando el biogás en biometano. (De Souza *et. al.*, 2012)

Con la filtración, la composición del biogás se altera habiendo a partir de entonces una mayor concentración de metano. Enseguida, esta nueva composición, ahora denominada de biometano, pasa por el sistema de compresión lo que posibilita el llenado de los cilindros. También puede ser canalizado por ductos para puntos de almacenaje, o aún conducido a grandes distancias para abastecimiento de redes de gas natural. El biometano puede también ser almacenado en gasómetros mayores para transporte en camiones o trenes. (Birath, 2008).

Las formas más comunes de almacenamiento del gas a baja presión son las propias cámaras de biodigestión o gasómetros, globos de vinilo, polietileno de alta densidad (PEAD) y mantas encauchadas (De Souza y Schaeffer, 2010); estas formas limitan la utilización del mismo a los locales de producción inviabilizando su transporte. Para las altas presiones la alternativa más viable es el uso de cilindros o tubos de acero inoxidable; los cilindros facilitan el transporte, almacenaje y manipulación, además el biogás puede ser usado como combustible en vehículos automotores, así, la mayoría de las aplicaciones donde es posible el uso del biogás para la utilización del mismo es necesario comprimirlo. (De Souza y Schaeffer, 2013)

3.4.2 EQUIPOS PARA COMPRESIÓN DE BIOMETANO.

Tabla 3.6 Descripción de equipos para la compresión de biometano. *(Elaboración propia)*

	IMAGEN	CARACTERÍSTICAS
Compresor para biogás / estacionario / de motor eléctrico / de pistón		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo: para biogás ▪ Instalación / movilidad: estacionario ▪ Accionamiento: de motor eléctrico ▪ Tecnología: de pistón ▪ Uso previsto: industrial ▪ Caudal: 30 m³/h (1059.44 ft³/h)
Compresor de gas natural / de aire / para biogás / estacionario		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo: de gas natural, de aire, para biogás ▪ Instalación / movilidad: estacionario ▪ Tecnología: de pistón ▪ Uso previsto: industrial ▪ Presión: <ul style="list-style-type: none"> Mín.: 3626 psi Máx.: 4496 psi ▪ Caudal: <ul style="list-style-type: none"> Mín.: 0 l/s (0 us gal/s) Máx.: 993 l/s (262.32 us gal/s) ▪ Potencia: <ul style="list-style-type: none"> Mín.: 0 W (0 hp) Máx.: 250 kW (335.26 hp)
Compresor de gas natural / para biogás / estacionario / de motor eléctrico		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo: de gas natural, para biogás ▪ Instalación / movilidad: estacionario ▪ Uso previsto: industrial

3.4.3 SISTEMA COMPRESIÓN Y ENVASADO DE BIOMETANO.

El biogás, que contiene principalmente metano, no se puede almacenar fácilmente, ya que no se licúa bajo presión a temperatura ambiente (la temperatura crítica y la presión requeridas son $-82.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 47.5 bar , respectivamente). (En la tabla 3.7 se muestran algunos requerimientos para la compresión de biogás)

La compresión del biogás reduce los requisitos de almacenamiento, concentra el contenido energético y aumenta la presión al nivel requerido para superar la resistencia al flujo de gas. Mediante la adopción tecnología se pueden prevenir 117 toneladas/día de gas CO_2 entrando en la atmósfera. (Kapdi *et al.*, 2004)

Tabla 3.7 Requerimientos de compresores de biogás y biometano. (Wettermann, 2006)

REQUERIMIENTO	BIOGÁS NO TRATADO	BIOGÁS TRATADO
Componentes del gas principal	CH_4 50-70 Vol. % CO_2 30-50 Vol.% H_2S $\leq 2000\text{ ppm}_v$	CH_4 $\geq 96\text{ Vol.}\%$ CO_2 $< 4\text{ Vol.}\%$ H_2S $\leq 5\text{ mg/Nm}^3$
Temperatura de aspiración	30 – 45°C	20 – 40 °C
Presión de aspiración	1 – 1.1 bar abs	1 – 12 bar abs.
Presión final	2 – 14 bar abs	2 – 25 bar abs
Volumen de flujo	5 – 4000 Nm^3/h	5 – 1200 Nm^3/h
Demanda de energía	$\leq 400\text{ Kw}$	$\leq 400\text{ Kw}$
Compresión	Sin aceite	Sin aceite

La figura 3.8 muestra las partes que conforman un compresor utilizado para la compresión de biogás y/o biometano:

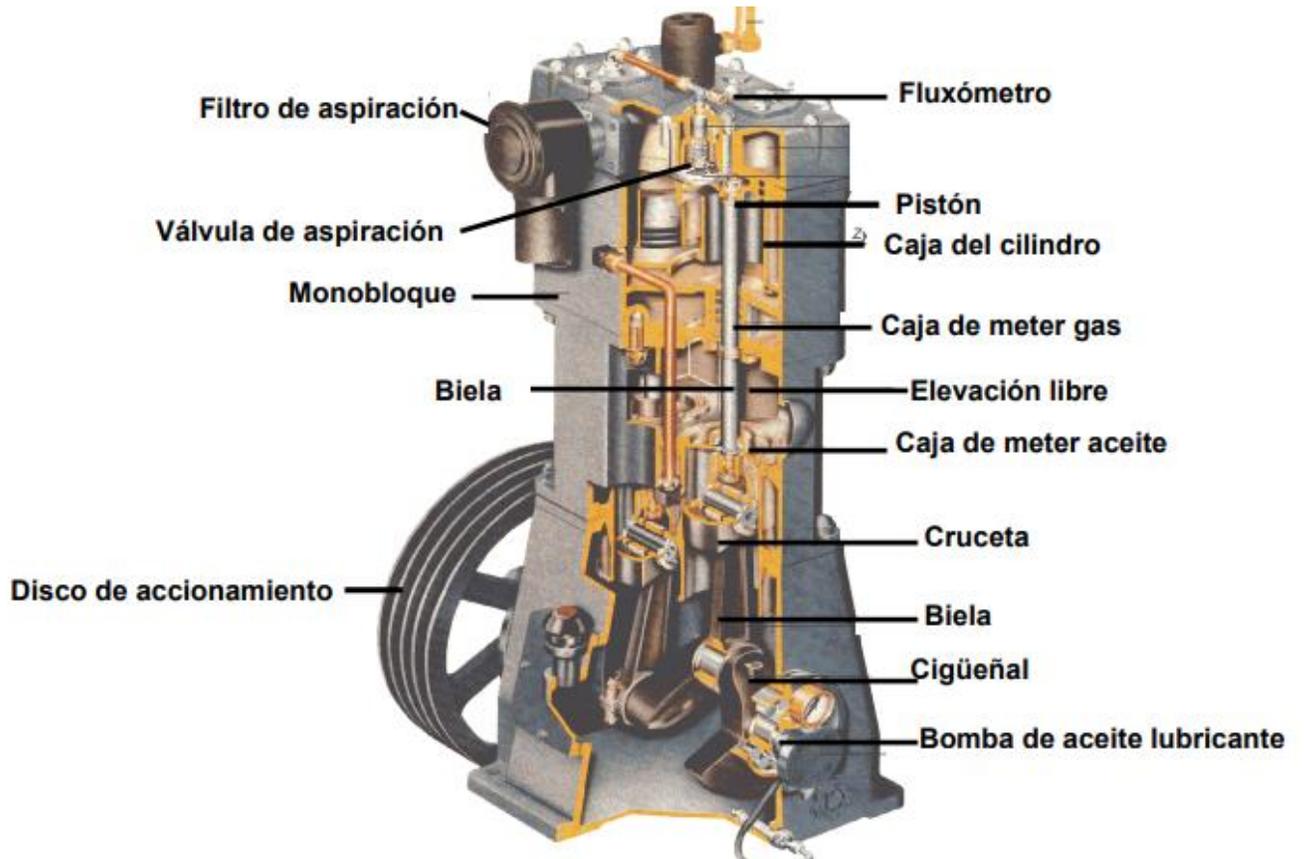


Figura 3.8 Estructura de un compresor para biogás. (Wettermannm 2006)

En la tabla 3.8 se presentan las opciones de almacenamiento de biogás más utilizadas:

Tabla 3.8 Opciones de almacenamiento de biogás. (Kapdi et al., 2004)

PRESIÓN	DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO	MATERIAL
Baja (0.4114-1.04 bar)	Bolsa de gas	Caucho, plástico, vinilo.
Media (1.05-1.97 bar)	Tanque de propano o butano	Acero
Alta (200 bar)	Cilindros de gas comerciales	Aleación

El sistema de purificación y compresión del biogás, que consta de 4 fases fundamentales. La primera fase (filtrado de H₂S) posee un filtro denominado “filtro primario” para la eliminación de (H₂S). La segunda fase (disminución de CO₂) consta de una torre de absorción con agua como se ha propuesto anteriormente, el agua entra a la torre y es esparcida en su interior interactuando con el biogás a contracorriente; el agua sale por la parte inferior de la torre para ser nuevamente recirculada por una bomba.

En la tercera fase (eliminación de humedad) pasa el biogás después de haber concluido el proceso de eliminación y disminución de impurezas (H₂S y CO₂), por un tercer filtro, filtro de humedad, absorbiendo alguna cantidad de agua o humedad residual que contenga aún el biogás. En la cuarta fase (compresión de biogás) consta de un compresor de refrigeración, con una capacidad de compresión de máxima de 3447.37 kPa, el cual succiona al biogás desde el filtro primario, pasando por la torre y después por el filtro de humedad; lo comprime y almacena en un tanque de alta presión de 10 kg diseñado para almacenar gas a una presión de 1620.26 kPa. (Vázquez et al., 2015)

El proceso de purificación compresión y envasado del biogás puede observarse en la figura 3.9.

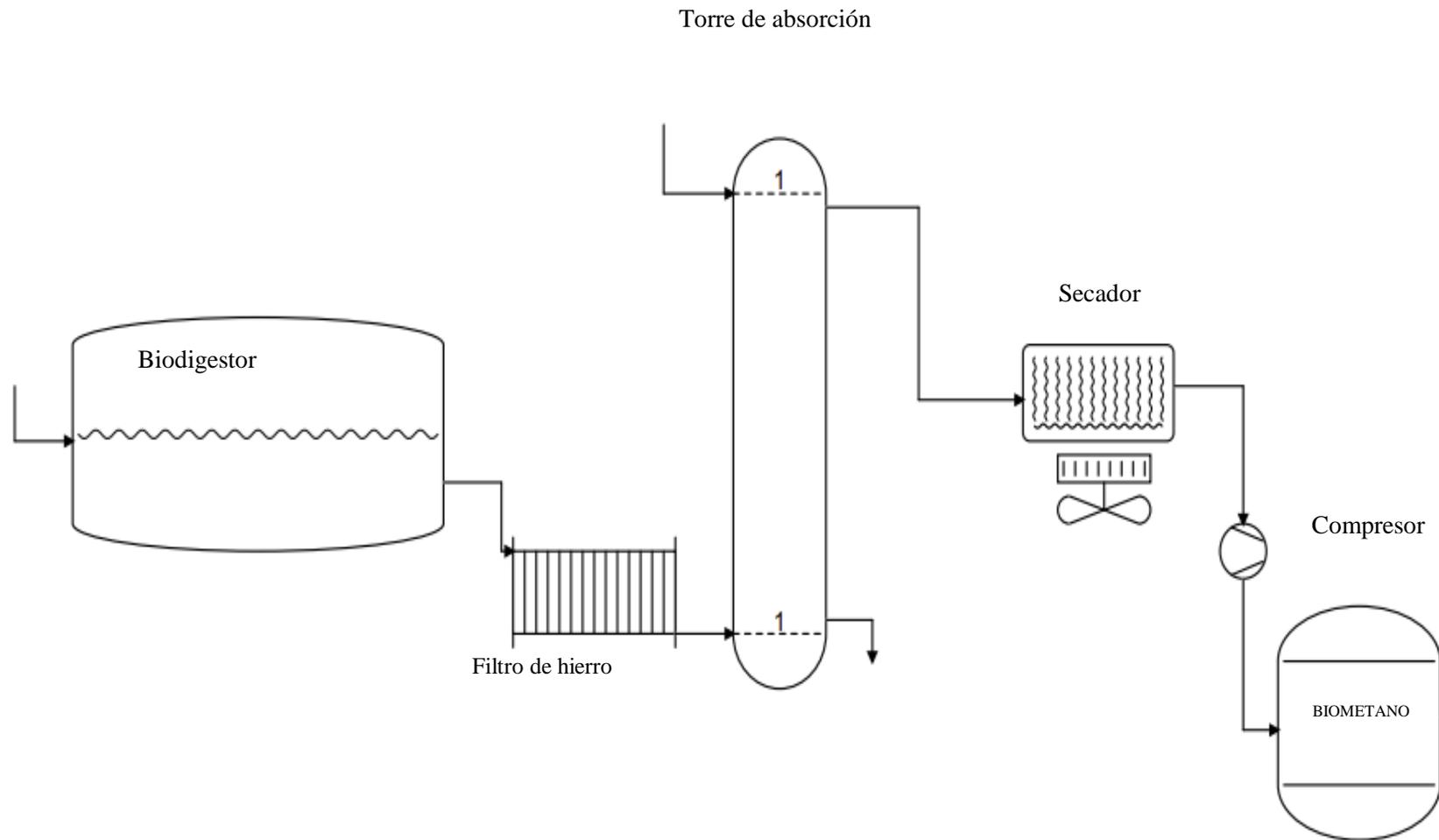


Figura 3.9 Diagrama del proceso de purificación y envasado de biometano. *(Elaboración propia)*

3.4.4 FACTORES DE RIESGO EN COMPRESORES.

Tabla 3.9 Factores de riesgo en compresores. (*Universidad Politécnica de Valencia, 2012*)

RIESGOS	CAUSAS	MEDIDAS CORRECTORAS
EXPLOSIONES	Falta de resistencia del material	<p>Instalación de compresores con expediente de control de calidad que garanticen un adecuado diseño y fabricación del aparato.</p> <p>Ser objeto de revisiones periódicas. son obligatorias dos tipos de Inspecciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anuales • Periódicas
	Exceso de presión	<p>Instalación de dispositivos que limiten la presión de Servicio a la de Diseño del elemento de la Instalación que la tenga más baja.</p> <p>Instalación de válvulas de seguridad:</p> <p>La sobrepresión no sobrepasará el 10% de la presión de tarado de la válvula, cuando ésta descargue a caudal máximo.</p>
	Auto inflamación del aceite de lubricación en la compresión	<p>Correcta elección del aceite lubricante, según la Presión de trabajo.</p>
	Por descarga electrostática	<p>Unión de todas las masas y elementos conductores entre sí y a tierra.</p> <p>Mantenimiento de una humedad relativa del aire del 50-60%.</p>
INCENDIOS	Cortocircuitos eléctricos (en caso de motor eléctrico)	<p>Puesta a tierra de todas las masas metálicas, asociada a Interruptores Diferenciales de Media Sensibilidad.</p>
	Inflamación del combustible (en caso de motor de explosión)	<p>Instalación de bandejas contra los derrames en los depósitos y contenedores de combustibles.</p> <p>Limpieza periódica de la zona.</p>
	Excesiva temperatura del aire comprimido	<p>Control y Regulación de la Temperatura del aire a la salida de la cámara de compresión.</p>
	Excesiva temperatura del aceite de refrigeración (en caso de refrigeración por aceite)	<p>Control y Regulación de la Temperatura del aceite de refrigeración.</p> <p>Deberán dejar de funcionar automáticamente en caso de parada de la bomba de aceite.</p>

3.5 CARACTERIZACIÓN DE CILINDROS PARA ENVASADO DE BIOGAS.

3.5.1 ENVASADO DE GASES.

Se designa como “gas” a todo elemento o compuesto que a presión y temperatura ambiente permanece en estado gaseoso. Se usa el concepto de “vapor” para la fase gaseosa de cualquier elemento o compuesto que, en las mismas condiciones, es normalmente líquido o sólido. Existen once elementos que tienen esta condición de gases, así como un número aparentemente ilimitado de compuestos y mezclas como el aire. Estos once elementos son: Oxígeno, Nitrógeno, Hidrógeno, Cloro, Fluor, Helio, Neón, Argón, Kriptón, Xenón y Radón.

Los cilindros de alta presión son envases de acero de calidad especial, fabricados sin uniones soldadas (Figura 3.10) y tratados térmicamente para optimizar sus propiedades de resistencia y elasticidad. Los cilindros son cargados a alta presión, comprimiendo el gas en el reducido espacio interior del cilindro. Para lograr altas presiones se utilizan cilindros de acero que trabajan con hasta 200 bar. Se usan cilindros de alta presión para contener la mayoría de los gases de uso industrial.

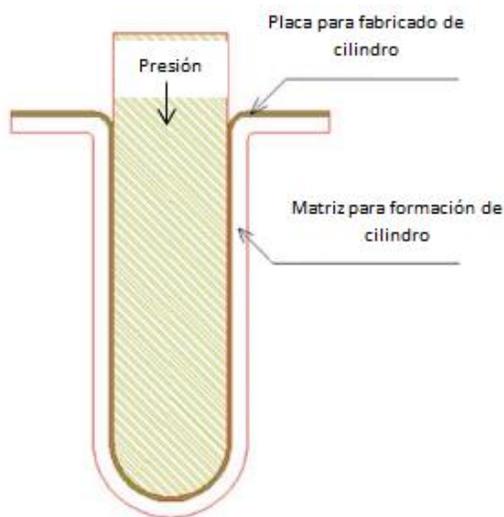


Figura 3.10 Diagrama de moldeo de tanques. (De Souza y Schaeffer, 2010)

Por ejemplo, en un cilindro de acero de capacidad interior de $0,05\text{m}^3$, se almacenan $9,3\text{m}^3$ de Oxígeno, es decir 186 veces el volumen físico del cilindro, a una presión de 176,6 bar. A temperatura ambiente, para contener esta misma cantidad de oxígeno, a presión ambiente normal de se requeriría de 180 cilindros de igual tamaño. Esto significa entonces que, cuanto mayor sea la presión de un gas en un cilindro, mayor es la cantidad de gas contenido en él.

3.5.1.1 Partes de un tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento consta de cinco partes (figura 3.11):

1. Gorro/ Tapa de protección de la válvula: La función principal de este elemento es la protección de la válvula de seguridad contra golpes que puedan dañar dicha válvula.
2. Válvula: Este aparato debe poseer dispositivos de seguridad en contra de repentinos aumentos de presión debido al aumento de temperatura, para evitar la fuga del gas.
3. Cuello del tanque: parte que posee mayor espesor, es en donde debe ir inscrito o estampado el número de identificación del cilindro.
4. Cuerpo del tanque: de menor espesor que el cuello, es la parte más larga del tanque.
5. Etiqueta de identificación del gas: Debe indicar el nombre del gas, así mismo su símbolo químico y su clasificación.

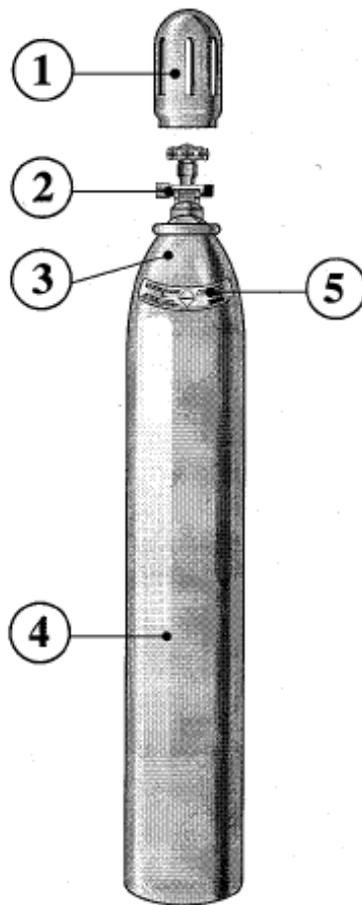


Figura 3.11 Partes de un tanque de almacenamiento. (NEO-05)

3.5.1.2 Etiquetado de un cilindro de almacenamiento.

Todos los cilindros que contienen gas comprimido para uso industrial, deben tener marcas permanentes, mediante el uso de etiquetas, para identificar el gas o las mezclas de gases comprimidos, las clases de riesgo que pueda existir para los usuarios y las precauciones principales de seguridad. Las marcas (etiqueta) de identificación del cilindro deben incluir:

- a) El nombre y la fórmula química del producto contenido gas o de la mezcla de gases contenida en el cilindro.

b) El color correspondiente al gas contenido o los colores que corresponda a los gases de la mezcla contenida en el cilindro.

c) La identificación del proveedor (nacional o importador), incluyendo un número de teléfono de la casa matriz del proveedor, que pueda atender consultas técnicas o de seguridad, durante las 24 horas del día.

d) Un espacio para el número telefónico de un centro de información toxicológica oficial (si este existe), en el caso de los gases tóxicos o corrosivos para el hombre, clasificados como tóxicos, con riesgo secundario de corrosividad.

3.5.1.3 Color del tanque

Para la selección del color, se seguirá el código de colores de la norma NEO-05, la cual sugiere que la combinación de colores que se debe utilizar en el pintado de los recipientes de metano es el presentado en la figura 3.12:



Figura 3.12 Código de colores para tanques de metano. (NEO-05)

3.5.2 CARACTERIZACIÓN DEL CILINDRO

3.5.2.1 Material

Los cilindros para almacenamiento de biogás, serán fabricados a partir de acero; tendrán forma cilíndrica. No deben tener ningún tipo de soldaduras y también se debe verificar que el cilindro no posea ninguna clase de abolladura o defecto. El cilindro debe ser recubierto con una película de pintura anticorrosiva y sobre esta película se debe colocar una capa de pintura adecuada para metales. (RTCA 2005)

3.5.2.2 Diseño

El diseño del cilindro de biogás, depende de la cantidad de gas que se va a almacenar. El espesor de la pared del cilindro, se estima en 1.98 mm. Hablando de dimensiones del cilindro, se pretende utilizar uno de un solo tamaño, el cual asemejaría al de 25 lb de gas propano. Teniendo como dimensiones 31 cm de diámetro externo y 50 cm de altura.

Base de sustentación del cilindro: el fondo de los cilindros debe tener una base de sustentación protectora con las siguientes características (Figura 3.13):

- a) Estar formada por un aro de pared simple con reborde y soldado a la parte final del tanque.
- b) El espesor mínimo de la lámina de la base debe ser del mismo espesor especificado para el cuerpo del cilindro.
- c) Estar provisto de aberturas en su reborde para ventilación y drenaje.
- d) Su diámetro exterior debe ser al menos el 80% del diámetro exterior del cilindro.
- e) Proporcionar suficiente estabilidad cuando los cilindros se coloquen en posición vertical y su altura no debe permitir el roce del fondo del cilindro con el piso. (RTCA 2005)

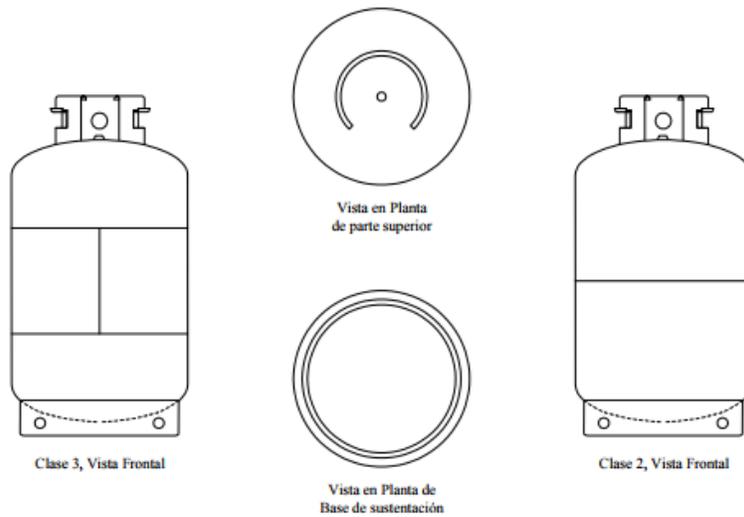


Figura 3.13 Diseño de cilindros para almacenamiento de gas. (RTCA 2005)

3.5.2.3 Almacenamiento de cilindros de gas.

A continuación, se presentan las medidas de seguridad más importantes que propone la norma, para tomar en cuenta al momento de almacenar los cilindros que contengan metano.

- Los cilindros deben ser almacenados en áreas destinadas para ese propósito.
- Si se almacenan cilindros en el interior de un recinto, el lugar de almacenamiento deberá ser un lugar seco, con una buena ventilación natural, protegido del sol y lejos de fuentes de ignición. (figura 3.14)

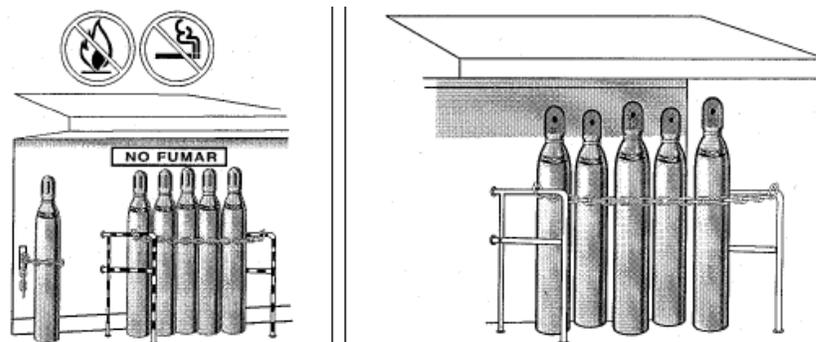


Figura 3.14 Almacenamiento de cilindros. (NEO-05)

- El recinto debe contar con aberturas de ventilación adecuadas, tanto junto al techo como al suelo.
- Los cilindros de gas en el lugar de almacenamiento, no deben alcanzar una temperatura superior a los 50°C, por lo tanto, no deben estar cerca de hornos, radiadores o cualquier otra fuente de calor excesivo (figura 3.15).

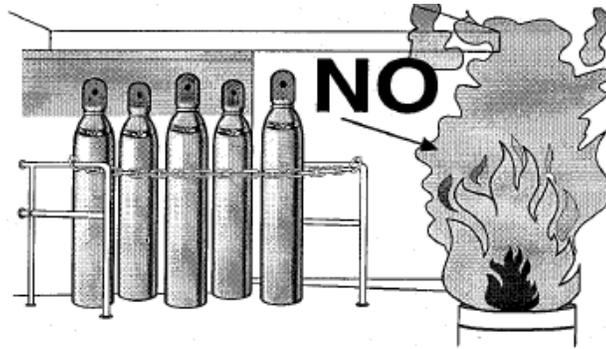


Figura 3.15 Cilindros expuestos a altas temperaturas. (NEO-05)

- Cuando los cilindros están estacionarios, se deben afianzar con una cadena u otro sistema de seguro a muros, columnas, postes o barandas para evitar su caída (figura 3.16 a).
- Los cilindros deben almacenarse con cuidado y siempre en posición vertical para evitar que rueden, se golpeen y choquen entre sí (figura 3.16 b y c).

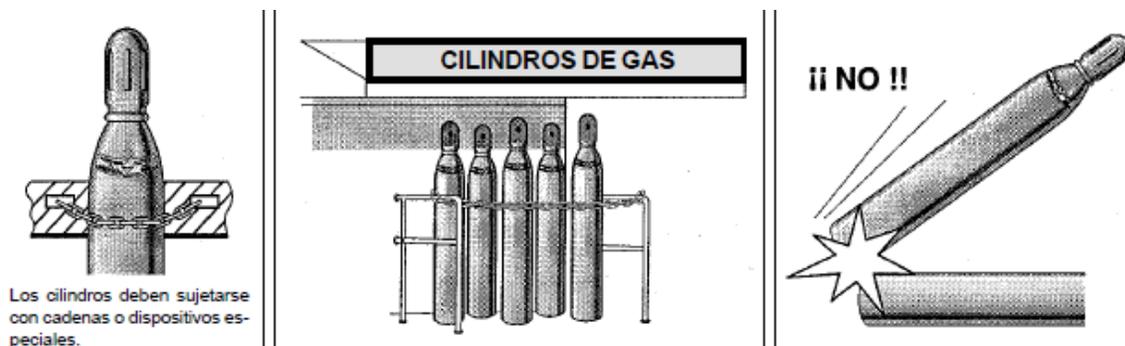


Figura 3.16 a) Cilindro asegurado b) Cilindros de forma vertical c) Evitar golpes de cilindros. (NEO-05)

- Se deberá mantener siempre cerradas las válvulas de los cilindros vacíos con la tapa gorro asegurada, cubriendo la válvula, por cuanto los cilindros vacíos aún contienen gas.
- Nunca se dejará caer un cilindro, aunque esté «vacío» ya que siempre éste contiene un remanente de gas.
- No bloquear nunca las salidas de emergencia con cilindros de gas.
- En dichos recintos se debe mantener en buen estado de uso, equipos apropiados para la extinción de incendios, especialmente de CO₂ o polvo químico seco.

3.5.2.4 Manipulación y transporte de cilindros

Al manipular cilindros, se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Al transportar cilindros de gas, hay que asegurarse que no haya ninguna posibilidad de fuga.
- Antes de mover, trasladar o transportar los cilindros de gas, deben tener atornillada o asegurada la tapa gorro de protección de la válvula, de tal manera que no se pueda abrir la válvula accidentalmente.
- Nunca los cilindros deben levantarse o manipularse desde las válvulas.
- Para subir o bajar los cilindros desde alturas considerables, deben utilizarse eslingas, cuñas, canastillos o plataformas adecuadas y debidamente construidas y autorizadas y que cumplan con los estándares requeridos.
- Los cilindros nunca deben ser levantados o bajados con electroimanes.
- Los cilindros de gas al ser transportados, ya sea en carros, jaulas o canastillos, o vehículos deberán estar en posición vertical (figura 3.17).



Figura 3.17 Transporte de cilindros. (NEO-05)

- Los cilindros no deben arrastrarse ni hacerse rodar sobre su cuerpo por el suelo. Debe usarse siempre el transporte adecuado (figura 3.18).



Figura 3.18 Mala manipulación de cilindros. (NEO-05)

- Los cilindros al ser usados, deberán estar en posición vertical (figura 3.19)

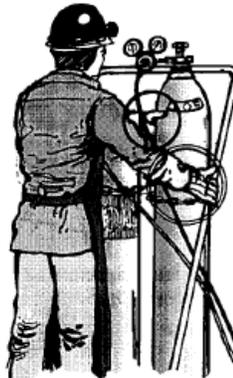


Figura 3.19 Correcto uso de cilindros. (NEO-05)

CAPÍTULO IV: PROPUESTA PILOTO DE PROCESO DE PURIFICACIÓN Y ENVASADO DE BIOGÁS.

Anteriormente se planteó un proceso de muestreo, análisis, purificación y compresión de biogás, partiendo desde un proceso en el cual se genere biogás y no sea aprovechado en su totalidad; a continuación, se cita lo que se propone (Los datos que se brindan a continuación son válidos para un caudal de 150 m³ de biogás, trabajando a 1 atm de presión y 25°C de temperatura)

A pesar de que se citaron metodologías de muestreo de biogás, la metodología elegida para la propuesta presentada en este trabajo, no necesita una muestra para el análisis del biogás. Se trata de la utilización del equipo llamado Sewerin Multitec 540®, el cual permite realizar una caracterización rápida del biogás, además de contar con la ventaja de no necesitar una muestra específica del biogás, ya que el equipo posee la capacidad de medirlo directamente.

Luego, el biogás entra en un proceso de purificación, el cual inicia con la remoción del ácido sulfhídrico (H₂S), la cual se lleva a cabo por un filtro de limaduras de óxido férrico (Fe₂O₃), que, para las características de operación del proceso elegido, se usarían aproximadamente 160 g de limaduras de hierro al día para remover los 90 g de H₂S que se producen en el biodigestor.

Luego de la purificación de H₂S pasa el caudal por una torre de absorción donde se da la remoción del dióxido de carbono, los datos de operación de la torre se describen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de parámetros de operación de la torre de absorción. *(Elaboración propia)*

PARÁMETRO	RESULTADO
G = Flujo del gas	$6131.1 \frac{\text{mol biogás}}{\text{día}}$
Gs = Flujo de gas purificado	$5211.43 \frac{\text{mol biogás libre de CO}_2}{\text{día}}$
$Q_{\text{H}_2\text{O}}$ = Caudal de agua requerido	$178.639 \frac{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{día}}$

Los parámetros geométricos de la torre de absorción propuesta se muestran en la figura 4.1:

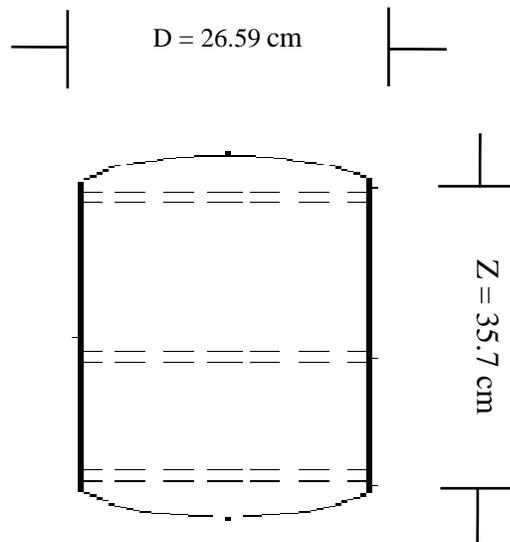


Figura 4.1 Dimensiones de la torre de absorción. *(Elaboración propia)*

El gas que entra en este proceso sufre una caída de presión de 942.72 Pa.

Luego de pasar por un proceso de secado, finalmente el gas purificado se comprime hasta una presión final de 16 bar aproximadamente, se propone el uso de un compresor que cumpla con los siguientes requerimientos (Ver tabla 4.2).

Tabla 4.2 Requerimientos de compresor a utilizar. *(Elaboración propia)*

REQUERIMIENTO	VALOR
Caudal	5211.43 $\frac{\text{mol biogás libre de CO}_2}{\text{día}}$
Presión final	16 bar
Temperatura	20 – 40°C

En cuanto al envase seleccionado, se propone un envase de acero inoxidable, con dimensiones de 31 cm de diámetro y 50 cm de altura (Sin tomar en cuenta la base ni la protección de la válvula), y el espesor de la pared del cilindro se estima en 1.98 mm.

El color del tanque debe reflejar el contenido, por lo que se propone pintar la parte superior del tanque de rojo y la inferior de negro.

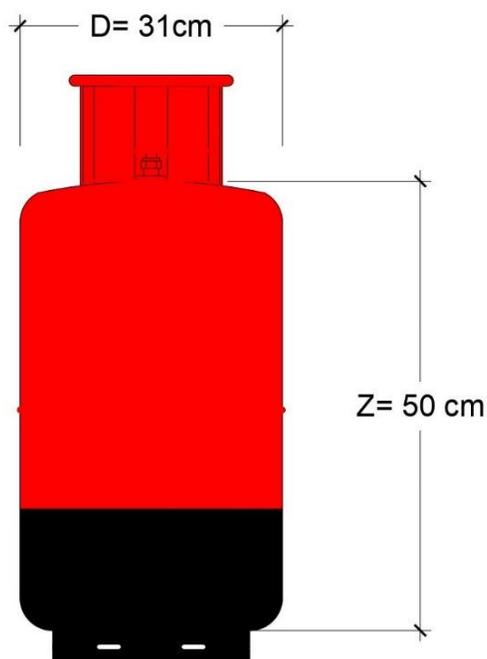


Figura 4.2 Dimensiones del cilindro de almacenamiento de biogás. *(Elaboración propia)*

CONCLUSIONES.

Actualmente en El Salvador, es necesario llevar a cabo una gran inversión para un proceso rentable de purificación y envasado de biogás ya que los biodigestores que operan actualmente no cuentan con este tipo de tecnología.

El biogás producido en nuestro país contiene altas concentraciones de metano lo que facilitaría su purificación y posterior almacenamiento en recipientes adecuados donde es posible alcanzar con mayor facilidad las condiciones requeridas para que pueda ser envasado.

El correcto funcionamiento de una planta de tratamiento de agua, brinda a una empresa la capacidad de aprovechar un desecho; el biogás producido en las empresas visitadas es una gran alternativa de energía, siendo el biogás un sustituto renovable a la quema de combustibles fósiles como fuente de energía.

El análisis del biogás procedente de los biodigestores es una herramienta muy importante para el posterior tratamiento del biogás, tomando en consideración que las cantidades de sustancias de purificación a utilizar dependen de las concentraciones de los contaminantes presentes en el biogás de los diferentes biodigestores.

Para el caso de los resultados obtenidos en este trabajo, el caudal de biogás seleccionado es equivalente a un día de producción; para el cálculo de la purificación de este mismo no se tomaron en cuenta usos alternativos del biogás, por lo que, si el biogás se utiliza en otros procesos, se debe recalculan las cantidades para la purificación del nuevo caudal.

Es de suma importancia, tomar en cuenta las normas de seguridad que conlleva el manejo de este tipo de gases inflamables, ya que un error en la manipulación de este producto puede conllevar a pérdidas muy graves tanto de equipos de producción, como de daños al personal de trabajo. Los cilindros de almacenamiento de gas también deben de ser tratados con mucho cuidado porque una mala manipulación de estos, puede conllevar a incendios o explosiones.

RECOMENDACIONES.

Se recomienda un recalcu de parámetros de operación para otro tipo de procesos. Los datos presentados anteriormente son válidos para los parámetros de operación establecidos en el apartado 3.3.2.

Para el caso de los efluentes de la etapa de purificación, es necesario un subproceso para el tratamiento de las virutas de hierro que se cargan con H_2S , con lo cual se pueda obtener productos útiles a partir de los desechos, por lo que se sugiere continuar con una investigación que brinde la metodología necesaria para el tratamiento de estos desechos.

Para la construcción de un biodigestor, se recomienda colocar una válvula destinada al muestreo del gas, ya que es necesario conocer las concentraciones de biogás que se tienen, para poder realizar la purificación del mismo con datos más precisos en cuanto a la cantidad de virutas de óxido férrico y de caudal de agua a utilizar en los procesos de purificación.

En cuanto a las cantidades de óxido férrico y agua para la purificación, se recomienda trabajar con un exceso de seguridad, es decir, no trabajar con las cantidades exactas que se calcularon de estos productos, ya que, en los procesos reales, generalmente hay factores externos que interfieren en el momento de llevar a cabo los distintos procesos.

También es necesario tener en cuenta que la altura sugerida de la torre de absorción, es la mínima necesaria para llevar a cabo la eliminación del dióxido de carbono, por lo que se sugiere trabajar con un margen de seguridad en la altura para llevar a cabo esta purificación.

Se ha recomendado para el almacenamiento del biogás el uso de cilindros de 25 lb similares a los utilizados para almacenar gas propano, el cuál debe ser pintado de rojo en la parte superior y de negro en la parte inferior para poder identificar su contenido de manera visual, y un tamaño de 50 cm de altura y 31 cm de diámetro externo 1.98 mm.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Acosta, M., Revelo, D., Ruiz, O., Tax, O. y Botero, R. (2009). Capacidad de filtración y retención del sulfuro de hidrógeno (H₂S) del biogás, en dos diferentes sustratos orgánicos (em-compost y lombricompost). *Tierra tropican*, 5(1), 109-113.
- Alemán A. y Vásquez M. (27 de febrero de 2017) La basura, una alternativa para la crisis energética. [Mensaje en un blog] Diario de Xalapa. Recuperado de <https://www.diariodexalapa.com.mx/cultura/la-basura-una-alternativa-para-la-crisis-energetica>
- Álvarez, N. (2016). *Procesos de adsorción para la captura de CO₂ en corrientes de biogás*. (Tesis doctoral). Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos. (2004) Uso de biorreactores para controlar la contaminación del Aire.
- Birath, K., Backman, H., Franzén U. y Liljenroth, U. (2008) *Technical guidance to biofuels*. Utrecht, Países Bajos.
- Bothi, K. L. (2007). *Caracterización del biogás de un biodigestor anaeróbico de desechos para uso energético*. (Tesis de maestría) Universidad de Cornell, Nueva York, Estados Unidos.

- Campos, J. L., Carvalho, S., Portela, S., Mosquera-Corral, A. y Méndez, R. (2008). Kinetics of denitrification using sulphur compounds: Effects of S/N ratio, endogenous and exogenous compounds. *Bioresource Technology*, 99(1), 1293-1299.
- Carroll, J. J., Slupsky, J.D. y Mather, A. E. (1991). The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure. *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 20(6), 1200 – 1209.
- Cepero, L., Savran, V., Blanco, D., Díaz, M. R., Suárez, J. y Palacios A. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forraje*. 35(2), 219-226.
- Crespo, Enrique. (2008) Técnicas de Muestreo. Módulo: Contaminación Atmosférica. Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental.
- COGERSA - *Captación de Biogas*. (2017). COGERSA. Recuperado el 18 de Enero 2017, de <http://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/19174>
- Coulson, J. M., Richardson, J. F., Backhurst, J. R. y Harker, J. H. (1981) *Ingeniería Química. Operaciones básicas. Tomo II*. Editorial Reverté. Barcelona. España.
- De Souza, J. (2010). *Desenvolvimento de Tecnologias para Compressão de Biogás* (Tesis de maestría). Universidad Federal do Rio Grande Do Sul.
- De Souza, J. y Schaeffer, L. (2010) Estudo para fabricação de cilindros especiais para biometano. *Revista LIBERATO, Educação, Ciência e Tecnologia*, 11(15) 33-38.

- De Souza, J., Luna, W. y Schaeffer, L. (2012). Sistema de compresión de biogás. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 29(1), 13 - 17.
- De Souza, J. y Schaeffer, L. (2013). Sistema de compresión de biogás y biometano. *Información Tecnológica*, 24(6), 3-8.
- Etcharren, P. (2005). *Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de la fábrica "Lubascher y Krausse" Temuco*. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Temuco, Temuco, Chile.
- Fernández, E. (2004). *Procedimiento para la purificación de biogás*. (Tesis de pregrado). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. (Cujae), La Habana, Cuba.
- Friedrich C. G., Rother, D., Bardischewsky, F., Quentmeier, A. y Fischer, J. (2001). Oxidation of reduced inorganic sulfur compounds by bacteria: Emerge of a common mechanism. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(7), 2873-2882.
- García Sánchez, F. J. (2016) *Producción de biometano a partir de biogás de vertedero*. (Tesis de maestría). Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- González, A. (2006) *Estudio de la oxidación biológica de compuestos reducidos de azufre por un consorcio alcalófilo en un biorreactor*. (Tesis doctoral). Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México D. F., México.

- Hidalgo, J. A., Maravilla, V. A. y Ramírez, W. O. (2010). *Aprovechamiento energético del biogás en El Salvador*. (Tesis de pregrado). Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- Horikawa, M. S. (2001) Purificação de biogas, Remoção de H₂S. Dissertação de Mestrado, PEQ, Universidade Estadual de Maringá.
- Horikawa, M. S., Rossi, F., Gimenes, M. L., Costa, C. M. M. y Silva, M. G. C. (2004). Chemical absorption of H₂S for biogas purification. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21(3), 415 – 422.
- Kapdi, S.S., Vijay, V.K., Rajesh, S.K. y Prasad, R. (2004) Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy*, 20(1), 1-8.
- Kleerebezem, R. y Mendez, R. (2002). Autotrophic denitrification for combined hydrogen sulfide removal from biogas and post-denitrification. *Water Science and Technology* 45(1), 349-356.
- Llaneza, H., Morís, M. A., Gonzáles, L. y Gonzáles, E. (2010) Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. PSE Probiogás. España.
- Madigan, M., Martinko, J. y Parker, J. Brock. (2006) *Biología de los microorganismos (Décima Edición)*. Pearson Educación, S.A.
- McKinsey, S. (2003). *Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost*. (Tesis de maestría) Universidad de Cornell. New York, U.S.A.

- Mejía Barrera, C., Mejía Terezon, C. and Ramírez Bermúdez, D. (2005). *Estudio de factibilidad técnico económico para la implantación de una planta productora de biogás a partir de desechos orgánicos*. Universidad de El Salvador.
- Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. (2011). *Manual del Biogás*. Santiago de Chile, Chile.
- Morero, B., Gropelli, E. y Campanella, E. A. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y tecnología*, 10(1), 187-201.
- Morero, B. y Campanella, E. A. (2013). Simulación del Proceso de Absorción Química con Soluciones de Aminas para la Purificación Biogás. *Información Tecnológica*, 24(1), 25-32.
- Ortega, L., Rodríguez, S., Fernández, E. y Bárcenas, L. (2015) Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 36(2), 45-56.
- Pérez, H. y Villa, P. (2005) Desulfuración biológica: una alternativa para el tratamiento de emisiones de gases a la atmosfera. *Agua Latinoamericana*. 5(3), 17-20.
- Petersson, A. y Wellinger, A. (2009) Biogas upgrading technologies – developments and innovations. Task 37 - Energy from biogas and landfill gas.

- Pineda Martínez, G. A. (2011) *Caracterización de biogás proveniente de la fermentación de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel por medio de cromatografía de gases*. (Tesis de Pregrado) Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Prescott, L.M., Harley, J.P. y Klein, D.A. (2003) *Microbiology*. (Fifth Edition), McGraw-Hill Companies.
- Ramírez, M. (2007). *Viabilidad de un proceso para la eliminación conjunta de H₂S NH₃ contenido en efluentes gaseosos*. (Tesis doctoral). Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- Rattanapan, C. y Ounsaneha, W. (2011) Removal of Hydrogen Sulfide Gas using Biofiltration - a Review. *Walailak Journal of Science and Technology*.
- Reglamento Técnico Centroamericano (2005) Recipientes a presión. Cilindros portátiles para contener GLP. Especificaciones de fabricación.
- Revah S. y Ortiz I. (2004) El desarrollo de bioprocesos para el tratamiento de aire contaminado emitido por fuentes fijas. *Fundamentos y Casos Exitosos de la Biotecnología Moderna*. 625- 658.
- Rodríguez S. (2009). *Alternativas de desulfuración de efluentes gaseosos basadas en métodos biotecnológicos*. (Tesis doctoral). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana, Cuba.

Soreanu, G., Al-Jamal, M. y Béland, M. (2005) Biogas treatment using an anaerobic biosystem. *Proceedings of 3rd Canadian Organic Residuals and Biosolids Management Conference*. 502-513.

Soreanu G., Béland, M., Falletta, P., Edmonson, K. y Seto, P. (2008) Laboratory pilot scale study for H₂S removal from biogas in an anoxic biotrickling filter. *Water Sci. Technol.* 57(2), 201-207.

Subgerencia de Riesgos Profesionales y Ambiente. (2007) Norma Estándar Operacional NEO. Medidas de Seguridad en el Transporte, Almacenamiento, Manipulación y Uso de los Gases Comprimidos para Uso Industrial contenidos en Cilindros.

Syed, M., Soreanu, G., Falletta, P. y Béland, M. (2006) Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes. A review. *Canadian Biosystems Engineering*. 48(1), 2.1-2.14.

Universidad de Jaén. (2016) Plan de Prevención de Riesgos Laborales.

Universidad Politécnica de Valencia. (2012) Compresores: Causas principales de riesgo y medidas correctoras.

Unruh M. (2011). Parte 1: Análisis de biogás. *La tecnología de medición de gas para plantas de biogás*. 2(3), 1-3.

- Valencia, R. (2002). *Reducción del sulfuro de hidrógeno en el biogás, empleando como fuentes de microorganismos las aguas residuales de las fábricas de azúcar y de destilerías de alcohol*. (Tesis de pregrado). Universidad de La Habana, La Habana, Cuba.
- Valiente. A. (2010) *Absorción*. Facultad de Química. Universidad Autónoma de México. México D.F., México.
- Valerio, M. A. (2010) *Diseño y evaluación de un sistema para la purificación del metano producido mediante biodigestión en el ITCR*. (Tesis de pregrado). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Varnero, M., Carú, M., Galleguillos, K, y Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23(2), 31-40.
- Vázquez Valencia, L., Moreira Acosta, J., Iglesias Díaz, R. y Rojas Gálvez, L. (2015) Diseño, construcción y evaluación de un sistema de purificación y compresión de biogás. *LACANDONIA*. 9(2), 59-65.
- Viquez, J. (2010) Remoción del sulfuro de hidrógeno (H_2S (g))/ácido sulfhídrico (H_2S (aq)) en el biogás. *ECAG Informa*, 1(53), 16-20.
- Wellinger, W. y Lindberg, A. (2000) Biogás upgrading and utilization. IEA Bioenergy. Task 24: Energy from biological conversion of organic waste.
- Welty, R. J., Wicks, E. C. y Wilson, E. (1998) *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. México. Editoria Limusa.

ANEXOS.

ANEXO A. SOLUBILIDAD DE DIÓXIDO DE CARBONO EN AGUA A DIFERENTES PRESIONES Y TEMPERATURAS.

$t/^{\circ}\text{C}$	1000 \times mole fraction of CO_2 in liquid phase						
	Partial pressure of CO_2 in kPa						
	5	10	20	30	40	50	100
0	0.067	0.135	0.269	0.404	0.538	0.671	1.337
5	0.056	0.113	0.226	0.338	0.451	0.564	1.123
10	0.048	0.096	0.191	0.287	0.382	0.477	0.950
15	0.041	0.082	0.164	0.245	0.327	0.409	0.814
20	0.035	0.071	0.141	0.212	0.283	0.353	0.704
25	0.031	0.062	0.123	0.185	0.247	0.308	0.614
30	0.027	0.054	0.109	0.163	0.218	0.271	0.541
35	0.024	0.048	0.097	0.145	0.193	0.242	0.481
40	0.022	0.043	0.087	0.130	0.173	0.216	0.431
45	0.020	0.039	0.078	0.117	0.156	0.196	0.389
50	0.018	0.036	0.071	0.107	0.142	0.178	0.354
55	0.016	0.033	0.065	0.098	0.131	0.163	0.325
60	0.015	0.030	0.060	0.090	0.121	0.150	0.300
65	0.014	0.028	0.056	0.084	0.112	0.140	0.279
70	0.013	0.026	0.052	0.079	0.105	0.131	0.261
75	0.012	0.025	0.049	0.074	0.099	0.123	0.245
80	0.012	0.023	0.047	0.070	0.093	0.116	0.232
85	0.011	0.022	0.044	0.067	0.089	0.111	0.221
90	0.011	0.021	0.042	0.064	0.085	0.106	0.211
95	0.010	0.020	0.041	0.061	0.082	0.102	0.203
100	0.010	0.020	0.039	0.059	0.079	0.098	0.196

Fuente: Carrol *et al*, 1991.

ANEXO B. ALTURA DE LA UNIDAD DE TRANSFERENCIA HL.

Empaque	$\phi \times 10^4$	η	Intervalo de L/A
Anillos Raschig			
3/8''	3.21	0.46	2000-75000
1/2''	7.18	0.35	2000-75000
1''	23.5	0.22	2000-75000
1.5''	26.1	0.22	2000-75000
2''	29.3	0.22	2000-75000
Sillas Berl			
1/2''	14.55	0.28	2000-75000
1''	12.85	0.28	2000-75000
1.5''	13.65	0.28	2000-75000
Anillos en espiral			
Espiral sencilla de 3''	19.85	0.28	2000-75000
Espiral triple de 3''	23.35	0.28	2000-75000

Ecuación de Sherwood y Halliday

$$HL = \phi \left(\frac{L}{A} \right)^{\eta} Sc^{0.5}$$

$$\frac{L}{A} = \text{velocidad másica del líquido } \frac{kg}{h m^2}$$

$$\mu_L = \text{viscosidad del líquido } \frac{kg}{h m}$$

Sc = Número de Schmidt para el líquido

Fuente: Apéndice 8C (Valiente, 2010)

ANEXO C. CONSTANTES DE LENNARD-JONES.

Table K.1 The collision integrals, Ω_μ and Ω_D based on the Lennard–Jones potential[†]

$\kappa T/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (for mass diffusivity)	kT/ϵ	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (for mass diffusivity)
			1.75	1.234	1.128
0.30	2.785	2.662	1.80	1.221	1.116
0.35	2.628	2.476	1.85	1.209	1.105
0.40	2.492	2.318	1.90	1.197	1.094
0.45	2.368	2.184	1.95	1.186	1.084
0.50	2.257	2.066	2.00	1.175	1.075
0.55	2.156	1.966	2.10	1.156	1.057
0.60	2.065	1.877	2.20	1.138	1.041
0.65	1.982	1.798	2.30	1.122	1.026
0.70	1.908	1.729	2.40	1.107	1.012
0.75	1.841	1.667	2.50	1.093	0.9996
0.80	1.780	1.612	2.60	1.081	0.9878
0.85	1.725	1.562	2.70	1.069	0.9770
0.90	1.675	1.517	2.80	1.058	0.9672
0.95	1.629	1.476	2.90	1.048	0.9576
1.00	1.587	1.439	3.00	1.039	0.9490
1.05	1.549	1.406	3.10	1.030	0.9406
1.10	1.514	1.375	3.20	1.022	0.9328
1.15	1.482	1.346	3.30	1.014	0.9256
1.20	1.452	1.320	3.40	1.007	0.9186
1.25	1.424	1.296	3.50	0.9999	0.9120
1.30	1.399	1.273	3.60	0.9932	0.9058
1.35	1.375	1.253	3.70	0.9870	0.8998
1.40	1.353	1.233	3.80	0.9811	0.8942
1.45	1.333	1.215	3.90	0.9755	0.8888
1.50	1.314	1.198	4.00	0.9700	0.8836
1.55	1.296	1.182	4.10	0.9649	0.8788
1.60	1.279	1.167	4.20	0.9600	0.8740
1.65	1.264	1.153	4.30	0.9553	0.8694

Fuente: Apéndice K (Welty, 1998)

ANEXO D. CARACTERÍSTICAS DE LOS EMPAQUES ALEATORIOS.

Tamaño nominal en mm	6	9.5	13	16	19	25	32	38	50	76
Anillos	R	A	S	H	I	G				
	C	E	R	A	M	I	C	A		
Espesor de la pared en mm	0.8	1.6	2.4	2.4	2.4	3	4.8	4.8	6	9.5
Cf	1600	1000	580	380	255	155	125	95	65	37
C _D			909	749	457	301		181.8	135.6	
ε	0.73	0.68	0.63	0.68	0.73	0.73	0.74	0.71	0.74	0.78
a _p , m ³ /m ³	787	508	364	328	262	190	148	125	92	62
		M	E	T	A	L				
0.8 mm de pared										
Cf	700	390	300	170	155	115				
ε	0.69		0.84		0.88	0.92				
a _p , m ³ /m ³	774		470		274	206				
1.6 mm de pared										
Cf			410	290	220	137	110	83	57	32
C _D			688	431	485	304		173	133	
ε			0.73		0.78	0.85	0.87	0.9	0.92	0.95
a _p , m ³ /m ³			387		236	186	162	135	103	68
	AN	I	L	L	O	S		P	A	L
	P	L	A	S	T	I	C	O		
Cf				97		52		40	25	
C _D				207		102		62	47.5	
ε				0.87		0.9		0.91	0.92	
a _p , m ³ /m ³				341		206		128	102	
	M	E	T	A	L					
Cf				70		48		28	20	
C _D				133		95.5		57	36.5	
ε				0.93		0.94		0.95	0.96	
a _p , m ³ /m ³				341		206		128	102	

Fuente: Apéndice 8E (Valiente, 2010)

ANEXO E. CORRELACIÓN PARA PREDECIR LA CAÍDA DE PRESIÓN EN TORRES EMPACADAS.

$$\Delta P = \alpha * 10^{\beta \frac{L}{A}} \frac{\left(\frac{G}{A}\right)^2}{\rho_G}$$

ΔP = caída de presión en pulgadas de agua /pie de empaque

$$\frac{G}{A} = \text{masa velocidad del gas } \frac{lb}{s ft^2}$$

$$\rho_G = \text{densidad del gas } \frac{lb}{ft^3}$$

$$\frac{L}{A} = \text{masa velocidad del líquido } \frac{lb}{s ft^2}$$

α y β son constantes que aparecen debajo.

Empaque Tipo y Tamaño	Diámetro	α	β	L/A	Válido para lecho con porosidad
Anillos Raschig	3/8	4.7	0.41	0.2-1.2	57
	1/2	3.1	0.41	0.08-2.4	58.6
	5/8	2.35	0.26	0.3-1.8	67
	3/4	1.34	0.26	0.5-3	72
	1	0.97	0.25	0.1-7.5	69.2
	1.25	0.57	0.23	0.2-3	75.6
	1.5	0.39	0.23	0.2-4	75.9
Al azar	2	0.24	0.17	0.2-5.5	81.6
Ordenados	2	0.06	0.12	0.2-9	80
Anillos en espiral (al azar)	3	0.18	0.15	0.2-5	70.5
(ordenados)	3	0.15	0.15	0.2-6.5	63.2
Sillas Berl	1/2	1.2	0.21	0.08-6	63.2
	3/4	0.62	0.17	0.1-4	71
	1	0.39	0.17	0.2-8	70.9
	1.5	0.21	0.13	0.2-6	70
Silla Intalox	1/2	0.82	0.2	0.15-4	77
	3/4	0.48	0.16	0.1-4	75
	1	0.31	0.16	0.7-4	74
	1.5	0.14	0.14	0.2-8	78

Fuente: Apéndice 8B (Valiente, 2010)

ANEXO F. HOJAS DE SEGURIDAD DE COMPONENTES DE BIOGÁS.

ANEXO F.1 HOJA DE SEGURIDAD DE METANO.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA			
Nombre del producto : Metano Familia química : Hidrocarburos alifáticos Nombre químico : Metano Fórmula : CH ₄ Sinónimos: Hidruro de metilo, gas de los pantanos. Usos: El metano es usado principalmente como iniciador para síntesis de gran variedad de sustancias orgánicas. Algunas de las más importantes son cloroformo, tetracloruro de carbono, acetileno, alcoholes, aldehídos y ácidos orgánicos. También es usado para la producción de amoníaco y como gas combustible. Presentación: Como gas comprimido en cilindros. Fabricante : LINDE ECUADOR S.A. Quito, Av. De los Shyris 344 y Eloy Alfaro Edif. Parque Central Piso 8 Tlf.: (593-2) 3998900 Guayaquil, Km. 11 1/2 Vía Daule Tlf. : (593-4) 3703400 1800LINDEGAS 1800 546334 www.linde.com.ec			
2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES			
COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN
Metano	93.0-99.995%	74-82-8	TLV : Asfixiante simple
3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS			
Resumen de emergencia Gas comprimido extremadamente inflamable. El metano no es tóxico, es incoloro, inoloro y es más ligero que el aire por lo que puede alcanzar fuentes de ignición lejanas. El peligro primordial relacionado con escapes de este gas es combustión o explosión por formación de mezclas con el aire.			
Efectos potenciales para la salud Inhalación: La exposición a elevadas concentraciones puede causar asfixia por desplazamiento de oxígeno; se manifiestan síntomas como pérdida del conocimiento y de la movilidad; a bajas concentraciones puede causar narcosis, vértigos, dolor de la cabeza, náuseas y pérdida de coordinación.			
4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS			
Inhalación: Suministrar atención médica de forma inmediata. Trasladar la víctima a un área no contaminada para que inhale aire fresco; mantenerla caliente y en reposo. Si la víctima no respira, administrarle oxígeno suplementario o respiración artificial.			
5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO			
Punto de inflamación :	-187.8° C (-306° F)		
Temperatura de autoignición :	537° C (999° F)		
Limites de Inflamabilidad	Inferior (LEL): 5%		

(en aire por volumen, %):

Superior (UEL): 15%

Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica.

Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: Una descarga estática puede causar que este producto se encienda explosivamente, en caso de escape.

Riesgo general

Gas altamente inflamable que puede formar una gran variedad de mezclas explosivas fácilmente con el aire. En caso de incendio, puede producir gases tóxicos incluyendo monóxido de carbono y dióxido de carbono.

Medios de extinción

Rocío de agua, polvo químico seco y dióxido de carbono.

Instrucciones para combatir incendios

Si no hay riesgo, se debe detener la fuga cerrando la válvula. Los cilindros cercanos al fuego deben ser retirados y los que se encuentren expuestos al fuego deben ser enfriados rociándolos con agua desde un lugar seguro. Si el incendio se extingue antes de que la fuga sea sellada, el gas puede encenderse explosivamente sin aviso y causar daño extensivo, heridas o muerte. En este caso, aumentar la ventilación (en áreas cerradas) para prevenir la formación de mezclas inflamables o explosivas. Se deben eliminar todas las posibles fuentes de ignición.

Si un camión que transporta cilindros se ve involucrado en un incendio, aislar un área de 1600 metros (1 milla) a la redonda. Combatir el incendio desde una distancia segura utilizando soportes fijos para las mangueras.

El equipo requerido para la atención de la emergencia se encuentra reseñado en la sección 8.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL

En caso de un escape despejar el área afectada, evacuando hacia un lugar contrario a la dirección del viento que cubra por lo menos 800 metros (1/2 milla) a la redonda. Proteger a la gente y responder con personal entrenado. Si es posible, cerrar la válvula del cilindro para detener el escape. Si no se logra detener (o si no es posible llegar a la válvula), permitir que el gas se escape en su lugar o mover el cilindro a un sitio seguro, alejado de fuentes de ignición.

Se debe tener mucha precaución cuando se mueva un cilindro de metano con escape. Monitorear el nivel de oxígeno presente en el área con el fin de detectar posibles mezclas explosivas, teniendo en cuenta que el contenido de oxígeno debe estar por encima de 19.5% .

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes del uso: Mover los cilindros utilizando un carro porta cilindros o montacargas. No hacerlos rodar ni arrastrarlos en posición horizontal. Evitar que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro o con otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados como por ejemplo, el baúl de un automóvil, camioneta o van. Para descargarlos, usar un rodillo de caucho.

Durante su uso: No calentar el cilindro para acelerar la descarga del producto. Usar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión al conectar el cilindro a tuberías o sistemas de baja presión (<200 bar-3.000 psig). Jamás descargar el contenido del cilindro hacia las personas, equipos, fuentes de ignición, material incompatible o a la atmósfera.

Después del uso: Cerrar la válvula principal del cilindro. Marcar los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de

válvula o la tapa. No deben reutilizarse cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego o a un arco eléctrico. En estos casos, notificar al proveedor para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de cilindros

Almacenar los cilindros en posición vertical. Separar los cilindros vacíos de los llenos. Para esto, usar el sistema de inventario "primero en llegar, primero en salir" con el fin de prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo período de tiempo.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada para evitar el paso de personal no autorizado que pueda manipular de forma incorrecta el producto. Los cilindros deben ser almacenados en áreas secas, frescas y bien ventiladas, lejos de áreas congestionadas o salidas de emergencia. El área debe ser protegida con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permitir que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54° C (130° F) ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalizar el área con letreros que indiquen "PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO", "NO FUMAR" y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un sistema extintor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles, etc.). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Ventilación: Para la manipulación de este gas se debe proveer ventilación mecánica a prueba de explosión.

Equipos de detección: Utilizar sistemas de detección de gases diseñados de acuerdo con las necesidades. Rango recomendado del instrumento 0 – 100% LEL.

Protección respiratoria

Usar protección respiratoria como equipo de respiración auto-contenido (SCBA) o máscaras con mangueras de aire o de presión directa, si el nivel de oxígeno está por debajo del 19.5% o durante emergencias de un escape del gas. Los purificadores de aire no proveen suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que éstos estén libres de aceite y grasa; gafas de seguridad, botas con puntera de acero y ropa de algodón para prevenir la acumulación de cargas electrostáticas.

Equipo contra incendios

Los socorristas o personal de rescate deben contar, como mínimo, con un aparato de respiración auto-contenido y protección personal completa a prueba de fuego (equipo para línea de fuego).

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Densidad relativa del gas a 15° C (59° F), 1 atm:	0.5549
Punto de ebullición a 1 atm:	-161.49° C (-258.64° F)
Punto de fusión a 1 atm:	-182.48° C (-296.42° F)
Peso molecular:	16.043
Densidad a 15°C y 1 atm:	0,671 kg/m ³

Volumen específico del gas 15.6° C (60° F) 1 atm:	1.474 m ³ /kg (23.6113 ft ³ /lb)
Temperatura de combustión (en aire)	1957° C (3554.6° F)
Temperatura de combustión (en oxígeno)	2810° C (5090° F)
Presión de vapor:	No aplica
Apariencia y color:	Gas incoloro e inoloro.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad

El metano es un gas estable.

Incompatibilidad

El metano puede reaccionar explosivamente en presencia de halógenos, óxidos de nitrógeno y acetileno.

Condiciones a evitar

Mantener los cilindros lejos de fuentes de ignición y de las descargas electrostáticas. Cilindros expuestos a temperaturas altas o llamas directas pueden romperse o estallar violentamente.

Reactividad

- a) Productos de descomposición : Ninguno
- b) Polimerización peligrosa : No ocurrirá.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

El metano es un asfixiante simple. Los efectos en humanos son los siguientes :

Concentración

Síntomas de exposición

12-16% Oxígeno:	Aumenta el ritmo de la respiración y el pulso. Disturbios leves en la coordinación muscular
10-14% Oxígeno:	Trastorno emocional, fatiga, respiración interrumpida.
6-10% Oxígeno:	Nausea y vómito, colapso y pérdida de la conciencia.
Por debajo del 6%:	Movimientos convulsivos, posible colapso respiratorio y muerte

Capacidad irritante del material: Producto no irritante

Sensibilidad a materiales: El producto no causa sensibilidad en humanos.

Efectos al sistema reproductivo

Habilidad mutable: No Aplicable

Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para el metano.

Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para el metano.

Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para el metano.

Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para el metano.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

El metano no contiene ningún químico Clase I o Clase II que reduzca el ozono. No se anticipa ningún efecto en la vida de las plantas. El metano es un combustible muy limpio comparado con los combustibles tradicionales, lo que facilita el cumplimiento de las exigentes normas ambientales. El metano en la atmósfera es una de las causas del efecto invernadero.

El metano no es considerado un contaminante marino por el D.O.T.

13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Regresar los cilindros vacíos al fabricante para que éste se encargue de su disposición final, de acuerdo con lo establecido por la normatividad ambiental.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Número de Naciones Unidas : UN 1971
Clase de peligro D.O.T : 2.1
Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS INFLAMABLE



El metano se transporta en cilindros color ocre (Pintulux 61 Ref: CO-176), según lineamientos establecidos al interior de la compañía.

Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y debe ser descartado.

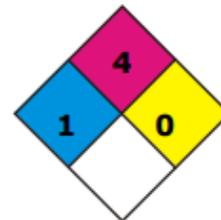
15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

El transporte y manejo de este producto está sujeto a las disposiciones y requerimientos establecidos en el NTE INEN 2266 2.010 Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos.

16. INFORMACIÓN ADICIONAL

En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos :

Código NFPA
Salud : 1 "Ligeramente riesgoso"
Inflamabilidad : 4 "Extremadamente inflamable"
Reactividad : 0 "Estable"
Tipo de Conexión: CGA 350.



Recomendaciones de material

El metano no es corrosivo y se pueden usar todos los metales comúnmente usados para gases.

Fuente: LINDE ECUADOR S.A.

Disponible en:

http://www.linde-gas.ec/internet.lg.lg.ecu/es/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20METANO343_98262.pdf?v=1.0

ANEXO F.2 HOJA DE SEGURIDAD DE DIÓXIDO DE CARBONO.

Nota : Las especificaciones contenidas en esta hoja de seguridad aplican también para el dióxido de carbono anaeróbico y el dióxido de carbono seco.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del producto : Dióxido de carbono

Familia química : Ácido anhídrido

Nombre químico : Dióxido de carbono

Fórmula : CO₂

Sinónimos : Anhídrido carbónico, gas ácido carbónico, carbono anhídrido, bióxido de carbono.

Usos : Como inertizante en la conserva de alimentos; industria de la bebida, como carbonatante; soldadura por proceso MIG como gas protector; extintores de incendio; materia prima para procesos químicos; propelente en aerosoles, como presurizante.

Fabricante :

AGA S.A.

Quito: Av. Pedro Vicente Maldonado 10499

Tel.: 1 800 242 427; 02 2673 011; 04 2101 060 las 24 horas los 365 días del año.

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN
Dióxido de carbono	99.8-99.996%	124-38-9	TLV : 5000 ppm (ACGIH)

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

Resumen de emergencia

Gas ligeramente tóxico, inoloro e inoloro con sabor suavemente ácido. El peligro primordial a la salud asociado con escapes de este gas es asfixia por desplazamiento del oxígeno. Este gas no se quema y no alimenta la llama. El gas carbónico es 1.5 veces más pesado que el aire. Es un gas condensable. Debido a su baja presión de vapor a temperatura ambiente, este es acondicionado en los cilindros de forma líquida en equilibrio con una fase gaseosa.

Efectos potenciales para la salud

Inhalación : Asfixiante y un poderoso vasodilatador cerebral. Si la concentración de dióxido de carbono alcanza el 10% o mas, causa sofocación en minutos. A concentraciones más bajas dióxido de carbono puede causar náusea, mareo, sudor, dolor de cabeza, confusión mental, aumento de la presión sanguínea, respiración agitada, palpitaciones al corazón, respiración dificultosa, disturbios visuales y temblores. Las concentraciones altas resultan en narcosis y muerte.

Carcinogenicidad : El dióxido de carbono no está listado por la NTP, OSHA, o IARC

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Remueva la víctima al aire fresco, lo más pronto posible. Solo personal

profesionalmente entrenado debe suministrar ayuda médica como la resucitación cardiopulmonar y/o oxígeno suplemental, si es necesario.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO

Punto de inflamación : No aplica.

Temperatura de auto ignición : No aplica.

Limites de Inflamabilidad :

Inferior (LEL): No aplica. **Superior (UEL):** No aplica.

Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica.

Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: No aplica.

Riesgo general

Gas no inflamable. Cuando los cilindros se exponen a intenso calor o llamas, se pueden romper violentamente.

Medios de extinción

Dióxido de Carbono es comúnmente usado como un agente extinguidor de fuegos clase B y clase C.

Instrucciones para combatir incendios

Evacuar al personal de la zona de peligro. Si es posible y no hay riesgo, remover los cilindros de dióxido de carbono del incendio o enfriarlos con agua. No rociar agua directamente en el orificio del cilindro. Aparatos autónomos de respiración pueden ser requeridos para el personal de rescate.

Si un camión que transporta cilindros está involucrado en un incendio, AISLE un área de 800 metros (1/2 milla) a la redonda.

Equipo contra incendios

Los socorristas o personal de rescate deben contar como mínimo con un aparato de respiración autosuficiente y protección personal completa, a prueba de fuego.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE ACCIDENTAL

En caso de escape evacuar a todo el personal de la zona afectada (hacia un lugar contrario a la dirección del viento). Aísle un área de 25 a 50 metros a la redonda. Localizar y sellar la fuente de escape del gas. Dejar que el gas se disipe. Monitorear el área para determinar los niveles de oxígeno. La atmósfera debe tener un mínimo de 19.5% de oxígeno antes de permitir el acceso de personal y si esta por debajo del limite de exposición ingresar al área con aparatos de respiración autosuficiente. Eliminar posibles fuentes de ignición. Ventilar el área o mover el cilindro con fuga a un área ventilada. Escapes sin control deben ser respondidos por personal profesionalmente entrenado usando un procedimiento establecido previamente.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes de uso: Mueva los cilindros utilizando carro portacilindros o montacargas. No los haga rodar, ni los arrastre en posición horizontal. Evite que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro, o contra otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados, como por ejemplo el baúl de un carro, camioneta o van. Para descargarlos del camión use rodillo de caucho.

Durante su uso: No use adaptadores, herramientas que generen chispas, ni caliente el cilindro para aumentar el grado de descarga del producto. Use válvula de contención o de retroceso de llama para prevenir contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión, al

conectar el cilindro a tuberías o sistemas de presión baja (<200 bar - 3000 psig). Jamás descargue el contenido del cilindro hacia ninguna persona, equipo, fuente de ignición, material incompatible, o a la atmósfera. No use aceites o grasas en los ajustadores o en el equipo de manejo de gas. Inspeccione el sistema para escapes usando agua y jabón. No intente encajar objetos como alicates, destornilladores, palancas, etc, en la válvula, ya que puede dañarla, causando un escape. Si el usuario experimenta alguna dificultad en el funcionamiento de la válvula del cilindro discontinuar el uso y llamar al fabricante. No ponga el cilindro como parte de un circuito eléctrico.

Después de uso: Cierre la válvula principal del cilindro. Cierre firmemente las válvulas. Marque los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula. No deben ser reutilizados cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego. En estos casos notifique al proveedor, para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de los cilindros

Almacene los cilindros en posición vertical . Separe los cilindros vacíos de los llenos. Para esto use el sistema de inventario que "el primero en llegar, primero en salir", para prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo periodo. Use solo envases y equipo (tubería, válvulas, conectores, etc.) diseñado para almacenar dióxido de carbono. Los cilindros pueden ser almacenados al descubierto, pero en tal caso, deben ser protegidos contra la intemperie y humedad para prevenir moho.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada, con el fin de evitar el paso de personal no autorizado, que puedan manipular de forma incorrecta el producto. Almacene lejos de áreas con mucho tráfico; de salidas de emergencia; áreas de procesamiento y producción; alejado de sensores, salidas de edificio, cuartos, y de pasillos principales que lleven a salidas. El área debe ser protegida, con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos, como corte o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permita que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54 °C (130 °F), ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalice el área con letreros que indiquen "PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO" , "NO FUMAR". y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un extinguidor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Proporcionar ventilación natural o mecánica, para asegurarse de prevenir atmósferas deficientes en oxígeno abajo del 19.5%. Los niveles de dióxido de carbono deben ser monitoreados para asegurarse que el nivel se mantenga por debajo del TLV.

Protección respiratoria

Usar equipo autónomo de respiración (SCBA) o máscaras con mangueras de aire, de presión directa si el nivel de oxígeno está por debajo del 19.5%. Los purificadores de aire no proveen

suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes industriales, verificando que estos estén libres de aceite y grasa; gafas ajustables de seguridad y botas con puntera de acero.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Densidad de gas a 21.1°C (70°F), 1 atm: 1.833 kg/m³ (0.1144 lbs/ pies³)

Punto de congelación / fusión a 1 atm: (Temperatura de sublimación) -78.5°C (-109.3°F)

pH: 3.7 a 1atm (forma ácido carbónico)

Peso específico (aire = 1) a 21.1°C (70°F): 1.522

Peso molecular: 44.01

Solubilidad en agua vol/vol a 20°C (68°F) y 1 atm: 0.90

Grado de expansión: No aplica.

Olor umbral: No aplica.

Volumen específico del gas (ft³/lb) : 8.76

Presión de vapor a 21.1°C (70°F): 838 psig (5778 kPa)

Coefficiente de distribución agua / aceite: No aplica.

Apariencia y color: Dióxido de Carbono es un gas incoloro que no tiene olor. Como este gas es ligeramente ácido, algunos individuos pueden notar un leve olor y sabor punzante.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad

El dióxido de carbono es un gas estable.

Incompatibilidad

Dióxido de carbono arde y explota cuando se calienta con aluminio en polvo, berilio, mezclas de cerio, cromo, mezclas de magnesio-aluminio, manganeso, torio, titanio y zirconio. En la presencia de humedad, dióxido de carbono se enciende con cesio óxido. Acetiluros metálicos también arden y explotan en contacto con dióxido de carbono. Dióxido de carbono reacciona con materiales alcalinos para formar carbonatos y bicarbonatos.

Condiciones a evitar

Evite exponer cilindros a temperaturas altas o llamas directas porque pueden romperse o estallar.

Reactividad

a) Productos de descomposición : El dióxido de carbono producirá monóxido de carbono y oxígeno cuando se expone a temperaturas más altas de 1648°C (3000°F).

b) Polimerización peligrosa : Ninguna

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Datos de toxicidad:

El dióxido de carbono es un gas asfixiante, el cual tiene efectos fisiológicos en humanos a concentraciones altas. También puede causar narcosis. Los siguientes datos toxicológicos están disponibles para dióxido de carbono.

LCLo (inhalación, humano) = 9 pph/5 minutos

LCLo (inhalación, mamífero) = 90000 ppm/5 minutos

TCLo (inhalación, rata) = 6 pph/24 horas; efectos reproductivos y teratogenicos.

En humanos se presentan los siguientes síntomas :

Concentración

Síntomas de exposición

1% Dióxido de carbono:

Aumenta ligeramente la respiración.

2% Dióxido de carbono:

El ritmo respiratorio aumenta el 50%. Exposición por largo

	tiempo puede causar dolor de cabeza, cansancio.
3% Dióxido de carbono:	La respiración se aumenta dos veces más del ritmo normal y se vuelve trabajosa. Leves efectos narcóticos. Deteriora el oído, dolor de cabeza, aumenta la presión sanguínea y el ritmo del pulso.
4 - 5% Dióxido de carbono:	La respiración se aumenta cuatro veces más del ritmo normal, se presentan evidentes síntomas de intoxicación y se puede sentir una ligera sensación de ahogo.
5-10% Dióxido de carbono:	Notable y fuerte olor característico, respiración muy trabajosa, dolor de cabeza, disturbio visual y zumbido en los oídos. Afecta el sentido común, seguido en pocos minutos con la pérdida del conocimiento.
50-100% Dióxido de carbono:	Arriba del nivel de 10%, pérdida del conocimiento ocurre rápidamente. Exposición a altas concentraciones por largo tiempo, resultará en muerte por asfixia.
Capacidad irritante del material: Producto no irritante	
Sensitización a materiales: El producto no causa sensitización en humanos	
Efectos al sistema reproductivo	
Habilidad mutable: No aplicable	
Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para dióxido de carbono.	
Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para dióxido de carbono.	
Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para dióxido de carbono en Estudios clínicos en animales pruebas expuestos a concentraciones altas de dióxido de carbono indican efectos teratogénico.	
Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para dióxido de carbono en humanos. Estudios clínicos en animales pruebas expuesto a altas concentraciones de dióxido de carbono indican efectos reproductivos.	
12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA	
El dióxido de carbono (CO ₂) es un gas incoloro de olor penetrante y sabor ácido. Es un componente minoritario de la atmósfera (aproximadamente 3 partes por 10.000). Proviene de la combustión de hidrocarburos, de la fermentación y de la respiración animal.	
El dióxido de carbono no puede considerarse como contaminante en sentido estricto, ya que no es tóxico, y se halla en atmósferas puras de modo natural y es imprescindible para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que posibilita la existencia de la fotosíntesis de las plantas y el clima actual. No obstante, se incluye dentro de las sustancias contaminantes ya que, impide que una parte de la energía radiante que recibe la Tierra vuelva al espacio, produciendo el llamado efecto invernadero. En la actualidad su concentración ha llegado a 359 ppmv (partes por millón volumen), producto de quema de combustibles fósiles, cambios en uso de suelos (principalmente deforestación), quema de biomasa, manufactura de cemento. El aumento de dióxido de carbono en la atmósfera es el responsable del calentamiento global en la baja atmósfera. Este calentamiento produce aridez en la tierra afectando a las actividades agropecuarias y según los investigadores en un futuro no muy lejano se fundirán las enormes masas de hielo de los polos, provocando una elevación de los niveles del mar, peligrando seriamente la posibilidad de vida en las costas.	
13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN	
Regrese los cilindros vacíos al fabricante, para que este se encargue de su disposición final de	

acuerdo a lo establecido por la normatividad ambiental.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Número de Naciones Unidas : UN 1013

Clase de peligro D.O.T : 2.2

Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS NO INFLAMABLE NO TOXICO

Contaminante marino : El producto no está identificado como un contaminante marino por el D.O.T



Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura, en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros de gas comprimido en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y deben ser descartados.

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos se deben tener en cuenta los requerimientos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2-266:2000.

La identificación de cilindros que contienen gases industriales, se encuentra reseñada en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN 0441:84.

16. INFORMACIÓN ADICIONAL

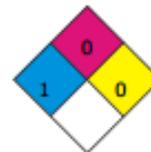
En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos :

Código NFPA

Salud : 1 "Ligeramente peligroso"

Inflamabilidad : 0 "No arde"

Reactividad : 0 "Estable"



Salida de válvula : CGA 320

Recomendaciones de material : Se puede usar la mayoría de los materiales más comunes.

Fuente: AGA. S.A.

Disponible en:

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10915/20/Ficha%20de%20seguridad%20CO2.pdf>

ANEXO F.3 HOJA DE SEGURIDAD DE SULFURO DE HIDRÓGENO.

1. PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del producto: Sulfuro de hidrógeno.

Familia química: Ácidos inorgánicos

Nombre químico: Sulfuro de hidrógeno

Fórmula: H₂S

Sinónimos: Monosulfuro de dihidrógeno, sulfuro de dihidrógeno, sulfuro de hidrógeno, dihidruo de azufre, ácido sulfídrico.

Usos: El sulfuro de hidrógeno es usado comercialmente para la purificación de los ácidos clorhídrico y sulfúrico. Se usa en la fabricación de otros productos químicos como sulfuros inorgánicos (sulfuro y bisulfuro de sodio principalmente), utilizados en la industria de colorantes, hules, pesticidas, aditivos para plásticos, peletería y fármacos. También en síntesis orgánica tiene aplicación pues se utiliza en la obtención de mercaptanos. En metalurgia se utiliza para separar cobre y níquel y en la industria nuclear se utiliza en la generación de agua pesada.

Fabricante :

LINDE ECUADOR S.A.

Quito, Av. De los Shyris 344 y Eloy Alfaro Edif. Parque Central Piso 8 Tif.: (593-2)

3998900

Guayaquil, Km. 11 1/2 Vía Daule Tif. : (593-4) 3703400

1800LINDEGAS 1800 546334

www.linde.com.ec

2. COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

COMPONENTE	% MOLAR	NUMERO CAS	LIMITES DE EXPOSICIÓN
Sulfuro de hidrógeno	99.0-99.95%	7783-06-4	ACGIH :TLV-TWA = 10 ppm ACGIH :TLV-STEL = 15 ppm OSHA : PEL-TWA = 10 ppm(final) OSHA :PEL-STEL = 15 ppm(final) OSHA :PEL-Peak = 50 ppm(trans) OSHA :PEL-Ceiling = 20 ppm(trans)

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

Resumen de emergencia

El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, inflamable, con olor a huevo podrido, de sabor dulce y perceptible en concentraciones de 0.002 mg/l. Sin embargo, en concentraciones mayores de 500 ppm afecta la capacidad de percepción del nervio olfativo y con ello impide su detección a través de este sentido, haciéndolo más peligroso. Es muy tóxico, por lo que una exposición prolongada a este gas puede generar efectos adversos para la salud. Es considerado tan tóxico como el HCN; sin embargo, su olor tan desagradable permite que sea percibido a muy bajas concentraciones.

Efectos potenciales para la salud

Inhalación: Los primeros síntomas de intoxicación, de manera general, son: náusea, vómito, diarrea, irritación de la piel, lagrimeo, falta de olfato, fotofobia y visión nublada. Los síntomas de una intoxicación aguda son: taquicardia (aumento de la velocidad cardíaca) o bradicardia (disminución de la velocidad cardíaca), hipotensión (presión sanguínea baja), cianosis, palpitaciones, arritmia cardíaca. Además, puede presentarse respiración corta y rápida, edema bronquial o pulmonar, depresión pulmonar y parálisis respiratoria. Los efectos neurológicos en estos casos son irritabilidad, vértigo, cansancio, confusión, delirio, amnesia, dolor de cabeza y sudoración. Se presentan también calambres musculares, temblores, salivación excesiva, tos, convulsiones y coma.

Contacto con los ojos: Se produce irritación de la conjuntiva, provocando fotofobia, queratoconjuntivitis y vesiculación del epitelio de la córnea, aún a concentraciones de 20 ppm o más bajas por algunas horas. Si la exposición es repetida se presentan, además de los síntomas mencionados, lagrimeo, dolor y visión nublada. Un envenenamiento crónico provoca hinchazón de la conjuntiva y los párpados. La recuperación de estos problemas generalmente es completa, siempre que no se presenten otras infecciones secundarias.

Efectos crónicos: Las exposiciones severas que no resultan en muerte pueden causar síntomas a largo plazo tales como pérdida de la memoria, parálisis de músculos faciales o daño del tejido fino del nervio. La sobre exposición crónica puede causar daño permanente en los ojos.

Carcinogenicidad : El sulfuro de hidrógeno está listado por la NTP, OSHA e IARC.

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Trasladar la víctima a un lugar bien ventilado y evaluar los signos vitales. Si no hay pulso, proporcionar rehabilitación cardio-pulmonar; si no respira, dar respiración artificial. Si la víctima está consciente, sentarla y mantenerla en reposo ya que puede presentar congestión pulmonar o convulsiones.

Contacto con los ojos : Lavarlos con agua tibia asegurándose de abrir bien los párpados por lo menos durante 15 minutos.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO

Punto de inflamación :	No aplica.
Temperatura de auto ignición :	260° C (500° F)
Limites de Inflamabilidad	Inferior (LEL): 4.0%
(en aire por volumen, %):	Superior (UEL): 44%

Sensibilidad de explosión a un impacto mecánico: No aplica.

Sensibilidad de explosión a una descarga eléctrica: Una descarga estática puede causar que este producto se encienda explosivamente.

Riesgo general

Gas inflamable. Puede formar mezclas explosivas con el aire. Cuando los cilindros se exponen a intenso calor o llamas, pueden explotar violentamente. Este compuesto es más pesado que el aire, puede viajar distancias considerables hasta una fuente de ignición y regresar en llamas. Arde en el aire con una llama azul pálida.

Medios de extinción

Rocío de agua, polvo químico seco y dióxido de carbono.

Instrucciones para combatir incendios

Evacuar a todo el personal de la zona peligrosa. Si es posible, detener la fuga cerrando la válvula para no alimentar el fuego. Los cilindros expuestos al fuego deben ser enfriados, rociándolos con agua desde un lugar seguro y retirarlos del área posteriormente. Incrementar la ventilación para prevenir la formación de mezclas explosivas.

Si un camión que transporta cilindros se ve involucrado en un incendio, aislar un área de 1600 metros (1 milla) a la redonda. Combatir el incendio desde una distancia máxima utilizando soportes fijos para las mangueras.

El equipo de protección personal requerido para la atención de la emergencia se encuentra reseñado en la sección 8.

6. MEDIDAS CONTRA ESCAPE/DERRAME ACCIDENTAL

Evacuar a todo el personal innecesario de la zona afectada (hacia un lugar contrario a la dirección del viento). Si es posible, cerrar la válvula del suministro de sulfuro de hidrógeno. Si la fuga está en el cilindro, válvula o disco de ruptura, ponerse en contacto con LINDE ECUADOR S.A. Prevenir la entrada de producto en las alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o cualquier otro lugar donde la acumulación pudiera ser peligrosa. Usar agua en forma de rocío para controlar los vapores. Remover toda fuente de calor, ignición y si es posible, separar todo material combustible del área del escape. Ventilar el área encerrada o mover el cilindro a un área ventilada.

7. MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Precauciones que deben tomarse durante el manejo de cilindros

Antes del uso: Mover los cilindros utilizando un carro porta cilindros o montacargas. No hacerlos rodar ni arrastrarlos en posición horizontal. Evitar que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro o con otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados como, por ejemplo, el baúl de un automóvil, camioneta o van. Para descargarlos, usar un rodillo de caucho.

Durante su uso: No calentar el cilindro para acelerar la descarga del producto. Usar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión al conectar el cilindro a tuberías o sistemas de baja presión (<200 bar -3.000 psig). Jamás descargar el contenido del cilindro hacia las personas, equipos, fuentes de ignición, material incompatible o a la atmósfera.

Después del uso: Cerrar la válvula principal del cilindro. Marcar los cilindros vacíos con una etiqueta que diga "VACIO". Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula o la tapa. No deben reutilizarse cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego o a un arco eléctrico. En estos casos, notificar al proveedor para recibir instrucciones.

Precauciones que deben tomarse para el almacenamiento de cilindros

Almacenar los cilindros en posición vertical. Separar los cilindros vacíos de los llenos. Para esto, usar el sistema de inventario "primero en llegar, primero en salir" con el fin de prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo período de tiempo.

El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada para evitar el paso de personal no autorizado que pueda manipular de forma incorrecta el producto. Los cilindros deben ser almacenados en áreas secas, frescas y bien ventiladas, lejos de áreas congestionadas o salidas de emergencia. El área debe ser protegida con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permitir que la temperatura en el área de

almacenamiento exceda los 54° C (130° F) ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalizar el área con letreros que indiquen "PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO", "NO FUMAR" y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un extinguidor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles, etc.). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería

Ventilación: Se recomienda usar exhaustiva ventilación local para prevenir la acumulación de sulfuro de hidrógeno en el lugar de trabajo. Es apropiado instalar un equipo de monitoreo automático para detectar los niveles de sulfuro de hidrógeno y oxígeno; éste se debe instalar en el área en donde se utiliza o se almacena el sulfuro de hidrógeno.

Equipos de detección : Utilizar sistemas de detección de gases diseñados de acuerdo con las necesidades. Para mayor seguridad se sugiere seleccionar una escala que contemple valores superiores al TLV. Solicitar asesoría técnica al respecto en LINDE ECUADOR S.A.

Protección respiratoria

Usar protección respiratoria como equipo auto contenido (SCBA) o máscaras con mangueras de aire o de presión directa cuando se presenten escapes de este gas o durante las emergencias. Los purificadores de aire no proveen suficiente protección.

Vestuario protector

Para el manejo de cilindros es recomendable usar guantes de neopreno, polietileno o PVC, verificando que estos estén libres de aceite y grasa; gafas de seguridad y botas con puntera de acero.

Otros: Regadera de seguridad y fuente lava ojos.

Equipo contra incendio

Los socorristas y personal de grupos de respuesta a emergencias deberán, como mínimo, con equipo de protección personal completo a prueba de fuego (equipo full línea de fuego).

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Peso molecular:	34.08
Densidad del gas a 15° C (59° F) y 1 atm:	1.44 Kg/m ³ (0.090 lb/ft ³)
Gravedad específica a 15° C (59° F) y 1 atm:	1.189
Temperatura de ebullición :	-60.3° C (-76.6° F)
Temperatura de fusión:	-82.9° C (-117.2° F)
pH:	No aplica
Solubilidad en agua (V/V) a 26.67° C (80° F) y 1 atm:	32%
Presión de vapor a 15.5° C (60° F):	1579 Kpa (229 psia)
Apariencia y color:	El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, de olor penetrante similar al del huevo podrido.

10. REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad

El sulfuro de hidrógeno es un gas estable.

Incompatibilidad

Agentes oxidantes, peróxidos orgánicos, materiales alcalinos, metales como plomo y cobre, óxidos de metales. El sulfuro de hidrógeno es corrosivo para la mayoría de los metales porque reacciona con estas sustancias para formar sulfuros metálicos.

Condiciones a evitar

Evitar que el gas entre en contacto con materiales incompatibles. Evitar la exposición al calor, chispas u otras fuentes de ignición. Evitar exponer los cilindros a temperaturas altas o llamas directas porque pueden romperse o estallar.

Reactividad

- a) Productos de descomposición: Agua y dióxido de azufre.
- b) Polimerización peligrosa: No ocurrirá.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Datos de toxicidad

LCLo (inhalación en humanos): 600 ppm/ 30 min y 800 ppm/ 5 h
LDLo (inhalación en humanos): 5.7 mg/ Kg; efectos en el sistema nervioso central.
LCLo (inhalación en humanos) = 800 ppm/5 minutos
LC50 (inhalación en ratas): 444 ppm
TCLo (inhalación en ratas) = 20 ppm (hembra, 6-22 días después), efectos reproductivos.
LC50 (inhalación en ratones) = 634 ppm/1 hora
LCLo (inhalación en mamíferos) = 800 ppm/5 minutos

Capacidad irritante del material: El sulfuro de hidrógeno es severamente irritante para los ojos y puede ser moderadamente irritante para la piel.

Sensibilidad a materiales: No se conoce que este producto cause sensibilidad en humanos.

Efectos al sistema reproductivo

Mutagenicidad: Ningún efecto mutagénico ha sido descrito para el sulfuro de hidrógeno.

Embriotoxicidad: Ningún efecto embriotóxico ha sido descrito para el sulfuro de hidrógeno en humanos.

Teratogenicidad: Ningún efecto teratogénico ha sido descrito para el sulfuro de hidrógeno.

Toxicidad Reproductiva: Ningún efecto de toxicidad reproductiva ha sido descrito para el sulfuro de hidrógeno en humanos.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Algunos efectos en animales son los relacionados con ambientes deficientes de oxígeno, daños en el sistema respiratorio y efectos en el sistema nervioso central. El sulfuro de hidrógeno es soluble en agua y es tóxico para la vida terrestre. Puede causar cambios en el pH de los sistemas acuáticos. Pone en peligro el agua potable.

El sulfuro de hidrógeno no está listado por el DOT como contaminante marino.

13. CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Regresar los cilindros vacíos al fabricante para que éste se encargue de su disposición final, de acuerdo con lo establecido por la normatividad ambiental.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

El sulfuro de hidrógeno se transporta en cilindros color ocre (Pintulux 61 Ref: CO-176), según lineamientos establecidos al interior de la compañía.

Número de Naciones Unidas : UN 1053
Clase de peligro D.O.T : 2.3
Rotulo y etiqueta D.O.T : GAS TÓXICO
Riego secundario D.O.T : 2.1 "GAS INFLAMABLE"



Información especial de embarque: Los cilindros se deben transportar en una posición segura en un vehículo bien ventilado. El transporte de cilindros en automóviles o en vehículos cerrados presenta serios riesgos de seguridad y debe ser descartado.

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

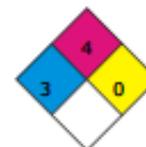
El transporte y manejo de este producto está sujeto a las disposiciones y requerimientos establecidos en el NTE INEN 2266 2.010 Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos.

16. INFORMACIÓN ADICIONAL

En las zonas de almacenamiento de cilindros se debe contar con la siguiente información de riesgos:

Código NFPA

Salud : 3 "Extremadamente peligroso para la salud"
Inflamabilidad : 4 "Extremadamente inflamable"
Reactividad : 0 "Estable"
Salida de válvula : CGA 330



Recomendación de materiales: Acero inoxidable y aluminio.

FUENTE: LINDE ECUADOR S.A.

Disponible en:

<http://www.linde-gas.ec/internet.lg.lg.ecu/es/images/HOJA%20DE%20SEGURIDAD%20SULFURO%20DE%20HIDROGENO343>

ANEXO G. MEDIDAS DE SEGURIDAD PARA LA MANIPULACION DE GASES INFLAMABLES.

- DUCHAS DE SEGURIDAD Y FUENTES LAVAOJOS

El objetivo de estos elementos de seguridad es el reducir las posibles consecuencias derivadas de un accidente relacionado con un incendio o derrames o salpicaduras de productos corrosivos.

La eficacia de estos sistemas de seguridad radica en la rapidez con que se alcancen, del estado de conservación de los mismos y del tiempo de actuación. Por ello deben reunir las siguientes características:



Estar situados de forma que sean fácilmente visibles y accesibles
Estar alejados de enchufes y aparatos eléctricos
Deben ponerse en marcha por medio de mecanismos de rápida y fácil apertura así como fácilmente identificables y atrapables.
La ducha debe proporcionar un caudal suficiente capaz de empapar completamente y de forma rápida al usuario.
La ducha debe ser lo suficientemente amplia para acomodar a dos personas. • Las fuentes lavaojos dispondrán de dos rociadores o boquillas con la separación suficiente para lavar ojos o cara.
Las fuentes lavaojos deben proporcionar un chorro de baja presión para no provocar daño o dolor innecesario.
Deben probarse haciendo correr agua, por lo menos una vez cada seis meses, para comprobar que estén en buenas condiciones de empleo.

- MANTAS IGNIFUGAS

Se utilizan para actuación en caso de incendio pues permiten una acción eficaz en el caso de fuegos pequeños y sobre todo cuando prenden las llamas en las ropas, como alternativa a las duchas de seguridad. La utilización de la manta puede en ciertos casos evitar el desplazamiento del sujeto en llamas, lo que ayuda a limitar el efecto y desarrollo de éstas. En todos los laboratorios donde se manipulen productos inflamables es muy recomendable su presencia. Su lugar de ubicación debe de estar correctamente elegido y señalizado con el fin de garantizar su rápida utilización.



- EXTINTORES

Los pequeños incendios que ocurren en los laboratorios suelen ser controlables tapándolos con telas ignífugas o trapos mojados. Si ello no es factible por la ubicación, características o tamaño del incendio, suelen ser atacables con un extintor de mano. Por tanto, los laboratorios deben de disponer de extintores correctamente situados en lugares visibles y de fácil acceso, así como correctamente señalizados.

El tipo de extintor adecuado depende de la sustancia en combustión, aunque los más prácticos y universales son los de CO₂, ya que en los laboratorios suele haber instrumental eléctrico; para este tipo de incendios otros agentes extintores serían inadecuados, ya que pueden producir contactos eléctricos y agresiones a los propios equipos que luego ofrecerán una gran dificultad de limpieza.

A continuación, se presenta una tabla resumen de los tipos de incendios y la eficiencia de los algunos tipos de extintores que existen:

	MATERIALES	AGENTES EXTINTORES						
		CHORRO AGUA	AGUA PULVER.	ESPUMA FISICA	POLVO SECO	POLVO POLIV.	NIEVE CARBO. CO2	HALONES
A	SOLIDOS CON BRASA Madera. Papel. Tela. Goma. Corcho. Caucho.	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
B	LIQUIDOS INFLAMABLES Y SOLIDOS LICUABLES Petróleo. Aceites. Pinturas. Disolventes. Cera	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
C	GASES INFLAMABLES Butano. Metano. Disolventes. Cera	NO	Extingue Limita propagación		SI	SI	SI	SI
		SI						
D	METALES Y PRODUCTOS QUÍMICOS REACTIVOS Magnesio. Titanio. Sodio. Potasio. Uranio	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
E	FUEGOS ELÉCTRICOS Todos en presencia de corriente eléctrica	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO

SI BUENO **SI** ACEPTABLE **NO** INACEPTABLE O PELIGROSO **NO** REQUIERE AGENTES ESPECIALES

- BOTIQUIN

El Botiquín a mantener en cada laboratorio debe responder a las necesidades del propio centro de trabajo. Es evidente que un laboratorio aislado precisará de un botiquín más ampliamente dotado que otro incluido en un centro de trabajo mayor y, presumiblemente, mejor abastecido. Suele ocurrir que los botiquines se llenan de preparados que con el tiempo van perdiendo su eficacia a causa de la falta de atención y seguimiento del mismo. Por ello, es aconsejable la presencia de una persona responsable del cuidado de los elementos de protección y muy particularmente, del botiquín.



EQUIPOS DE PROTECCION PERSONAL.

- PROTECCION DE MANOS

Cualquier manipulación de sustancias corrosivas, irritantes, de elevada toxicidad o de elevado poder de penetración a través de la piel, debe ser llevada a cabo empleando guantes adecuados y limpios.



No hay que perder de vista que los guantes pueden impregnarse con sustancias que se solubilizan en los mismos y que, incluso, pueden ser permeables a ciertos productos químicos. De ahí la necesaria elección cuidadosa de los guantes en función de los productos a manipular, para ello se deberá de consultar la correspondiente Ficha de Seguridad del producto.

- PROTECCION DE LOS OJOS

La vista constituye el sentido más apreciado y probablemente el más vulnerable a causa de su fragilidad. Esto, junto a la posibilidad de que en nuestro trabajo en los laboratorios se puedan producir proyecciones y pequeñas (o grandes) explosiones, hacen absolutamente imprescindible la utilización de los correspondientes equipos de protección siempre que se realicen trabajos con la existencia de estos riesgos. Dado que las operaciones de este tipo son casi continuas en los laboratorios, es recomendable la utilización permanente de gafas de seguridad, asociándose su uso al de la bata.

Las personas que utilizan gafas de manera permanente deben disponer de unas gafas de seguridad suplementarias con protección lateral para la realización de operaciones con riesgo. Llevar lentes de contacto está totalmente desaconsejado en el laboratorio, ya que, aunque sea obligatorio el uso de gafas de seguridad, los vapores irritantes o corrosivos pueden disolverse con facilidad en el líquido lacrimal existente entre la lentilla y el ojo y provocar daños importantes. Siempre que el material utilizado sea corrosivo, irritante para la piel, fríos, calientes o metales fundidos, las gafas de seguridad deben ser sustituidas por pantallas de protección, evitando no solo el contacto de estas sustancias con los ojos, sino también con el resto de la piel de la cara.



- **PROTECCION RESPIRATORIA**

Cuando deban manipularse compuestos volátiles de alta toxicidad es indispensable emplear equipos de protección respiratoria, adaptados y homologados para el compuesto en cuestión. También deben utilizarse en casos de fugas y derrames de los compuestos anteriores dada la gran concentración ambiental que resulta de los mismos.

Dado su nivel de importancia, en función del compuesto del que nos queremos proteger, su nivel de peligrosidad, el uso de estos equipos de protección requiere una adecuada utilización, así como la comprobación diaria de su estado de conservación, siguiendo las correspondientes instrucciones de conservación y mantenimiento.

Los equipos de protección respiratoria se dividen en equipos dependientes del medio ambiente y equipos independientes del medio ambiente, en función de que el aire respirable proceda del propio medio ambiente donde se realiza el trabajo o de una red de aire comprimido o botellas de oxígeno.



Fuente: Universidad de Jaén, 2016.

Disponible en:

<http://www10.ujaen.es/sites/default/files/users/prevencion/Plan%20Prevencion%20Riesgos%20Laborales%202016>