

EVALUACIÓN DEL BIOGÁS COMO ENERGÍA ALTERNATIVA GENERADO EN
LAS CHIMENEAS DEL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA” EN
MANIZALES, CALDAS

MARÍA XIMENA HEREDIA RAMÍREZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

EVALUACIÓN DEL BIOGÁS COMO ENERGÍA ALTERNATIVA GENERADO EN
LAS CHIMENEAS DEL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA” EN
MANIZALES, CALDAS

MARÍA XIMENA HEREDIA RAMÍREZ

Proyecto integral de Grado para optar el título de:
INGENIERO QUIMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019

Nota de aceptación:

Ing. Oscar Libardo Lombana C.
Presidente del Jurado

Ing. Elizabeth Torres Gámez
Jurado 1

MSc. Juan Camilo Cely Garzón
Jurado 2

Bogotá D.C, febrero de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

A mis padres por ser el pilar fundamental de lo que soy hoy, por su amor y apoyo incondicional que gracias a ello hemos llegado hasta aquí.

A mi sobrino buscando siempre ser un ejemplo para él, que comprenda la recompensa de los grandes esfuerzos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus bendiciones, por darme la familia que hoy tengo, por la oportunidad de recibir una educación de calidad que me ha permitido conseguir grandes logros. Papi, Mami *GRACIAS* por sus esfuerzos y enseñanzas que día a día hacen de mí una mejor persona, por entender cada momento de tropiezo que se me ha presentado, por su constante apoyo en esta etapa de mi vida, por siempre ser mi guía en cada decisión y camino que tomo, los amo gracias infinitas papitos.

Linnis gracias por tu amor y apoyo incondicional, tus consejos y regaños buscando lo mejor para mí, gracias por dar vida al ser que me vuelve loca de amor quien me inspira a seguir adelante para entregarle las mejores enseñanzas. Te amo Hermanita, Te amo Chiquitis.

Gracias a mi familia por el apoyo que me han brindado, sus voces de aliento y consejos, puedo decirles familia el día ha llegado. A Toby quien me acompañó cada noche sin falta para cumplir esta primera etapa profesional de mi vida.

A Iván Ortiz por su amor y compañía durante esta etapa, por cada día que dedicaba a explicarme y ayudarme con lo que parecía imposible, Gracias.

Gracias a la Universidad de América y su equipo de trabajo quienes fueron parte de este proceso de aprendizaje.

Gracias a la empresa EMAS S.A por permitir desarrollar este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	16
OBJETIVOS	17
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO REFERENCIAL	19
1.1 MARCO TEÓRICO	19
1.1.1 PURIFICACIÓN DE BIOGÁS	19
1.1.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA	20
1.1.3 GENERACIÓN DE BIOGÁS	20
1.1.4 FASES DE GENERACIÓN DE BIOGÁS.	21
1.1.5 MÉTODOS DE PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS	22
1.1.5.1 TÉCNICAS FISICOQUÍMICAS	22
1.1.6 MODELOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	24
1.1.6.1 PANEL INTERGUBERNAMENTAL DE CAMBIO CLIMÁTICO (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)	24
1.1.6.2 MODELO MEXICANO	25
1.2 MARCO LEGAL	26
2. DIAGNÓSTICO DEL RELLENO SANITARIO	27
2.1 RELLENOS SANITARIOS.	28
2.1.1 MAGIC GARDEN, SAN ANDRES	28
2.1.2 EL CARRASCO, BUCARAMANGA	29
2.1.3 DOÑA JUANA, BOGOTÁ	29
2.2 SITUACIÓN ACTUAL DEL RELLENO SANITARIO	30
2.3 ESTADO ACTUAL DE LAS CHIMENEAS	31
2.4 PARÁMETROS DE ANÁLISIS	32
2.5 CARACTERIZACIÓN DE BIOGÁS DE LAS CHIMENEAS	33
2.5.1 MEDIDOR MULTIGAS, FUNCIONAMIENTO	33
2.6 PROTOCOLO DE MUESTREO	34
2.6.1 SELECCIÓN DE CHIMENEAS	34
2.6.2 LOCALIZACIÓN CHIMENEAS, RELLENO SANITARIO DE MANIZALES, CALDAS.	35
2.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN	37
3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE PURIFICACIÓN	39
3.1 PROCESOS DE PURIFICACIÓN	39
3.1.1 MÉTODO DE ADSORCIÓN	39
3.1.2 MÉTODO DE ABSORCIÓN	40
3.1.3 MÉTODO BIOLÓGICO	42
3.1.3.1 TIPO DE BIOFILTROS	42

3.1.4	MÉTODO DE PURIFICACIÓN POR MEMBRANA	43
3.2	SELECCIÓN PROCESO DE PURIFICACIÓN	44
3.2.1	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE PURIFICACIÓN	45
3.2.1.1	CRITERIOS DE EVALUACIÓN	45
3.2.2	MATRIZ DE SELECCIÓN MEJOR ALTERNATIVA PARA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS	49
3.3	DESARROLLO EXPERIMENTAL	50
3.3.1	BIOFILTROS	50
3.4	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN	55
3.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN.	56
4.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS	58
4.1	PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS.	59
4.2	PROYECCIÓN DE METANO, MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS	59
4.3	PROYECCIÓN DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA”	61
4.3.1	GENERACIÓN Y PROYECCIÓN DE BIOGÁS EN “LA ESMERALDA”...	62
4.4	APLICACIONES DEL BIOGÁS.	63
4.4.1	PRODUCCIÓN DE CALOR O VAPOR	64
4.4.2	BIOMETANO	65
4.4.2.1	COMBUSTIBLE VEHICULAR	66
4.4.2.2	INYECCIÓN A LA RED DE GAS NATURAL	66
4.4.3	GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD	66
4.4.3.1	MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	67
4.4.3.2	TURBINAS A GAS	67
4.5	VIABILIDAD DEL BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA”	67
4.6	SELECCIÓN DE EQUIPOS	68
4.6.1	BIOFILTRO	68
4.6.1.1	DIMENSIONAMIENTO DEL BIOFILTRO	68
4.6.2	MOTO-GENERADOR	70
4.6.3	ACCESORIOS	72
4.6.3.1	VÁLVULA	73
4.6.3.2	MANÓMETRO	73
4.7	PROCESO ALTERNATIVO DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS.	74
5.	ANÁLISIS FINANCIERO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA” DE LA EMPRESA EMAS S.A.	77
5.1	EGRESOS	77
5.1.1	COSTOS MANO DE OBRA	78
5.1.1.1	MANTENIMIENTO	78
5.1.2	PRÉSTAMO	78
5.2	FLUJO DE CAJA PARA LA EMPRESA EMAS S.A	79

5.3	VALOR PRESENTE NETO (VPN)	80
5.4	TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	80
6.	CONCLUSIONES	81
7.	RECOMENDACIONES	82
	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	87

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características generales del biogás.	19
Tabla 2. Tratamiento de purificación según el uso final.	22
Tabla 3 Número de chimeneas del relleno sanitario La Esmeralda.	31
Tabla 4. Análisis composicional de Relleno Sanitario La Esmeralda –Chimenea C12+	32
Tabla 5. Sistema de coordenadas, Relleno sanitario La Esmeralda	36
Tabla 6. Tabla de resultados obtenidos en Zona activa y Cota Máxima.	37
Tabla 7. Ventajas y desventajas del método de adsorción.	39
Tabla 8. Ventajas y desventajas del método de absorción.	41
Tabla 9. Ventajas y desventajas del método biológico.	42
Tabla 10. Ventajas y desventajas del método por separación de membrana.	43
Tabla 11. Características de construcción y diseño para cada alternativa	45
Tabla 12. Características de operación para cada alternativa.	47
Tabla 13. Calificación según el rango de eliminación de H ₂ S.	47
Tabla 14. Características de eficiencia para cada alternativa.	48
Tabla 15. Clasificación según el rango de coste por m ³ de biogás.	48
Tabla 16. Costes de las diferentes alternativas de purificación.	49
Tabla 17. Matriz de selección mejor alternativa para purificación de biogás.	49
Tabla 18. Tabla de resultados de eliminación de sulfuro de hidrogeno.	56
Tabla 19. Tiempos de residencia, remoción de H ₂ S.	56
Tabla 20. Categorías de degradación de residuos sólidos urbanos.	59
Tabla 21. Índices de generación de metano (k).	60
Tabla 22. Valores para el potencial de metano.	60
Tabla 23. Factor de corrección para metano (MFC).	61
Tabla 24. Consideraciones para proyección de generación y recuperación de biogás en el relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales.	61
Tabla 25. Ventajas del Biometano frente al Gas Natural.	65
Tabla 26. Parámetros específicos para el desarrollo del diseño del biofiltro.	68
Tabla 27. Resumen de dimensiones Biofiltro.	69
Tabla 28. Dimensiones y especificaciones moto-generador.	72
Tabla 29 Proyección de generación de Biogás en el relleno sanitario la esmeralda.	76
Tabla 30. Egresos, Equipos/Sustratos.	77
Tabla 31. Amortización de préstamo.	78
Tabla 32. Flujo de caja.	79

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Planta incineradora de biogás.	28
Ilustración 2. Ciclo de producción de energía a partir de biogás de relleno sanitario.	30
Ilustración 3. Relleno Sanitario La Esmeralda, Manizales, Caldas.	30
Ilustración 4. Chimeneas del relleno sanitario La Esmeralda.	32
Ilustración 5. Medidor Multigas MAX XTII	33
Ilustración 6. Mapa localización chimeneas Relleno Sanitario La Esmeralda.	35
Ilustración 7. Chimeneas de experimentación.	37
Ilustración 8. Método de adsorción para purificación de biogás.	40
Ilustración 9. Método de absorción para purificación de biogás.	41
Ilustración 10. Método de purificación de biogás por membranas.	44
Ilustración 11. Manguera PVC transparente.	51
Ilustración 12. Cascara de coco.	51
Ilustración 13. Aserrín.	52
Ilustración 14. Piedra pómez.	53
Ilustración 15. Carbón Vegetal.	53
Ilustración 16. Ventilador Extractor casero y válvula tipo bola.	54
Ilustración 17. Batería recargable.	54
Ilustración 18. Sistema de biofiltración para remoción de H ₂ S.	55
Ilustración 19. Diseño interno de una Turbina a gas.	67
Ilustración 20. Dimensionamiento de Biofiltro.	70
Ilustración 21. Planta eléctrica de 127 kW continua a biogás.	71
Ilustración 22. Imagen interna de una válvula tipo bola.	73
Ilustración 23. Manómetro.	73
Ilustración 24. Proceso de purificación de biogás.	75

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 2. Generación de metano por IPCC	24
Ecuación 3 Masa de carbono orgánico degradable	25
Ecuación 4 Potencial de generación de metano	25
Ecuación 5 Índice de generación de metano.	25
Ecuación 6 Reacción de retención de sulfuro de hidrogeno.	53
Ecuación 7 reacción de sulfuro de hierro y oxigeno	53
Ecuación 8 Flujo máximo de biogás.	69
Ecuación 9 Volumen final.	69
Ecuación 10 Calculo de volumen final de biogás.	69
Ecuación 11 Altura del biofiltro	69
Ecuación 12 reacción general estequiométrica	70
Ecuación 13 volumen del gas	70

ABREVIATURIAS

CH₄: Cantidad de metano.

R: Fracción de metano

OX: factor de oxidación, que representa la cantidad de metano que se oxida.

DDOC_m: Es la masa de carbono orgánico degradable disuelto

W: Es la masa de los desechos depositados.

DOC: Es el carbono orgánico degradable durante el año de deposición.

DOCF: Fracción de DDOC que se puede descomponer.

MCF: Es el factor de corrección para metano.

Lo: potencial de generación de metano.

F: fracción de metano en el gas del relleno sanitario.

k: índice de decaimiento de metano.

t_i: Edad de los residuos depositados en año i.

LEL: concentración de gases combustibles.

GN: Gas natural.

EBRT: Tiempo de residencia.

V_f: Volumen final de biofiltro.

Q: Caudal.

GLOSARIO

BIOGÁS: es una mezcla gaseosa generada por la descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos compuesta generalmente de metano, dióxido de carbono e impurezas.

DIGESTIÓN ANAEROBIA: consiste en la fermentación de residuos vegetales o animales y agua en ausencia de oxígeno.

ÍNDICE DE GENERACIÓN DE METANO: constante que varía con base en la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el relleno sanitario.

IPCC, PANEL INTERGUBERNAMENTAL DE CAMBIO CLIMÁTICO: analiza la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por la actividad humana.

LIXIVIADO: líquido residual generalmente tóxico, que se filtra de un vertedero por percolación.

METANO: el metano es un hidrocarburo de un solo átomo de carbono el cual tiene unido 4 átomos de hidrógeno, es considerado uno de los gases más contribuyentes al efecto invernadero.

PERMEABLE: que puede ser penetrado o traspasado por el agua u otro fluido.

PURIFICACIÓN: proceso en el cual se eliminan las impurezas de una mezcla las cuales pueden generar alteraciones o daños a la salud o medio ambiente.

RELLENO SANITARIO: espacio a cielo abierto destinado para almacenar los residuos sólidos urbanos generados diariamente.

RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: son residuos provenientes de las diferentes actividades que se realizan diariamente en los hogares, comercios e industrias que ya han cumplido con un ciclo de vida útil y son desechados convirtiéndose en basuras.

SULFURO DE HIDRÓGENO: es un gas tóxico que se produce por la descomposición anaeróbica microbiana de residuos sólidos urbanos.

RESUMEN

En el presente trabajo de grado se quiere evaluar el biogás que se produce en las chimeneas del relleno sanitario de Manizales “La Esmeralda” para determinar la viabilidad de este como fuente de energía alternativa gracias al proceso natural por descomposición de los residuos sólidos urbanos, la empresa EMAS S.A.S, quien ve una oportunidad de aprovechamiento de dicho recurso como posible fuente de energía alternativa, ve también que mediante un proceso de purificación y aprovechamiento se contribuye a la mitigación del impacto ambiental que se presenta al disponer de este gas a la atmósfera y tener efectos negativos en el ambiente, ya que este biogás es considerado gas de efecto invernadero. El proyecto se divide en tres principales núcleos, caracterización, selección del método de purificación y desarrollo experimental de purificación; pasos que permiten el desarrollo del proyecto. Se realizó un diagnóstico de la ubicación y estado actual de las chimeneas en el relleno sanitario, con previo conocimiento de los parámetros que se deben reconocer para poder dar paso a la caracterización del biogás, se evalúan un total de 12 chimeneas, luego se procede a seleccionar posibles alternativas de purificación mediante una revisión bibliográfica teniendo en cuenta ciertos criterios de evaluación como: diseño, construcción, operación, eficiencia y costos, determinando el proceso más conveniente y óptimo mediante una matriz de selección y como fase final se desarrolla la experimentación poniendo en evaluación el método de purificación biológica, método seleccionado por el cual satisfactoriamente se remueve el 96,80% de sulfuro de hidrogeno que se encontraba en el biogás, que se produce en el relleno sanitario La Esmeralda.

Palabras clave: Biogás, residuos sólidos urbanos (RSU), purificación, sulfuro de hidrogeno, metano, energía alternativa.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el biogás como energía alternativa generado en las chimeneas del relleno sanitario “La Esmeralda” en Manizales, Caldas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Establecer el número de chimeneas pertinentes para la evaluación del biogás.
- ✓ Seleccionar el proceso de purificación del biogás para aprovechamiento energético.
- ✓ Evaluar el proceso de purificación del biogás a nivel laboratorio.
- ✓ Especificar el proceso para el aprovechamiento del biogás.
- ✓ Realizar el análisis financiero del proceso seleccionado para el aprovechamiento energético del biogás.

INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia es un proceso natural en el cual ocurren una serie de reacciones bioquímicas¹ dada por la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y que durante su transformación se producen gases, conocidos como biogás compuesto principalmente de metano, dióxido de carbono, nitrógeno y sulfuro de hidrogeno. La generación de biogás se da principalmente en plantas de tratamiento de agua, digestores, biodigestores y rellenos sanitarios.

El metano es el principal componente del biogás compuesto que le da el poder calórico para ser usado como materia prima en otros procesos como combustión, calor, generación de vapor, energía eléctrica e inclusive sustitución de gas natural, para poder aprovechar de este recurso natural se deben de realizar algunos tratamientos físicos o químicos.

Existen múltiples métodos de purificación de biogás que involucran procesos físicos, químicos o fisicoquímicos que buscan la remoción de sulfuro de hidrogeno ya que este es un compuesto que tiene varios efectos negativos para el medio ambiente, la salud y físicos. El sulfuro de hidrogeno es un gas incoloro, volátil, altamente corrosivo con olor a huevo podrido perceptible al olfato humano en concentraciones entre 0.1 a 0.5 ppm², este compuesto en presencia de agua forma ácido sulfúrico afectando corrosivamente equipos como turbinas, micro turbinas y generadores eléctricos en los cuales se desee utilizar el biogás, por esta razón es importante la desulfuración del biogás así contenga bajas concentraciones de H₂S.

En la actualidad se vienen desarrollando múltiples investigaciones en pro del medio ambiente, es por esta razón que la empresa EMAS S.A, quiere implementar una planta piloto, sistema de purificación de biogás para generar algún tipo de fuente de energía alternativa limpia ayudando a mitigar el impacto de gases de efecto invernadero que actualmente se generan hacia el ambiente en el relleno sanitario "La Esmeralda".

Por consiguiente, la finalidad del proyecto que se presenta es evaluar el biogás como energía alternativa generado en las chimeneas del relleno sanitario "La Esmeralda", mediante la caracterización del biogás por medio de un método directo para determinar la viabilidad de la selección de un proceso de purificación la cual permitirá aprovecharlo.

¹ VARNERO., María. Manual del biogás, 2011. p.12.

² Marín., Mirella. Purificación Biológica de Biogás. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrónomas. Chile. 2011. p.8.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Purificación de biogás. El relleno sanitario es un espacio destinado para la disposición final de residuos sólidos domiciliarios o municipales, de áreas y profundidades considerables a donde llegan grandes volúmenes de desechos los cuales son confinados, cubiertos por capas de tierra y compactados diariamente. El relleno sanitario “La Esmeralda” es del tipo mecanizado, ya que este recibe más de 40 toneladas diarias e implementa maquinaria industrial pesada como retroexcavadoras, buldócer, aplanadoras entre otros. La acumulación de la materia orgánica da inicio a un proceso denominado digestión anaerobia que es la fermentación por acción de los microorganismos que la degradan generando un gas denominado biogás, el cual es una mezcla de gases (ver tabla N°1.), conformado especialmente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrogeno (H₂S), estos gases causan daño al medio ambiente y a la salud, el metano se considera un gas de efecto invernadero y el sulfuro de hidrogeno es un gas tóxico y genera malos olores aun en pequeñas cantidades (Generación y manejo de gases en rellenos sanitarios).

Tabla 1. Características generales del biogás.

Composición.	55 - 70% Metano (CH ₄). 30 - 45% Dióxido de carbono (CO ₂). Trazas.
Contenido energético.	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³ .
Equivalente de combustible.	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás.
Límite de explosión.	6 – 12 % de biogás en el aire.
Temperatura de ignición.	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado).
Presión crítica.	74 – 88 atm.
Temperatura crítica.	-82.5°C
Densidad normal.	1.2 kg/m ³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible).
Masa molar.	16.043 kg Kmol ⁻¹ .

Fuente: DEUBLEIN, Dieter and STEINHAUSER, Angelika. Biogas from waste and renewable resources. 2., rev. and expanded ed., 2. repr. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 3527327983. p. 49-56

En el ejercicio de hacer los procesos industriales amigables con el medio ambiente se generan opciones utilizando productos o subproductos como energías alternativas no convencionales, para la empresa EMAS S.A el biogás generado en

el relleno sanitario “La Esmeralda”, representa una gran oportunidad de crecimiento y desarrollo económico y ambiental ante las demás empresas que cuentan con este recurso. Para ejecutar el proyecto y realizar la evaluación del biogás de salida de las chimeneas del relleno sanitario se considera realizar procesos de purificación del biogás.

1.1.2 Digestión anaerobia. La digestión anaerobia es un proceso biológico que degrada materia orgánica en ausencia de oxígeno, obteniendo una mezcla de gases (metano, dióxido de carbono, sulfato de hidrogeno) como producto de esta, llamado biogás, y generando un líquido llamado lixiviado. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. La digestión anaerobia es un proceso que se desarrolla en 4 diferentes etapas, durante las cuales la materia orgánica se descompone en moléculas más pequeñas para producir finalmente biogás.

1.1.3 Generación de biogás. El biogás que se produce en los rellenos sanitarios es generado por la degradación de la materia orgánica de la cual se componen los residuos sólidos que se dispone en los hogares, industrias, almacenes, etc., y es de la composición de esos desechos que depende la cantidad de biogás que se puede generar, también de las condiciones y variables a las cuales se encuentra el relleno sanitario y la basura como son: el contenido de humedad, porcentaje de humedad del ambiente, la densidad de la compactación, la acidez, temperatura, los microorganismos, etc.

- ✓ **COMPOSICIÓN DE RSU:** Los residuos sólidos urbanos (RSU) se dividen principalmente en compuestos orgánicos como: papel (revistas, periódicos, papel de oficina, cartón), plástico (polietileno, PVC, bolsas, etc.), residuos de comida, madera, textil, etc., y compuestos **inorgánicos** como: metal, vidrio, materiales inertes, residuos peligrosos, escombros, inservible, otros.
- ✓ **CONTENIDO DE HUMEDAD:** El contenido de humedad es una variable fundamental en el proceso de generación del biogás, ya que de este depende la velocidad de degradación de la materia orgánica, en los rellenos sanitarios se realiza recirculación de los líquidos percolados para humedecer la basura y evitar que se sequen, este contenido de humedad está ligado al clima en el que se encuentre ubicado el relleno. (Colmenares Mayanga & Santos Bonilla, 2007).
- ✓ **TEMPERATURA:** Es un factor importante que interviene en la generación de los microorganismos que se encargan de consumir la materia orgánica que se encuentra en los rellenos sanitarios, que hacen que se produzca mayor o menor cantidad de biogás.
- ✓ **COMPACTACIÓN:** Para obtener cantidades considerables de biogás es primordial que el método de compactación se realice eficientemente, debido a que este permite la expulsión de oxígeno que se encuentra retenido entre

los desechos y esto hace que se lleve a cabo un proceso de digestión anaerobia produciendo metano y dióxido de carbono.

1.1.4 Fases de generación de biogás.

- ✓ **FASE I:** Es la primera etapa para la generación de biogás, esta fase comienza en el momento en que los residuos sólidos llegan al relleno sanitario y son depositados, donde la materia orgánica contenida entra en contacto con el oxígeno del aire comenzando a descomponer los materiales más fácilmente biodegradables. En esta fase se da inicio a la hidrólisis de proteínas, carbohidratos y lípidos, hidrolizados por enzimas que son producidas por microorganismo fermentativos o acidogénicos, dando como resultado compuestos solubles que sirven como fuente de energía para otros microorganismos. La temperatura, composición bioquímica de los residuos sólidos, tiempo de retención hidráulico, tamaño de partícula y pH son las variables más determinantes en esta primera fase ya que, de estos depende el proceso hidrolítico que se lleva a cabo en esta primera fase³.
- ✓ **FASE II:** En esta fase la actividad microbiana se empieza a acelerar produciendo grandes cantidades de bacterias acidogénicas (ácido acético, fórmico, concentraciones de H₂) que alteran el pH de la biomasa alcanzando un acidez de 5 o menos, estas bacterias están encargadas de eliminar trazas de oxígeno disuelto que no fueron expedidos durante el proceso de compactación de los desechos.
- ✓ **FASE III:** Es la fase final de la fase ácida donde la mayoría de bacterias anaeróbicas han consumido la biomasa, generando desechos que serán utilizados por las bacterias que se encuentran en la última fase, bacterias denominadas metanogénicas que son las encargadas de convertir el ácido acético y el gas de hidrogeno en metano y dióxido de carbono elevando los rangos de pH entre 6,8 y 8 llegado a valores neutros. (Colmenares Mayanga & Santos Bonilla, 2007)
- ✓ **FASE IV:** Es la última etapa para la generación del biogás, la actividad microbiana y la generación de gases disminuye debido a que la materia orgánica biodegradable se encuentra en menor cantidad que en las primeras fases, los microorganismos metanogénicos de las dos últimas fases son los más determinantes para la generación del biogás ya que son los responsables de la formación de metano, estos microorganismos se dividen en dos grupos hidrogenotróficos encargados de metabolizar H₂, CO₂, y fórmico, y los acetoclásticos que consume acetato, metanol y aminas, alcanzando entre el 55 y 70% de metano en la composición final del biogás⁴.

³ VARNERO MORENO, María Teresa. Manual de Biogás. Roma: D - FAO, 2011.p. 17-20

⁴ Ib.id.p.17-20

1.1.5 Métodos de purificación del biogás. La mezcla de gases contenido por diferentes componentes hace que el biogás no sea totalmente puro, todas esas impurezas deben ser removidas dependiendo del tipo de utilización del biogás y en función del contaminante a eliminar, estos métodos pueden ser del tipo físico-químicos o biológicos. La purificación del biogás es de gran importancia, ya que gracias a este proceso se puede aumentar el poder calorífico y se eliminan compuestos que pueden generar daños en las maquinarias por el poder corrosivo que se contiene en el biogás sin purificar⁵.

Tabla 2. Tratamiento de purificación según el uso final.

USO FINAL	ELIMINACIÓN DEL AGUA.	ELIMINACIÓN DEL CO ₂ .	ELIMINACIÓN DEL H ₂ S.
Producción térmica en caldera.	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios.	1-2	0-1-2	1-2
Combustibles de vehículos o para turbinas.	2	2	2
Gas natural para calefacción.	2	2	2
Pilas de combustible.	2	2	2

Nota: 0 no requiere tratamiento 1 tratamiento parcial, 2 tratamiento elevado

Fuente: VARNERO MORENO, María Teresa. Manual de Biogás. Roma: D - FAO, 2011.

Los números de la tabla 2. Se refieren al tratamiento adecuado para el uso final del biogás purificado, donde 0 significa que no requiere de tratamiento, 1 un tratamiento parcial y 2 un tratamiento elevado⁶.

1.1.5.1 Técnicas fisicoquímicas. Los métodos más utilizados para la eliminación de compuestos contaminantes contenidos en el biogás se basan en los principios de separación como adsorción, absorción, sistemas de membrana y oxidación térmica y catalítica⁷.

⁵ VARNERO, María T., et al. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. En: INFORMACIÓN TECNOLÓGICA. vol. 23, no. 2, p. 31-40

⁶ VARNERO MORENO, María Teresa. purificación de biogás y conversión de dióxido de carbono a metano (gas natural), mediante procesos bacterianos. [0]:2012.

⁷ MARIN MARIN, Mirella Lucia. Purificación biológica de biogás. Universidad de Chile,

- ✓ **Método de adsorción.** Este método emplea materiales sólidos fijos como carbón activado, sílicagel y tamices moleculares de zeolitas en el cual se absorbe el sulfuro de hidrógeno por adhesión sobre la superficie del absorbente. El porcentaje de pureza del biogás depende del adsorbente que se desee utilizar y así mismo este permitirá la eliminación de H₂S, CO₂, humedad, entre otras impurezas con eficiencias cercanas al 98% haciendo que este método sea de altos costos⁸.
- ✓ **Método de absorción.** Este método se emplea para la eliminación de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono presente en el biogás en bajas concentraciones, este método se basa en la separación de compuestos gaseosos al ponerse en contacto con un líquido que actúa como medio absorbente todo esto por medio de la transferencia de masa.

Para la implementación de este método usualmente se usa:

- ✓ Cloruro de hierro el cual genera precipitados insolubles generando una remoción de sulfuro de hidrógeno de 10 ppm aproximadamente⁹.
- ✓ Soluciones de aminas donde se da una reacción entre el grupo amino y el sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono dando como resultado sulfuros de amonio. Este proceso se lleva a una temperatura de 48°C favoreciendo la reacción entre los compuestos sin exceder los límites de temperatura ya que puede causar una evaporación perdiendo solución química¹⁰.
- ✓ **Métodos de separación por membrana.** Este método se basa en la separación por diferencia de presiones de algunos contaminantes al entrar en contacto con una membrana selectiva. El factor determinante para la purificación del biogás es la permeabilidad que poseen las moléculas de este gas en función de la solubilidad y difusividad.

“El proceso de permeación de un gas a través de una membrana polimérica no rugosa es un proceso complejo que puede involucrar varios pasos: 1) Adsorción del gas en una interface de la membrana. 2) Solución del gas en la membrana en esa interface. 3) Difusión activada del gas en, y a través de la membrana. 4) Desprendimiento del gas de la solución por la interface opuesta. 5) Desorción del gas de la última interface.”¹¹.

⁸ MORERO, Betzabet Del Valle. Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. [0]:2014. p.19-34

⁹ Ib.id.p.19-34

¹⁰ ORTEGA VIERA, Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1, vol. 36, no. 1, p. 45-56

¹¹ VARNERO, María T., et al. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. En: INFORMACIÓN TECNOLÓGICA. vol. 23, no. 2, p. 31-40

- ✓ **Métodos biológicos.** En las diferentes bibliografías se ha encontrado que el tratamiento biológico para la eliminación de impurezas del biogás es eficiente y de bajos costos ya que este se fundamenta en la utilización de microorganismos consumidores de H_2S (g) como fuente nutricional, mediante la oxidación microbiológica del sulfuro de hidrógeno obteniendo como producto azufre elemental (S^0) o sulfatos (SO_2) fijando el CO_2 por función estequiométrica de la reacción y de esta manera remover el CO_2 y H_2S enriqueciendo el biogás en metano¹². Los microorganismos más utilizados para la purificación de biogás son: aerobios azufre-oxidantes, como el *Thiobacillus ferrooxidans*, *Methylobacterium*, *Paracoccus Pseudomonas*, *Starkeya*, *Sulfolobus* y anaerobios como *Allochromatium*, *Chlorobium*, *Rhodopseudomonas*, *Rhodovulum* y *Thiocapsa*,¹³.

1.1.6 Modelos de generación de biogás. Para la utilización del biogás que se forma en los rellenos sanitarios es importante conocer el potencial de generación que pueda componer un lugar en específico. Para esto existen modelos cinéticos teóricos de primer orden que proyectan la generación de dicho biogás.

1.1.6.1 Panel intergubernamental de cambio climático (ipcc, intergovernmental panel on climate change). La función principal del grupo de intergubernamental es analizar información científica, técnica y socioeconómica sobre los riesgos del cambio climático que son provocados por la actividad humana, y analiza las repercusiones y posibles atenuaciones del mismo. Este método de proyección de biogás se basa en el método de descomposición de primer orden donde el carbono se degrada generando metano, las ecuaciones matemáticas en las que se basa este modelo son las siguientes.

Ecuación 1. Generación de metano por IPCC

$$CH_4 = \sum_x CH_4_{generadox} - R \times (1 - OX)$$

Dónde:

- ✓ CH_4 : Cantidad de metano.
- ✓ R: Fracción de metano
- ✓ OX: factor de oxidación, que representa la cantidad de metano que se oxida.

Para la estimación de metano generado de la ecuación 1 el modelo IPCC se rige mediante la siguiente ecuación:

¹² VARNERO, María T., et al. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. En: INFORMACIÓN TECNOLÓGICA. vol. 23, no. 2, p. 31-40

¹³ ORTEGA VIERA, Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1, vol. 36, no. 1, p. 45-56

Ecuación 2 Masa de carbono orgánico degradable

$$DDOCm = W \times DOC \times DOCF \times MCF$$

Dónde:

- ✓ DDOCm: Es la masa de carbono orgánico degradable disuelto
- ✓ W: Es la masa de los desechos depositados.
- ✓ DOC: Es el carbono orgánico degradable durante el año de deposición.
- ✓ DOCF: Fracción de DDOC que se puede descomponer
- ✓ MCF: Es el factor de corrección para metano, tiene en cuenta el grado de degradación anaerobia de los residuos.

Ecuación 3 Potencial de generación de metano

$$L_o = DDOCm \times F \times \frac{16}{12}$$

Dónde:

- ✓ Lo: potencial de generación de metano.
- ✓ F: fracción de metano en el gas del relleno sanitario, se ajusta a 0,5 debido a que el biogás está compuesto generalmente del 50% de metano.
- ✓ 16/12: representa los pesos moleculares de CH₄ y C₁₁.

1.1.6.2 Modelo mexicano. Este modelo asume que la generación de biogás llega a un máximo, tiene en cuenta una ecuación de degradación de primer orden, desde la disposición de los residuos y el comienzo de generación de biogás, relacionado con las características del relleno. La expresión que este modelo utiliza es la siguiente¹⁴.

Ecuación 4 Índice de generación de metano.

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2 \times k \times L_o \times M_i \times e^{-kt_i}$$

Dónde:

- ✓ QM: índice de generación de biogás.
- ✓ k: índice de decaimiento de metano.
- ✓ Lo: potencial máximo de generación de metano.
- ✓ Mi: masa de residuos dispuestos en el año.

¹⁴ URREGO-MARTÍNEZ, Elizarova and RODRÍGUEZ-MIRANDA, Juan Pablo. Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana, Bogotá - Colombia. En: UNIVERSIDAD Y SALUD. Aug 31, vol. 18, no. 2, p. 338

✓ t_i : Edad de los residuos depositados en año i .

1.2 MARCO LEGAL

En Colombia hoy día se trabaja para potencializar el desarrollo de energías limpias a partir del agua, viento, el sol, y los residuos de biomasa.

La ley 697 2000 promueve el uso racional y eficiente de la energía mediante la utilización de energías alternativas. La Ley considera el URE como asunto de interés social, público y de conveniencia nacional y fundamental para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción del uso de energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales. La Ley 697 de 2000 se refirió a las fuentes no renovables de energía – FNCE como las fuentes disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente (...) estas fuentes están representadas principalmente por las llamadas fuentes renovables, que son energías que se regeneran o no se agotan, como el sol, el viento, el agua (pequeñas caídas de agua, olas, mareas, y diferencias de temperatura en los océanos), la biomasa y el calor de la tierra. (...) y la energía nuclear¹⁵.

La ley 788 de 2002 en el capítulo 2 habla sobre el impuesto a la renta y complementarios en el “Artículo 207-2. Otras rentas exentas: Son rentas exentas las generadas por los siguientes conceptos, con los requisitos y controles que establezca el reglamento: 1. Venta de energía eléctrica generada con base en los recursos eólicos, biomasa o residuos agrícolas, realizada únicamente por las empresas generadoras, por un término de quince (15) años, siempre que se cumplan los siguientes requisitos:(...)”¹⁶.

Decreto 948 de 1995 Reglamento de protección y control de la calidad del aire. El presente Decreto contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, de alcance general y aplicable en todo el territorio nacional, mediante el cual se establecen las normas y principios generales para la protección atmosférica, los mecanismos de prevención, control y atención de episodios por contaminación del aire, generada por fuentes contaminantes fijas y móviles, (...) Artículo 110. Verificación del cumplimiento de normas de emisión en procesos industriales. Para la verificación del cumplimiento de las normas de emisión por una fuente fija industrial, se harán las mediciones de las descargas que ésta realice en su

¹⁵ LEY 607 DE 2000. la creación, funcionamiento y operación de las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria, UMATA, y se reglamenta la asistencia técnica directa rural en consonancia con el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología. República de Colombia. En línea recuperado de:
<https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Leyes/Ley%20607%20de%202000.pdf>

¹⁶ LEY 788 DE 2002. Impuesto sobre la renta y complementarios. República de Colombia. En línea tomado de: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0788_2002.html

operación normal mediante alguno de los siguientes procedimientos. (...)a. Medicion Directa. por muestreo isocinético en la chimenea o ducto de salida: es el procedimiento consistente en la toma directa de la muestra de los contaminantes emitidos, a través de un ducto, chimenea u otro dispositivo de descarga, en el que el equipo de muestreo, simula o mantiene las mismas condiciones de flujo de salida de los gases de escape¹⁷.

2. DIAGNÓSTICO DEL RELLENO SANITARIO

En este capítulo se describe el proceso que se lleva a cabo en la empresa EMAS S.A.S y se realiza el análisis correspondiente a los gases que se generan en el relleno sanitario “La Esmeralda” mediante la caracterización de los mismos, con el

¹⁷ DECRETO 948 DE 1995. Reglamento de protección y control de la calidad del aire. República de Colombia. En línea tomado de: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec_0948_1995.pdf.

objetivo de dar aprovechamiento a estos como viabilidad de fuente de energía alternativa y consigo contribuyendo a la disminución de gases de efecto invernadero.

2.1 RELLENOS SANITARIOS

Toneladas de residuos sólidos urbanos se generan en varias ciudades del país, producidas por las diversas actividades diarias que realizamos las personas, pero generar estas grandes cantidades requiere de un tratamiento específico y un lugar donde se deben de disponer estos residuos, ya que la acumulación de estos pueden formar emisiones gaseosas y líquidas que son tóxicas y por diversos factores que pueden afectar la salud humana principalmente, es por esta razón que se empiezan a trabajar en optar tecnologías de punta para ofrecer nuevas alternativas energéticas mediante el aprovechamiento de biogás generado en los rellenos sanitarios, Doña Juana de Bogotá, Magic Garden de San Andrés Isla, El Carrasco de Bucaramanga, entre otros esto rellenos sanitarios son ejemplo de esto. (Calvo, 2013)

2.1.1 Magic Garden, San Andrés. En el año de 2.013 se construyó una planta incineradora de biogás (ver Imagen N°1), para generar 1.5 MW con el objetivo de inyectar energía limpia generando luz y eliminando las 40 toneladas de basuras diarias que recibe el relleno sanitario buscando el beneficio para 17.000 usuarios, para el año mencionado esta planta no estaba en funcionamiento debido al mal manejo que se le daba a los residuos sólidos en el relleno¹⁸.

Ilustración 1. Planta incineradora de biogás.

¹⁸ CALVO, Marta. Colombia apuesta por los rellenos sanitarios para producir electricidad en línea tomado de <https://twenergy.com/co/a/colombia-apuesta-por-los-rellenos-sanitarios-para-producir-electricidad-960>



Fuente: CALVO, Marta. Colombia apuesta por los rellenos sanitarios para producir electricidad en línea tomado de <https://twenergy.com/co/a/colombia-apuesta-por-los-rellenos-sanitarios-para-producir-electricidad-960>

2.1.2 El carrasco, Bucaramanga. El relleno sanitario El Carrasco tiene un área de aproximadamente 93 hectáreas donde se reciben cerca de 800 toneladas diarias de desechos sólidos provenientes de 13 municipios, actualmente el relleno cuenta con una planta que produce cerca de 5 toneladas semanales de abono orgánico, una planta de tratamiento para los lixiviados y con un sistema de captura de biogás con un estimado de generación de biogás de 180 m³/h, el cual se espera sea aprovechado por una planta generadora de electricidad. (Llano Prades, 2014).

2.1.3 Doña Juana, Bogotá. En el año 2.010 el relleno sanitario Doña Juana implementa uno de los proyectos ambientales más importantes para el país, gracias al aprovechamiento del biogás generado por la descomposición anaeróbica orgánica de los residuos sólidos urbanos para la generación de energía eléctrica. Al relleno sanitario llegan diariamente cerca de 6.700 toneladas de RSU los cuales empiezan su proceso de degradación generando biogás y este a su vez va siendo captado y conducido a la planta de generación de energía (ver imagen N°2), la cual está estructurada en tres plantas.

- ✓ Central Doña Juana I: generando 5 MW desde el 2.016.
- ✓ Central Doña Juana II y III: se espera que para el 2.018 entren en operación cerca de 19,68 MW.

Con estos proyectos el relleno sanitario pretende reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, mejorar la calidad del aire a los alrededores del relleno sanitario evitando que entren 800.000 Ton aproximadamente de CO₂ a la atmósfera que mitigan los efectos del calentamiento global¹⁹.

¹⁹ Biogas Dona Juana S.A.E.S.P. (Biogas Doña Juana S.A.E.S.P.) (Colombia). [0]:

Ilustración 2. Ciclo de producción de energía a partir de biogás de relleno sanitario.



Fuente: RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA. Ciclo de producción de energía a partir de biogás de relleno sanitario. En línea tomado de: <https://biogas.com.co/#nuestra-generacion>.

2.2 SITUACIÓN ACTUAL DEL RELLENO SANITARIO

El relleno sanitario La Esmeralda (ver Imagen N° 3.) cuenta con aproximadamente 54 hectáreas de las cuales 11 son utilizadas para el almacenamiento de residuos sólidos urbanos y una zona de disposición activa a la cual entran 19 toneladas por hora de desechos, recolectando alrededor de 450 toneladas diarias provenientes de la ciudad de Manizales y 12 municipios pertenecientes al departamento de Caldas. Este relleno sanitario es del tipo mecanizado, ya que este tipo de relleno son aquellos que reciben más de 40 toneladas diarias y está estructurado de forma escalonada aislado mediante una lona polimérica compuesta por polietileno y 3 centímetros de caucho para aislar la humedad de los desechos sólidos. Los gases que allí se emanan son despedidos por unas chimeneas verticales que están hechas en piedra donde entran en contacto con una llama que queman los gases minimizando el impacto ambiental y evitando olores. (Barrera & Lasso).

Ilustración 3. Relleno Sanitario La Esmeralda, Manizales, Caldas.



Fuente: elaboración propia.

2.3 ESTADO ACTUAL DE LAS CHIMENEAS

El relleno sanitario cuenta con 116 chimeneas totales las cuales se encuentran distribuidas en diferentes zonas de la siguiente manera (ver tabla 3.): Zona Clausurada Terrazas Bajas, Zona Clausurada Bocatoma y Zona Activa y Cota Máxima con 32, 8 y 76 chimeneas respectivamente. Para el desarrollo del plan de muestreo se tiene en cuenta el geoposicionamiento de las chimeneas actualmente activas (ver imagen N°4) en la Cota Máxima, y el protocolo para el control y vigilancia de las emisiones atmosféricas generadas por fuentes fijas, este protocolo se basa en el Decreto 948 de 1995 de control y protección de la calidad del aire, donde describe un método de medición directa que se realiza de manera manual mediante instrumentos analizadores. Para efecto de lo que se busca evaluar en el presente trabajo se llevará a cabo una medición directa mediante un medidor multigas MAX XTII, este equipo mide las concentraciones de los contaminantes una vez entra en contacto directo con el gas, este instrumento monitorea la concentración de CO, H₂S en partes por millón (mg/m³), para llevar a cabo una medición directa se deben considerar las instalaciones seguras, que sean plataformas de muestreo adecuadas y de acceso seguro a estas.

Tabla 3 Número de chimeneas del relleno sanitario La Esmeralda.

	Zonas	N°
116 Chimeneas	Terrazas bajas	32
	Bocatoma	8

Tabla 3. (Continuación).

	Zonas	N°
	Zona activa y Cota máxima	76

Fuente: elaboración propia.

Ilustración 4. Chimeneas del relleno sanitario La Esmeralda.



Fuente: Elaboración propia.

2.4 PARÁMETROS DE ANÁLISIS

El objetivo de realizar este muestreo, es caracterizar el biogás que se genera en las chimeneas del relleno sanitario “La Esmeralda”. El biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), se analiza la concentración de metano contenido en el biogás, debido a que este será el producto de interés para la generación de energía alternativa, mediante la caracterización se pretende analizar la cantidad de sulfuro de hidrogeno en el biogás que se produce por la descomposición de los residuos sólidos, puesto que si el biogás contiene cantidades elevadas de este compuesto se debe realizar una purificación, puesto que estos gases presentan efectos corrosivos en equipos o maquinarias de generación de energía. Si se encuentran en cantidades mayores a $200\text{mg}/\text{Nm}^3$. Según reportes de análisis anteriores realizados en el relleno sanitario (ver Tabla N° 3 y Anexo A) el biogás que allí se genera está compuesto por hidrogeno, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, nitrógeno y metano.

Tabla 4. Análisis composicional de Relleno Sanitario La Esmeralda – Chimenea C12+

COMPONENTE	% MOLAR
------------	---------

H ₂	0,01
H ₂ S	0,02
CO ₂	41,47
N ₂	1,31
C ₁ METANO	57,19
C ₂ ETANO	0
C ₃ PROPANO	0
iC ₄ i-BUTANO	0
nC ₄ n-BUTANO	0
iC ₅ i-PENTANO	0
nC ₅ n-PENTANO	0
C ₆	0
C ₇	0
C ₈	0
C ₉	0
C ₁₀	0
C ₁₁	0
C ₁₂ ⁺	0

Fuente: MARTINEZ, Juan. Análisis Composicional de Gas; Rellenos sanitarios RFLA 1603114. Ago 31, p.11

2.5 CARACTERIZACIÓN DE BIOGÁS DE LAS CHIMENEAS

Para llevar a cabo el proceso de caracterización de las chimeneas en el relleno sanitario “La Esmeralda”, se toma como referencia el protocolo para el control y vigilancia de las emisiones atmosféricas generadas por fuentes fijas. Mediante un medidor multigas MAX XTII, este instrumento es ideal para realizar las mediciones manualmente, y mide directamente la concentración de los contaminantes una vez entra en contacto con el gas emanante de la chimenea.

2.5.1 Medidor multigas, funcionamiento. El medidor multigas MAX XTII (ver Anexo B), cumple con las siguientes características: sensor de CO, H₂S, O₂ y LEL (CH₄), detector portátil y alarma acústica de alta intensidad.

Los sensores están compuestos por un elemento transmisor y un sensor medidor real. El sensor de medición es el que determina las concentraciones de una sustancia (gas). Los principios de medición que manejan estos sensores son por valoración potenciométrica mediante sensores potenciométricos formados por electrodos combinados para la detección de gases, una vez el sensor entra en contacto con el gas se convierte en señal eléctrica hacia el transmisor.

Ilustración 5. Medidor Multigas MAX XTII



Fuente: elaboración propia.

2.6 PROTOCOLO DE MUESTREO

Se realiza como primera instancia una verificación del terreno donde se encuentran ubicadas las chimeneas teniendo en cuenta que este lugar sea seguro y adecuado para realizar el muestreo, se hace una visita al relleno sanitario junto con el Director de tesis, reconociendo el sitio y entendiendo los mecanismos y procesos que allí se manejan. Se procede a identificar, enumerar y evaluar las chimeneas que son objeto de experimentación, para la selección de estas chimeneas se tiene en cuenta el tiempo en el cual los desechos han estado en degradación y se comprueba que las chimeneas se encuentren activas en el momento de realizar el muestreo, se determinan 7 chimeneas aleatoriamente para realizar la respectiva caracterización las cuales cumplen con las condiciones requeridas.

2.6.1 Selección de chimeneas. La selección de chimeneas se realiza de manera aleatoria teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente mencionadas, las chimeneas objeto de experimentación deben cumplir con un periodo mínimo en el que se encuentren en estado de activación este periodo esta entre 1 a 7 años, tiempo en el cual los residuos sólidos se han estado descomponiendo y la generación de biogás empieza su etapa metano génica.

Primera selección, se identifican las chimeneas que visualmente son las que mayor cantidad de biogás emanan y su accesibilidad es adecuada dentro del terreno de la zona Cota Máxima, se determina que las chimeneas a seleccionar deben estar a una distancia aproximada de 3 a 5 metros una de la otra para tener resultados

promedios de concentraciones de gases de esta zona, finalmente y luego de la evaluación se escogen 7 chimeneas.

Al determinar que la primera toma de muestras no contemplaba adecuadamente los parámetros de análisis realiza un segundo muestreo.

La segunda selección de chimeneas se realiza en la Zona Activa, zona que demanda utilizar mayor protección personal y cuidado debido a que en este lugar existen chimeneas que están quemando gas metano constantemente y las temperaturas y concentraciones de biogás son altas, se seleccionan 5 chimeneas las cuales son seguras para trabajar en lapsos de tiempo cortos, estas chimeneas presentan características propias para realizar la medición del gas sulfuro de hidrogeno, ya que se puede sentir el olor característico a este.

Para la toma de muestras es importante tener en cuenta que en el momento de la realizar la actividad el día se encuentre seco, no se debe realizar en días lluviosos ya que las concentraciones reales del gas se pueden ver afectadas por este clima y el equipo de medición también.

2.6.2 Localización chimeneas, relleno sanitario de Manizales, Caldas. La ilustración 6 es el mapa, representación fotográfica del relleno sanitario de Manizales, Caldas La Esmeralda y la tabla 4 representa el sistema de coordenadas donde se identifica una aproximación de la ubicación de las chimeneas seleccionadas para realizar la respectiva caracterización y posterior purificación del biogás. La zona A del mapa representa la zona Activa y la zona B representa la zona Cota Máxima del relleno sanitario.

Ilustración 6. Mapa localización chimeneas Relleno Sanitario La Esmeralda.



Fuente: Google Earth (2018).

Tabla 5. Sistema de coordenadas, Relleno sanitario La Esmeralda

ID	ESTE	NORTE
B2	841.548	1.053.764
B1	841.553	1.053.778
B5	841.576	1.053.769
B6	841.586	1.053.769
B4	841.563	1.053.763
B7	841.617	1.053.766
B3	841.553	1.053.753
A5	841.565	1.053.825
A4	841.576	1.053.817
A3	841.575	1.053.807
A2	841.567	1.053.804
A1	841.559	1.053.806

Fuente: Magna Sirgas.

✓ Sistema de coordenadas

- ✓ Sistema: Magna Sirgas
- ✓ Proyección: Gauss Kruger
- ✓ Origen: Central

2.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

Tabla 6. Tabla de resultados obtenidos en Zona activa y Cota Máxima.

CHIMENEA	CO (ppm)	CH ₄ (LEL%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	UBICACIÓN
1	12	5	20.9	0	Cota Máxima
2	0	30	20.2	0	
3	0	28	20.3	0	
4	0	54	19.8	0	
5	0	56	20.3	0	
6	0	31	20.9	0	
7	0	38	19.6	0	
8	0	50	18.2	29	Zona Activa
9	0	57	18.0	200	
10	0	57	18.0	203	
11	0	57	18.1	200	
12	0	59	18,0	198	

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra que en la Zona de Cota Máxima las chimeneas no contenían concentraciones de sulfuro de hidrógeno, viendo la necesidad de ejecutar un segundo muestro en la Zona Activa, realizando muestreo a 5 chimeneas para un total de 12 chimeneas en evaluación (ver imagen 5.), equivalentes al 10% del total de las chimeneas con las que cuenta el relleno sanitario.

Se realizan 3 mediciones cada hora una medición por cada chimenea con el detector de gases para observar las variaciones de concentración de sulfato de hidrógeno respecto a las condiciones climáticas en donde se encuentra ubicado el relleno sanitario, arrojando siempre el mismo valor de concentración de H₂S (ppm).

La variabilidad de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno entre las dos zonas de experimentación se debe a la diferencia de tiempos en la que han estado los desechos en descomposición ya que en la fase de acidogénesis es donde se empiezan a formar los gases de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, y al buen tratamiento biológicos de lixiviados que maneja el relleno sanitario²⁰.

Ilustración 7. Chimeneas de experimentación.

²⁰ VARNERO MORENO, María Teresa. Manual de Biogás. Roma: D - FAO, 2011.



Fuente: elaboración propia.

3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE PURIFICACIÓN

De acuerdo al proceso realizado y datos obtenidos en la caracterización del biogás se procede a analizar las diferentes alternativas que se pueden usar para el proceso de purificación de biogás, escogiendo la que mejor se adapte para la remoción de sulfuro de hidrogeno que se encuentra contenido en las chimeneas de la Zona Activa del relleno sanitario La Esmeralda, para así determinar la viabilidad e implementar un proceso de aprovechamiento energético.

3.1 PROCESOS DE PURIFICACIÓN

La implementación de biogás como fuente de energía alternativa viene siendo estudiada en muchos países de América del Sur gracias a la gran cantidad energética que este contiene, con grandes similitudes a las características y composiciones del gas natural, este biogás se ha estado aprovechando en calefacción, combustible para automóviles, quemador para secado, y como energía eléctrica. Para hacer uso de este biogás y de alcanzar un mayor aprovechamiento energético a este se le debe realizar un proceso de purificación que tiene como objetivo incrementar el poder calórico del metano. A continuación, se describirán algunos procesos de purificación de biogás.

3.1.1 Método de adsorción. La adsorción es un fenómeno fisicoquímico donde intervienen los átomos o moléculas (adsorbato), de una sustancia que se encuentra en estado gaseoso o líquido las cuales son retenidas en la superficie de un sólido (adsorbente), proceso que también es llamado lecho seco²¹.

En los procesos de purificación de biogás el material fijo que se usa comúnmente como adsorbente son sólidos con superficies que contengan óxido de hierro, carbón activado impregnado de KI, óxido de zinc, sílicagel o tamices moleculares, donde se lleva a cabo el proceso de adsorción, en el cual las moléculas del adsorbato son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles dependiendo del medio que se use para la adsorción²². La reacción puede ser reversible o irreversible, presentando ventajas y desventajas para la implementación de este método, ver Tabla N°7. Si se emplea carbón activado, que contiene poros donde se realiza la reacción con el sulfuro de hidrogeno y el oxígeno, produce azufre y agua, este sulfuro de hidrogeno queda ocluido en los poros del carbón permitiendo que el biogás se purifique, pero si se desea usar el método de adsorción utilizando sílicagel este actuará como un indicador mostrando la saturación del adsorbente mediante el cambio de color²³.

Tabla 7. Ventajas y desventajas del método de adsorción.

²¹ ARELLANO-GARCIA,Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]:Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2017.

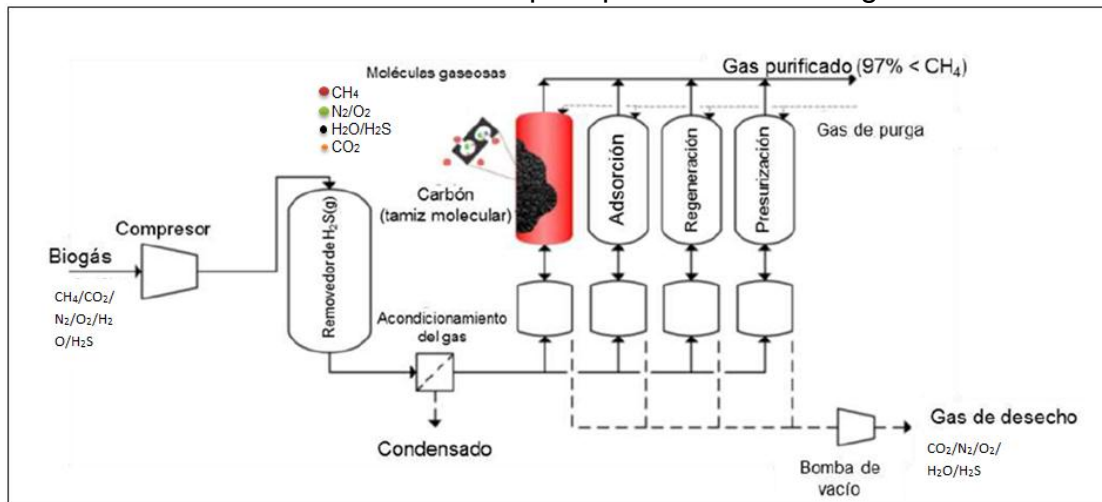
²² ORTEGA VIERA,Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1,.,vol. 36, no. 1, p. 45-56

²³ VARNERO,María T., et al. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. En: INFORMACIÓN TECNOLÓGICA. vol. 23, no. 2, p. 31-40

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia, tasa de purificación del > 95%.	Inversión y operación costosa.
Estabilidad térmica del biogás. (50 – 70°C)	Regeneración a 450°C.
Elevada selectividad.	Limitaciones de su aplicación.
Temperaturas de operación bajas. (25 – 70°C)	Regeneración con agua.
Alta capacidad de carga.	Grandes volúmenes de material granulado.

Fuente: ARELLANO, Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]: Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2017.

Ilustración 8. Método de adsorción para purificación de biogás.



Fuente: MARTINEZ, Alfonso and EMREQUI, Felix. Propuesta del sistema para la purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural. Jun. p.104

3.1.2 Método de absorción. La absorción es un proceso en el cual los componentes de un gas son disueltos en un medio líquido, que posee propiedades selectivas con afinidad a estos, que se quieren extraer logrando la recuperación de un componente valioso de una mezcla gaseosa²⁴. Este método es utilizado en la purificación de gases que contiene un componente a recuperar. Este gas entra por la parte inferior de una columna de absorción mientras que por gravedad cae una corriente del líquido llamado “absorbedor”, entrando en contacto las dos sustancias generando una reacción que por selectividad se asocian permitiendo la purificación del gas ver ilustración N° 9.

²⁴ ORTEGA VIERA, Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1, vol. 36, no. 1, p. 45-56

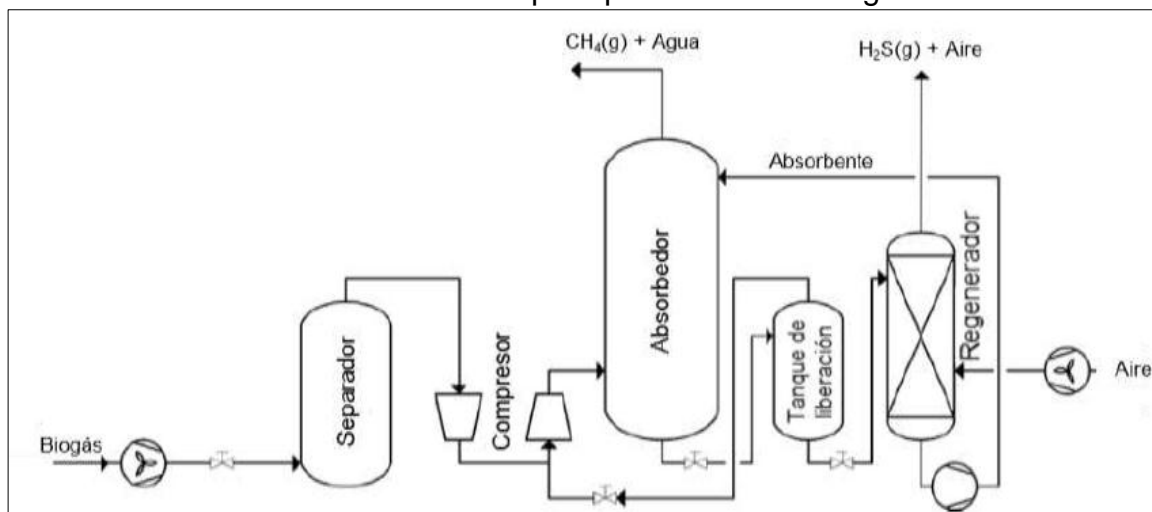
En los procesos de purificación de biogás por medio de columnas que contiene limadura de hierro y aserrín húmedo trabajando a varias presiones se ha permitido que la absorción del H_2S sea eficiente, esta variación de presiones permite una remoción mayor de sulfuro de hidrogeno. Si se desea eliminar concentraciones altas de H_2S los costos de mantenimiento y mano de obra son elevados (ver tabla N°6), debido a que requiere grandes cantidades limadura de hierro y este es un producto de difícil adquisición y elevado precio. (Sanata Fernandez & Montalvo Martinez)

Tabla 8. Ventajas y desventajas del método de absorción.

Ventajas	Desventajas
Infraestructura sencilla ²⁵ .	Dificultad técnica.
Demanda baja de electricidad.	No regenerativa.
Alta eficiencia de eliminación de H_2S 95 – 100% ²⁶ .	Operaciones costosas.

Fuente: ARELLANO,Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]:Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2017.

Ilustración 9. Método de absorción para purificación de biogás.



Fuente: MARTINEZ,Alfonso and EMREQUI,Felix. Propuesta del sistema para la purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural. Jun. p.104

²⁵ VALERIO GARCIA,maria alejandra. diseño y evaluación de un sistema para la purificación del metano producido mediante biodigestión en el itcr.

²⁶ ARELLANO-GARCIA,Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]:Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2017.

3.1.3 Método biológico. Los procesos biológicos para purificación de biogás son sistemas que usan materiales orgánicos para la eliminación de compuestos contaminantes de una corriente de aire el cual es el fluido a tratar. El aire contaminado pasa a través de los macroporos del material filtrante los microorganismos presentes en la superficie degradan los contaminantes del gas depurando versátilmente el biogás y con en todos los procesos siempre se consideran las ventajas y desventajas de estos, ver tabla N° 7.

Los materiales más utilizados en los biofiltros para la desulfuración del biogás son: bagazo de caña de azúcar, aserrín, microorganismos como *Thiobacillus Ferrooxidans*, *Methylobacterium*, *Paracoccus Pseudomonas*, *Starkeya*, *Sulfolobus* y anaerobios como *Allochromatium*, *Chlorobium*, *Rhodopseudomonas*, *Rhodovulum* y *Thiocapsa* los cuales convierten el H₂S en azufre elemental, piedra pómez, carbón vegetal, arena, limadura de hierro, entre otros materiales orgánicos.

3.1.3.1 Tipo de biofiltros

- ✓ **Biofiltro de lecho fijo:** Este tipo de biofiltros están compuestos por materiales filtrantes orgánicos, estos compuestos orgánicos actúan como fuente nutricional que permiten el crecimiento de microorganismos. Su funcionamiento consiste en hacer pasar mediante el biofiltro un fluido gaseoso el cual lleva consigo contaminantes que serán degradados por los microorganismos.
- ✓ **Biofiltro de lecho escurrido:** Este biofiltro se basa en el principio de una columna empacada a la cual se le suministra un fluido gaseoso el cual contiene las impurezas deseadas a retirar y se inyecta una corriente líquida la cual, retira los productos de degradación.
- ✓ **Biolavador:** El proceso de los biolavadores consiste en hacer fluir el gas contaminado a contracorriente por un líquido donde son absorbidos los contaminantes, una vez termina esta etapa el líquido es llevado a un reactor empacado el cual se encarga de degradar los contaminantes.

Tabla 9. Ventajas y desventajas del método biológico.

Ventajas	Desventajas
Eficiencia de eliminación de H ₂ S > 97% ²⁷ .	Tiempo de vida, corto por saturación del material orgánico.
Requerimientos de energía bajos.	Es un proceso lento.
Bajos costos de aplicación y fácil accesibilidad ²⁸ .	
Poca generación de problemas ambientales.	
Utilización como abono de suelo.	
No provoca pérdida en el poder calórico de la sustancia tratada.	

Fuente: ARELLANO,Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]:Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2017.

3.1.4 Método de purificación por membrana. Los procesos que involucran el métodos de purificación de biogás por membrana (ilustración N°10) consisten en el paso del biogás por los poros que contienen las membranas mediante la diferencia de presiones, estas membranas por lo general están formadas por diferentes materiales que se clasifican en poliméricos, inorgánicos, cerámicos y compuestos, que entre ellos varía la acción de permeabilidad factor de mayor importancia en la separación de gases ya que esto determina la solubilidad y difusión de los componentes gaseosos a filtrar, ventajas y desventajas (ver tabla N°9). Las membranas tienen poros muy pequeños lo que hace que se necesiten de presiones muy altas para hacer pasar el biogás por medio de ellos.

- ✓ **Tipos de separación por membrana:** Los tipos de separación por membrana están determinados por el tamaño del poro ya que, dependiendo de este deja pasar o retiene el fluido en separación, dependiendo del tamaño del poro existen varias clases de filtración que se describen continuación:

Filtración: Este tipo tiene un diámetro de poros de más de 104 nm.

Microfiltración: Poros de 102 a 104 nm.

Ultrafiltración: Contiene poros de 1 a 102 nm.

Osmosis inversa: maneja membranas con poros menores a 1 nm de diámetro²⁹.

Tabla 10. Ventajas y desventajas del método por separación de membrana.

Ventajas	Desventajas
----------	-------------

²⁷ ARELLANO-GARCIA,Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]:Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2017.

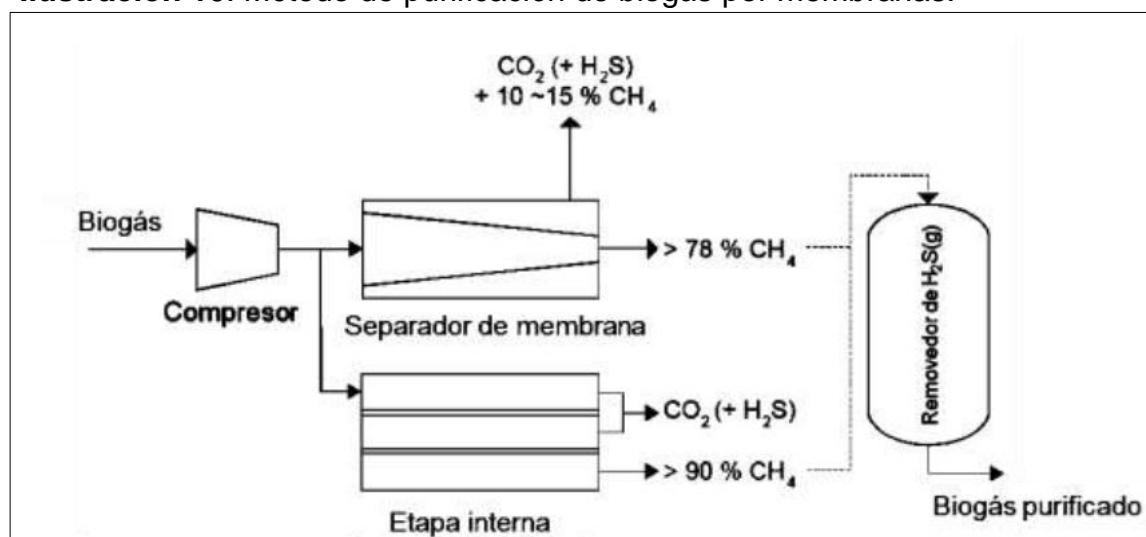
²⁸ ORTEGA VIERA,Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1,.,vol. 36, no. 1, p. 45-56

²⁹ ORTEGA VIERA,Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1,.,vol. 36, no. 1, p. 45-56

Eliminación mayor al 98% de H_2S^{30} .	Son frágiles.
Método en el cual el proceso puede ser continuo.	Son ideales para separación de sustancias gaseosas a escalas pequeñas.
No requiere de sustancias químicas adicionales.	Son de elevados costos.
Se ajustan a las necesidades de purificación.	Manejan presiones altas.
Control en las dimensiones de los poros.	Saturación de las membranas alto.
Resistencia a sustancias químicas.	Tiempo de vida útil corto.
Resistencia mecánica a las diferencias de presiones.	
Bajo impacto ambiental.	

Fuente: VARNERO, María T., et al. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. En: INFORMACIÓN TECNOLÓGICA. vol. 23, no. 2, p. 31-40

Ilustración 10. Método de purificación de biogás por membranas.



Fuente: MARTINEZ, Alfonso and EMREQUI, Felix. Propuesta del sistema para la purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural. Jun.p. 104

3.2 SELECCIÓN PROCESO DE PURIFICACIÓN

³⁰ ARELLANO-GARCIA, Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]:Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 2017.

De acuerdo a la bibliografía encontrada se hace una evaluación de la mejor alternativa y del método más adecuado para la purificación de biogás en el relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales, esta selección se realizará por medio de una matriz de selección.

La matriz de selección que se implementa se basa en la herramienta de gestión y control de proyectos (matriz de priorización) usada para tomar decisiones mediante una serie de criterios que se relacionan entre sí³¹.

Para la ejecución de la matriz se deben priorizar y ponderar cada una de las características de las alternativas que involucran los criterios de evaluación obteniendo una puntuación que ayudará a determinar la viabilidad de las alternativas.

3.2.1 Alternativas de tratamiento de purificación. Para la selección del método de purificación se tendrán en cuenta los siguientes criterios de evaluación: construcción y diseño, operación, eficiencia y costo, criterios que reúnen las características generales importantes para la ejecución de un sistema de purificación, los cuales se valoran mediante una escala numérica que representa una calificación de 1 a 4 donde:

- ✓ Deficiente 1
- ✓ Malo 2
- ✓ Bueno 3
- ✓ Excelente. 4

En el apartado 3.1 se realiza descripción entre los diferentes posibles tratamientos de purificación de biogás especificando sus ventajas y desventajas las cuales servirán de guía para darle una calificación a cada alternativa.

3.2.1.1 Criterios de evaluación

- ✓ **Construcción y diseño:** Para evaluar este criterio se tendrá en cuenta el tiempo, los materiales y el diseño para la construcción de los diferentes sistemas de purificación para cada una de las alternativas.

Tabla 11. Características de construcción y diseño para cada alternativa

ALTERNATIVA	OBSERVACIÓN	CALIFICACIÓN
-------------	-------------	--------------

³¹ MARTIN, Juan. ¿QUÉ ES Y COMO HACER UNA MATRIZ DE PRIORIZACIÓN?

Adsorción.	Para esta alternativa los materiales y reactivos que se usan principalmente son: KI, óxido de zinc, óxido de hierro ³² , tamices moleculares ³³ , carbón activado, compresor, columna de regeneración. ³⁴	2
Absorción.	Para llevar a cabo el proceso de absorción se utilizan, soluciones de aminas, hidróxido de potasio, hidróxido de sodio, etilenglicol, agua, limallas de hierro, torres empacadas ³⁵ , tanques de regeneración.	1
Separación por membrana.	En la separación por membranas se emplea generalmente vidrio de borosilicato, óxido de zinc, carbón vegetal, etilenglicol, compresor, separador, removedor de sulfuro de hidrogeno. ³⁶	2
Biológica.	En el tratamiento biológico se usan materiales orgánicos como: cascara de coco, bagazo de caña de azúcar ³⁷ , aserrín, carbón vegetal, carbón activado, abono, biofiltros ³⁸ y compresor.	4

Fuente: MARIN MARIN, Mirella Lucia. Purificación biológica de biogás. Universidad de Chile. en línea tomado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112383>

- ✓ **OPERACIÓN.** En este criterio de evaluación se tendrá en cuenta los procesos de operación que se llevan a cabo en cada una de las alternativas, las condiciones de operación, el mantenimiento que se requiera, generación y disposición de productos/subproductos e impactos ambientales.

³² MORERO, Betzabet Del Valle. Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. [0]:2014.

³³ STAUDT, REINER. Purificación de biogás por adsorción y novedosos sistemas de depuración.

³⁴ MARIN MARIN, Mirella Lucia. Purificación biológica de biogás. Universidad de Chile,

³⁵ MORERO, Betzabet Del Valle. Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. [0]:2014.

³⁶ ORTEGA VIERA, Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1, vol. 36, no. 1, p. 45-56

³⁷ CHÁVEZ, Carlos, et al. Desarrollo de un inóculo microbiano empleando lodos activados para la remoción de ácido sulfhídrico (H₂S) mediante biofiltración. En: REVISTA COLOMBIANA DE BIOTECNOLOGÍA. vol. 7, no. 2, p. 26-34

³⁸ ELIZONDO, Ana; HERRERA, Eduardo, Evaluación de medios filtrantes para la reducción de sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás. 2012. p.6.

Tabla 12. Características de operación para cada alternativa.

ALTERNATIVA	OBSERVACIÓN	CALIFICACIÓN
Adsorción.	La operación de este método puede llegar a operar a presiones de hasta 690 kPa, regeneración del adsorbente, procesos altamente químicos, generación de residuos peligrosos, temperatura de alimentación.	2
Absorción.	En la operación de purificación de biogás de la alternativa 2 maneja presiones muy altas cercanas a los 1700 kPa ³⁹ , se requiere de regeneración del material absorbente, las pérdidas de metano con bajas, presenta problemas de corrosión, generación de residuos peligrosos, formación de espumas	1
Separación por membrana.	El consumo de energía en la implementación de esta alternativa es bajo, no requiere incluir sustancias químicas en su proceso, el tiempo de vida útil de las membranas son cortos, se presenta baja selectividad, las membranas son frágiles, es adecuado para operar a nivel laboratorio o escala piloto.	3
Biológica.	Los procesos biológicos operan a moderadas temperaturas entre 20 a 28°C y condiciones ambientales, proceso lento, los equipos que intervienen son simples, alta especificidad respecto al sustrato a remover, no genera sustancias peligrosas.	4

Fuente: MARIN MARIN, Mirella Lucia. Purificación biológica de biogás. Universidad de Chile. en línea tomado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112383>

- ✓ **EFICIENCIA.** Para evaluar la eficiencia de las diferentes alternativas planteadas que relacionan los métodos de purificación de biogás se dará valor a los rangos de eliminación de H₂S principal impureza del biogás.

Tabla 13. Calificación según el rango de eliminación de H₂S.

NIVEL	CALIFICACIÓN	RANGO DE ELIMINACIÓN
Deficiente	1	Menos al 50%
Malo	2	50% - 70%

³⁹ ALFONSO., F, Propuesta del sistema para la purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural. 2016. P.21.

Bueno	3	71 – 95 %
Excelente	4	96% - 100%

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Características de eficiencia para cada alternativa.

ALTERNATIVA	OBSERVACIÓN	CALIFICACIÓN
Adsorción.	Alta eficiencia de purificación mayor a 98% \forall v.	4
Absorción.	Alta eficiencia de purificación mayor a 98% \forall v.	4
Separación por membrana.	Este método de purificación consigue remociones de H ₂ S hasta del 95% \forall v.	3
Biológica.	Los métodos biológicos de purificación de biogás son muy eficientes en la eliminación de H₂S alcanzando un 99%.	4

Fuente: MARIN MARIN, Mirella Lucia. Purificación biológica de biogás. Universidad de Chile. en línea tomado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112383>

Para evaluar y calificar cada una de las alternativas propuestas que relacionan los diferentes métodos de purificación de biogás, se tuvo en cuenta los aspectos que la empresa EMAS S.A requiere, adicional a esto, se realiza una revisión bibliográfica detallada para seleccionar la mejor alternativa y dar paso a la experimentación a nivel de laboratorio de la purificación de biogás en el relleno sanitario “La Esmeralda”.

- ✓ **Costos.** En la tabla 16 se relacionan costos tanto cuantitativos y en las tablas de ventajas y desventajas de las diferentes alternativas se evidencian costos cualitativos para los métodos de purificación, costos tomados de fuentes bibliográficas como guía para la selección del sistema de purificación del presente proyecto. los valores que se relacionan a continuación están dados en euros por metros cúbicos de biogás purificado.

Tabla 15. Clasificación según el rango de coste por m³ de biogás.

NIVEL	CALIFICACIÓN	COSTO DE PURIFICACIÓN POR m ³
Deficiente	1	> 1
Malo	2	0.9 – 0.1

Bueno	3	0.09 - 0.01
Excelente	4	< 0.009

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Costes de las diferentes alternativas de purificación.

ALTERNATIVA	OBSERVACIÓN	CALIFICACIÓN
Adsorción.	0.1	2
Absorción.	0.01	3
Separación por membranas.	0.08	3
Biológica.	0.004	4

Fuente: LLANEZA HERMINIO, María Antonia; GONZALES, Lola and GONZALES, Elisabet. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Mar 31, .p. 16-27

3.2.2 Matriz de selección mejor alternativa para purificación de biogás. Con esta matriz se busca seleccionar la alternativa más adecuada mediante un ponderado que se le dará a cada una de las alternativas.

De acuerdo a los criterios establecidos se les asigna una escala porcentual que involucra la importancia a la hora de implementar un sistema de purificación de biogás permitiendo determinar o elegir una alternativa, la mayor escala porcentual es para el criterio que relaciona la eficiencia ya que este es la base fundamental del tratamiento del biogás.

Tabla 17. Matriz de selección mejor alternativa para purificación de biogás.

MATRIZ DE SELECCIÓN - PURIFICACIÓN DE BIOGÁS					
MÉTODOS DE PURIFICACIÓN		CRITERIOS	%	CALIFICACIÓN	PONDERADO
		Adsorción.	EFICIENCIA	50%	4
COSTO	20%		2	0,4	
CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO	15%		2	0,3	
OPERACION	15%		2	0,3	
TOTAL			100%	3	
Absorción.	EFICIENCIA	50%	4	2	
	COSTO	20%	3	0,6	
	OPERACIÓN	15%	1	0,15	
	CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO	15%	1	0,15	

Tabla17 (Continuación)

		TOTAL		100%	2,9
Separación por membrana.	EFICIENCIA	50%	3	1,5	
	COSTO	20%	3	0,6	
	OPERACIÓN	15%	3	0,45	
	CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO	15%	2	0,3	

	TOTAL		100%	2,85
Biológica.	EFICIENCIA	50%	4	2
	COSTO	20%	4	0,8
	OPERACIÓN	15%	4	0,6
	CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO	15%	4	0,6
	TOTAL		100%	4

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la matriz de selección desarrollada se considera que la mejor alternativa para llevar a cabo el proceso de purificación de biogás es el número 4, la cual arroja mayor puntuación en la ponderación. Luego de evaluar cada uno de los criterios en los diferentes métodos de purificación donde se contempló el diseño y construcción, eficiencia y operación. La alternativa escogida se refiere el método de purificación biológico que trata de biofiltros rellenos de materiales orgánicos de fácil acceso, tiene una alta eficiencia de eliminación de H₂S, bajos costos de operación e inversión, la disposición del material filtrante sirve como abono para los suelos, no genera ni usa sustancias químicas para su proceso. Este método cuenta con los requerimientos establecidos por la empresa EMAS S.A en cuanto inversión de la presente evaluación.

3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se procede a elaborar un sistema de biofiltración de acuerdo a los resultados de la matriz de selección, el cual consta de dos biofiltros que están rellenos de materiales orgánicos que por sus propiedades fisicoquímicas logran reducciones de H₂S y no generan residuos peligrosos, Los biofiltros están construidos por:

3.3.1 Biofiltros. Son sistemas biológicos que usan compuestos orgánicos que permiten la eliminación de varios compuestos que pueden estar en estado líquido o gaseoso de una corriente. Los biofiltros usan generalmente materiales filtrantes como rocas porosas, tierra, trozos de madera, residuos orgánicos como cáscaras de cacahuate, de arroz o de coco, fibra de caña de azúcar, entre otros. Para efectos de este proyecto el fluido a tratar será una corriente de gaseosa generada por la descomposición de los residuos sólidos urbanos del departamento de Caldas, Manizales.

- ✓ **Manguera transparente de una pulgada de diámetro y 5m de largo.** Es una manguera de PVC transparente, resistente al vacío, la presión y temperaturas de entre -20°C a 60°C, el tipo de material del que está hecho la manguera lo hace resistente a la corrosión haciéndolo adecuado para transportar el biogás emanante en de las chimeneas del relleno sanitario de Manizales, debido a que este está compuesto por sulfuro de hidrogeno el cual presenta efectos corrosivos, además la flexibilidad de este tipo de

manguera es precisa para trabajar en áreas rocosas como las zona donde se encuentran las chimeneas.

Ilustración 11. Manguera PVC transparente.



Fuente: COPLASTIC. Tubería PVC., España. en línea tomado de <http://www.coplastic.es/categorias/tubo-pvc-transparente/5>

- ✓ **Cáscara de coco.** La cáscara de coco, presenta altos contenidos de lignina haciendo que este tenga un nivel de descomposición bajo, presenta un volumen de porosidad entre 80 y 82% total y su densidad aparente esta entre 0,08 – 0,12 kg/m³⁴⁰. La cáscara de coco ayuda a eliminar la humedad presente en el biogás gracias a la capilaridad que este sustrato tiene y permite una distribución mayor del agua por medio de las fibras contenidas en la cáscara de coco siendo retenida en sus poros, esta acción evita que el sulfuro de hidrogeno que esté presente en el biogás reaccione con el agua produciendo ácido sulfúrico, es por esta razón que durante la purificación del biogás es importante que el primer contacto que tenga el biogás debe ser con la cáscara de coco. Estas características hacen de este un sustrato ideal para el desarrollo de esta práctica⁴¹.

Ilustración 12. Cascara de coco.

⁴⁰ CALDERON, Saenz.; CEVALLOS, Francisco., Los sustratos. En Drcalderonlabs. Bogota D.C., en línea tomado de http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm.

⁴¹ QUINTERO, Eliozondo; HERRERA, Ana. And NAPOLEÓN, Eduardo. evaluación de medio filtrantes para la reducción de sulfuro de hidrogeno en el mejoramiento de la calidad el biogás. En: Bdigital. Honduras. p.31-36



Fuente: CÁSCARA DE COCO. En MillenimsoilsCoir. Canadá. En línea tomada de http://spanish.vgrove.com/index.php?p=Coconut_Husk_Chips

- ✓ **Aserrín.** El aserrín es el residuo resultante de la devastación de la madera mediante herramientas de filos, contiene una densidad aparente de 0.3 Kg/m^3 , porosidad total de 75 a 90%, el cual será usado como un medio filtrante permitiendo absorber la humedad que no fue posible retener en la cascara de coco⁴².

Ilustración 13. Aserrín.



Fuente: MERCADO LIBRE. Artículos. En línea tomado de https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-461781925-aserrin-de-cedro-x-bulto-10-kilos-para-cultivo-_JM

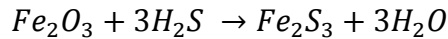
- ✓ **Piedra pómez.** La piedra pómez es una roca volcánica muy porosa de color gris con superficie abrasiva, con porosidad total de 75%, buena capilaridad y densidad aparente de 0,6 a 0,8 kg/m^3 ⁴³. Composición química⁴⁴ 71% de Sílice (SiO_2); 12.8% de Aluminio (Al_2O_3); 1.75% de Hierro (Fe_2O_3); 1.36% de Calcio (CaO); 3.23% de Sodio (Na_2O); 3.83% de Potasio (K_2). Al entrar en contacto el sulfuro de hidrógeno con los óxidos de hierro reacciona produciendo sulfuro de hierro como muestra la ecuación (5) que están presente en la piedra pómez. (Arellano, y otros, 2017).

⁴² CALDERON, Saenz.; CEVALLOS, Francisco., Los sustratos. En Drcalderonlabs. Bogota D.C., en línea tomado de http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm.

⁴³ CALDERON, Saenz.; CEVALLOS, Francisco., Los sustratos. Op cit.

⁴⁴ ROCAS Y MINERALES. Piedra Pomez en: <https://www.rocasym minerales.net/piedra-pomez/>

Ecuación 5 Reacción de retención de sulfuro de hidrogeno.



El sulfuro de hierro una vez entra en contacto con el oxígeno del aire se oxida (Ver ecuación (6)) generando nuevamente Fe_2O_3 el cual puede ser devuelto al ambiente sin ninguna afectación.

Ecuación 6 reacción de sulfuro de hierro y oxigeno

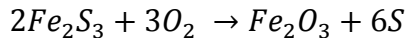


Ilustración 14. Piedra pómez.



Fuente: PIEDRA PÓMEZ. Rocas y minerales. en línea tomado de <https://www.rocasym minerales.net/piedra-pomez/>

- ✓ **Carbón vegetal.** El carbón vegetal es un residuo sólido vegetal que se obtiene al calentar la madera, con densidad aparente de $0,6 \text{ kg/m}^3$, porosidad de 65 a 80%, mala capilaridad y una excelente calidad biológica⁴⁵. El carbón es la materia prima que más se emplea en la eliminación de H_2S por la alta eficiencia ($>95\%$) (Arellano, y otros, 2017) que presenta, ya que los poros del carbón son los sitios adecuados donde se adsorbe físicamente el sulfuro de hidrogeno y trazas de CO_2 ⁴⁶.

Ilustración 15. Carbón Vegetal.

⁴⁵ CALDERON, Saenz.; CEVALLOS, Francisco., Los sustratos. En Drcalderonlabs. Bogota D.C., en línea tomado de http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm.

⁴⁶ MORERO, Betzabet Del Valle. Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. [0]:2014.

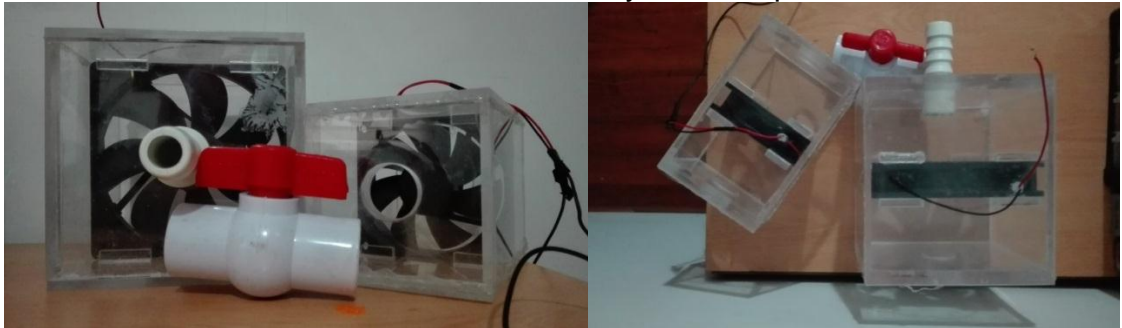


Fuente: CARBON VEGETAL. En: guardián de la salud. En línea tomado de <http://www.guardiansalud.cl/carbon-vegetal-aliado-nuestra-salud/>

- ✓ **Extractores, válvula tipo bola y batería recargable.** Se fabrican dos extractores caseros los a cuáles ayudan a succionar el biogás que sales de las chimeneas del relleno sanitario haciendo que este pase a través de los biofiltros para ser purificado. Se construye en materiales que no se vean afectados por la corrosión que pueda causar el H₂S que este contenido en el biogás.

Se adapta una válvula tipo bola de PVC la cual permitirá el paso del biogás al sistema de filtración y será accionado en caso de que se necesite realizar un cierre de paso del fluido en caso de emergencia, la válvula tipo bola proporciona una operación rápida para su manipulación.

Ilustración 16. Ventilador Extractor casero y válvula tipo bola.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 17. Batería recargable.



Fuente: elaboración propia.

La batería recargable se utiliza para dar energía a los extractores caseros en las zonas donde se encontraban ubicadas las chimeneas.

Ilustración 18. Sistema de biofiltración para remoción de H₂S.

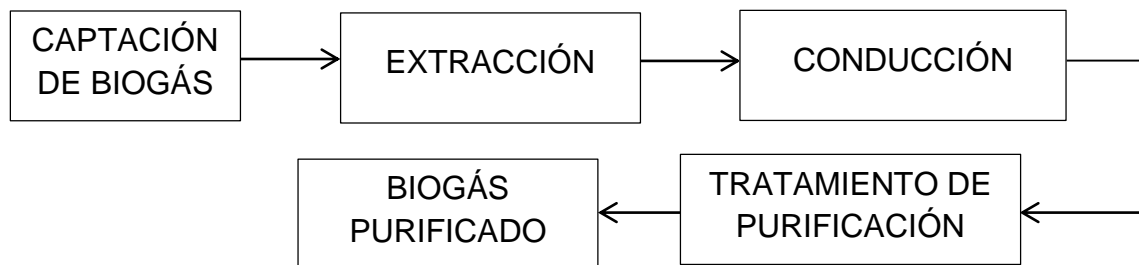


Fuente: elaboración propia.

Este sistema de purificación está dividido por dos filtros, contiene dentro de la manguera cascara de coco, aserrín con piedra pómez y carbón vegetal unido con una válvula de bola que permite el paso gradual del biogás a un segundo filtro relleno de los mismos materiales que el primero. Estos materiales se caracterizan por su alta capacidad de porosidad y porcentajes elevados de calcio y hierro. El carbón vegetal además de su porosidad presenta una mala capilaridad evitando que se pueda saturar de agua permitiendo el paso de metano y removiendo el sulfuro de hidrogeno por adsorción física facilitando una mejor depuración del biogás, este sistema se acompaña de una bomba de succión de aire, debido a que, el gas por sí solo no sería lo suficientemente fuerte para pasar a través del sistema de purificación.

Se espera que con este sistema se tenga una eficiencia de remoción del 95% de sulfuro de hidrogeno, de acuerdo a lo consultado en la bibliografía.

3.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE PURIFICACIÓN



Fuente: elaboración propia.

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN.

Una vez realizada la caracterización composicional del biogás, se pone en marcha el desarrollo experimental para evaluar el funcionamiento del sistema de biofiltración para la eliminación de sulfuro de hidrogeno, con cada una de las chimeneas analizadas de la Zona Activa.

Tabla 18. Resultados de eliminación de sulfuro de hidrogeno.

CHIMENEA	CONCENTRACIÓN INICIAL	CANTIDAD RETENIDA	UBICACIÓN
	H ₂ S (ppm)	H ₂ S (ppm)	
8	29	29	Zona Activa
9	200	193	
10	203	196	
11	200	189	
12	198	191	

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los datos obtenidos en la caracterización del biogás de las chimeneas de la zona activa se realiza una comparación de la concentración inicial de estas y la concentración final emitida por la cantidad de H₂S retenido al pasar el biogás por el sistema de purificación construido para el desarrollo de la práctica.

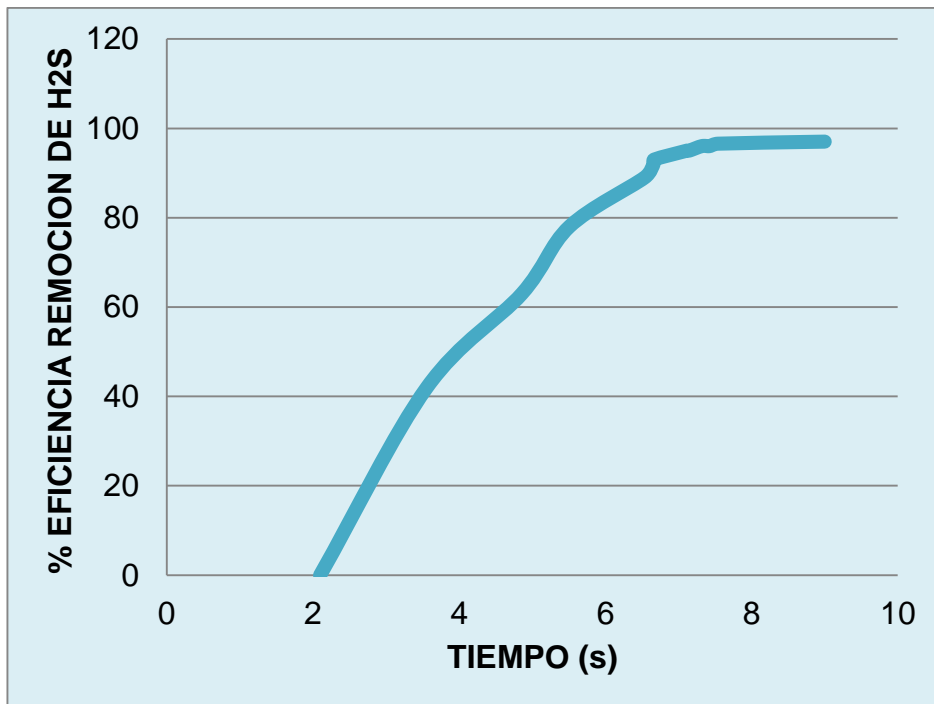
Se determina que el sistema de purificación del biogás tiene una eficiencia de remoción mínimo del 94.5% y un valor máximo de 100% de eliminación de sulfuro de hidrogeno, también se evidencia una pérdida mínima de metano al paso por los biofiltros del sistema de purificación.

Tabla 19. Tiempos de residencia, remoción de H₂S.

EFICIENCIA PROMEDIO DE REMOCIÓN. (%)	TIEMPO DE RESIDENCIA. (s)
0	2.10
42	3.56
63	4.86
78	5.51
95	7.12

Fuente: elaboración Propia.

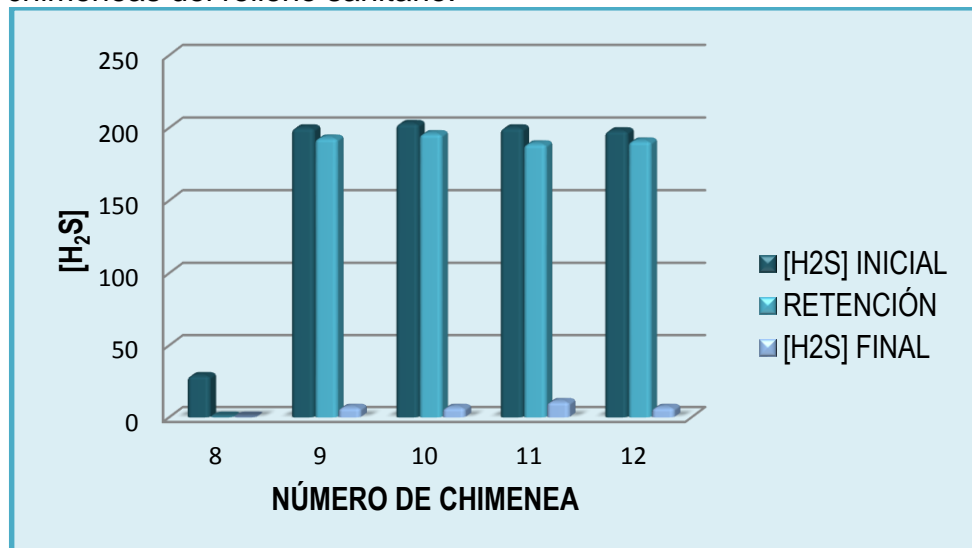
Grafica 1 Tiempo de residencia para eficiencia de remoción de H₂S



Fuente: elaboración propia

Se toman diferentes tiempos del paso del biogás a través de los biofiltros para determinar un tiempo constante y al cual se obtenga mayor eficiencia de remoción del sulfuro de hidrógeno. La gráfica 1 muestra que durante los 7 y 9 segundos en que demora pasar el biogás se puede tener una retención de H₂S cerca al 95%.

Gráfica 2 Relación de sulfuro de hidrógeno inicial y final en el biogás de las chimeneas del relleno sanitario.



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la fase experimental se determina que el sistema de purificación seleccionado que, emplea un método biológico para la eliminación de sulfuro de hidrogeno tiene una eficiencia promedio de remoción de H₂S de 96,80%, con desviación de 0,2066% comparado con el proyecto que se realizó en Honduras en el año 2012 por Elizondo, A y Herrera, E.

Los tiempos de residencia obtenidos durante el paso de flujo de biogás por los biofiltros son apropiados para los resultados conseguidos en la retención del sulfuro de hidrogeno ya que se esperaba que a los 7 segundos del paso del gas se eliminada el 95%.

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

4.1 PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS.

El aprovechamiento de biogás en los rellenos sanitarios ha venido avanzado alrededor del mundo donde se realizan estudios para evaluar la viabilidad de empezar a utilizar energías renovables. Es necesario conocer la proyección de generación de biogás que se podría tener en un relleno sanitario y así estimar la cantidad de energía que se puede generar, para realización del presente proyecto se proyectará la cantidad de biogás que se generaría hasta el año de clausura del relleno sanitario “La Esmeralda”.

Para estimar la velocidad de generación de biogás en los rellenos sanitarios es posible calcularla mediante modelos matemáticos que relacionan variables físico-químicas, constantes de degradación biológica y tiene en cuenta factores climáticos del sitio de disposición.

4.2 PROYECCIÓN DE METANO, MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS

Para desarrollar la estimación de metano en el relleno sanitario “La Esmeralda” se tendrá en cuenta el Modelo Colombiano de Biogás V 1.0⁴⁷, el cual se basa en la estructura de modelo IPCC con modificaciones de acuerdo a las condiciones climáticas y sitios de disposición final en Colombia. Este modelo provee valores como:

✓ El índice de generación de metano (k), este índice toma en cuenta los siguientes factores

- 1). Contenido de humedad en los residuos, los cuales se estiman en función de la precipitación anual de la ciudad de Manizales.
- 2). Disponibilidad de nutrientes que se encuentran determinadas por la cantidad de residuos sólidos orgánicos, de acuerdo a su índice de degradación que se evalúa según las siguientes categorías.

Tabla 20. Categorías de degradación de residuos sólidos urbanos.

CATEGORÍAS	DEGRADACIÓN	TIPOS DE RESIDUO
I	Muy rápida.	Alimenticios.
II	Moderadamente rápida.	Vegetales, césped, papel higiénico.
III	Moderadamente lenta.	Papel, cartón, textil.

Tabla 20 (continuación).

⁴⁷ LUDWIG,Victoria. MANUAL DEL USUARIO MODELO COLOMBIANO DE BIOGAS.

IV	Muy lenta.	Madera, cauchos, huesos, paja.
----	------------	--------------------------------

Fuente: SCHMIDT, Felix., valoración del biogás en un relleno sanitario. Suiza. Oct.10. p. 2-7

3). Temperatura, la cual es constante gracias al calor generado por las bacterias anaeróbicas que llevan a cabo todo el proceso de fermentación.

Así mismo los valores que la variable k (índice de generación de metano) puede tomar según los datos anuales de precipitación anual son los siguientes:

Tabla 21. Índices de generación de metano (k).

PRECIPITACIÓN ANUAL (mm/Año).	k (Año ⁻¹)
0-249	0.040
250- 499	0.050
500-999	0.065
>1000	0.080

Fuente: STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Sep 2009. V 1.0. p.5

La temperatura media de la ciudad de Manizales se encuentra en un promedio anual de 27.6°C y con una precipitación de 2000 a 2500 mm al año (ver Anexo C), de acuerdo a esto el valor del índice de generación de metano, k toma un valor igual a 0,080 1/año.

- ✓ Generación potencial de metano (Lo), representa la cantidad total de gas metano potencialmente producido por tonelada de residuo, para una precipitación mayor a 500mm/Año (ver tabla N°18), se usa un valor igual a 84 m³/Ton.

Tabla 22. Valores para el potencial de metano.

PRECIPITACIÓN ANUAL (mm/Año).	Lo (m ³ /Ton)
0-249	60
250- 499	80
≥ 500	84

Fuente: STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Sep 2009. V 1.0. p.6-7

- ✓ Factor de corrección de metano (MCF), este factor varía dependiendo de la profundidad de los residuos y del tipo de relleno sanitario al cual se le quiera realiza la estimación de generación de metano.

Tabla 23. Factor de corrección para metano (MFC).

MANEJO DEL SITIO	PROFUNDIDAD d < 5m	PROFUNDIDAD d ≥ 5m
Sin manejo	0.4	0.8
con manejo	0.8	1.0
Semi-aeróbico	0.4	0.5
Condición desconocida	0.4	0.8

Fuente: STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Sep 2009. V 1.0. p.8

El relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales Caldas, cuenta con sistema de manejo Semi-aeróbico ya que cumple con las siguientes condiciones: sistema de drenaje de lixiviado, sistema de venteo de biogás y material de cobertura permeable⁴⁸.

4.3 PROYECCIÓN DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA”

La estimación de cantidad de metano que se puede generar en el relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales, se realiza bajo los parámetros del Modelo Colombiano de Biogás Versión 1.0, el cual, está desarrollado para estimar la generación y recuperación de biogás de rellenos sanitarios en Colombia, este modelo se basa en una ecuación de degradación de primer orden, adoptando las estructuras y valores del Modelo Mexicano versión 2.0 y del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para calcular dichas estimaciones. Para la utilización de este modelo se deben registrar en una hoja de cálculo datos particulares del relleno sanitario, para el desarrollo de este trabajo se alimentará dicha hoja con los datos del relleno sanitario “La Esmeralda”. Ver Tabla N° 20.

Tabla 24. Consideraciones para proyección de generación y recuperación de biogás en el relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales.

DATOS DE ALIMENTACIÓN	
Ciudad.	Manizales

Tabla 24. (Continuación).

DATOS DE ALIMENTACIÓN	
Departamento	Caldas

⁴⁸STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Sep 2009. V 1.0. p.8

Región.	Andina
Precipitación anual del lugar.	>2000 mm/año
Disposición anual del año más reciente.	147.000 Ton
Año de apertura.	1991
Año de clausura.	2041
¿La compactación de residuos se hace regularmente?	Si
¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	Si
¿Existe el afloramiento de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	No

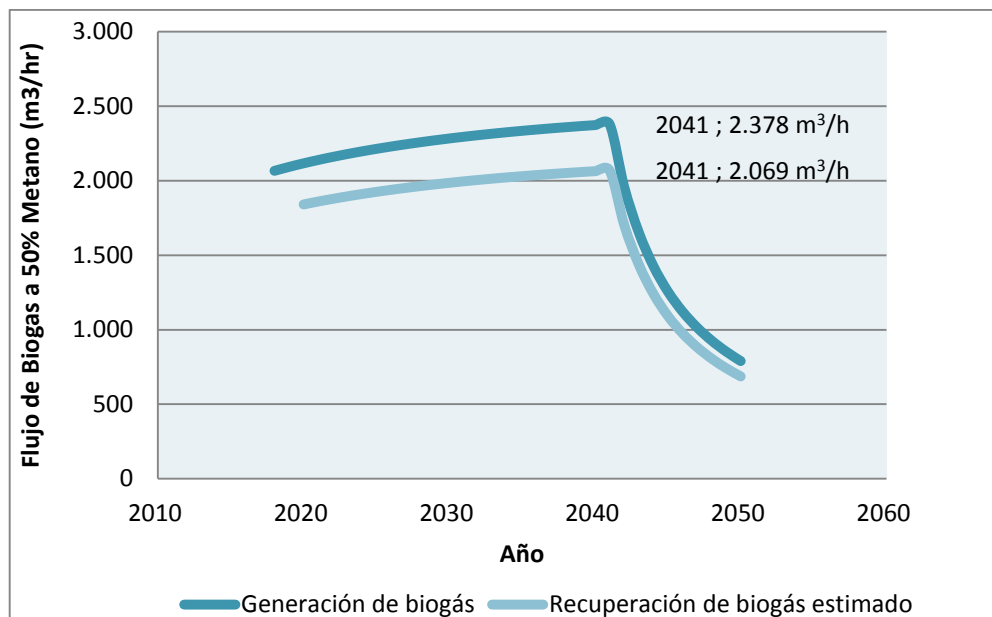
Fuente: STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Hoja de cálculo. Sep. 2009. V 1.0. p.2

4.3.1 Generación y proyección de biogás en “la esmeralda”. Hoy en día en el relleno sanitario “La Esmeralda” no se tiene definido un sistema de captura de biogás, se espera que para el año 2.020 se pueda implementar dicho sistema y así aprovechar ese recurso natural dado por la degradación de los residuos sólidos urbanos.

En la tabla N°29 se muestra una proyección de generación de biogás en el relleno sanitario “La Esmeralda” de 2.115 m³/h para el año 2.020, con una capacidad máxima de planta de electricidad igual a 2,3 MW, hasta un valor de 2,6 MW en el año 2.041, año de clausura del relleno sanitario, tiempo en el que se dejarán de recibir RSU, lo cual es muy satisfactorio para poder llevar a cabo la implementación del sistema de captura y de purificación del biogás⁴⁹.

Gráfica N° 2. Proyección de generación y recuperación de Biogás en el relleno sanitario “La Esmeralda” en Manizales, Caldas.

⁴⁹ Stege , G. A. Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biog[as.:2009.



Fuente: STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Hoja de cálculo. Sep. 2009. V 1.0. p.4

4.4 APLICACIONES DEL BIOGÁS.

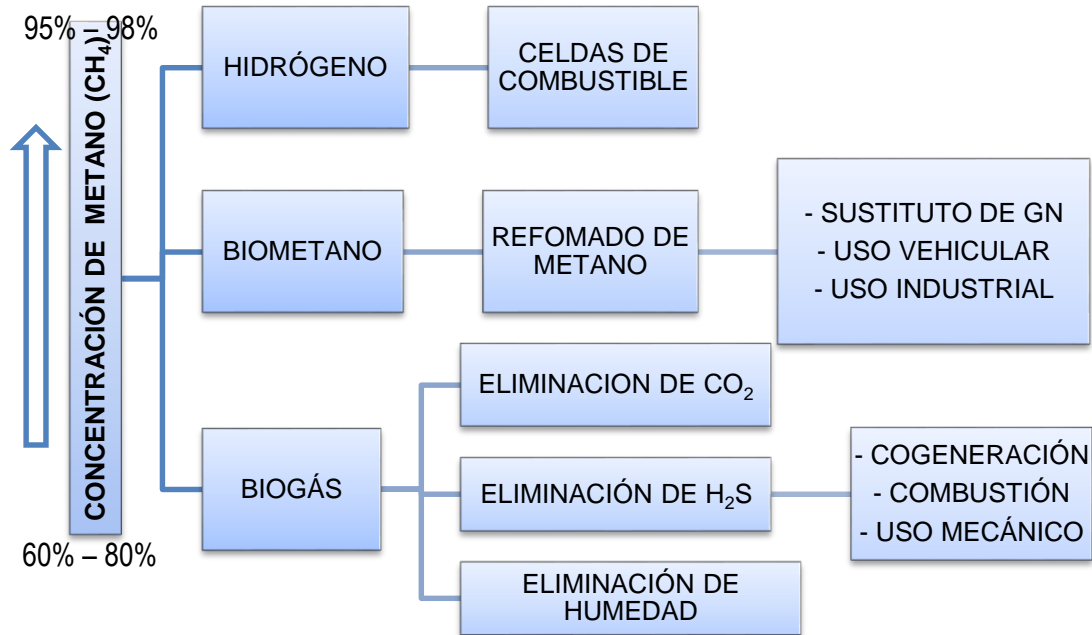
Alrededor del mundo se desarrollan múltiples investigaciones y avances para dar aprovechamiento a los recursos que se generan naturalmente y adoptar diversas aplicaciones para su uso. Gracias a que la captura y aprovechamiento del biogás son ejecuciones sencillas y es una fuente de energía renovable que se genera constantemente, buscando reducir las emisiones que generan impactos negativos al medio ambiente y teniendo beneficios positivos sobre su uso. (MICHELSEN, 2010).

El biogás puede ser tratado y empleado en diversas aplicaciones como:

- ✓ Producción de calor o vapor.
- ✓ Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad.
- ✓ Combustible vehicular.
- ✓ Biometano como gas natural.

Se debe tener en cuenta que para el aprovechamiento del biogás es necesario realizar procedimientos de purificación ver figura N° 1, con el fin de eliminar la humedad, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, y demás componentes que puedan generar algún daño en las maquinas u operaciones dependiendo del uso para el cual se disponga el biogás.

Figura N° 1. Necesidad de tratamiento del biogás según su uso.



Fuente: Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. p. 112.

4.4.1 Producción de calor o vapor. Para generar vapor existen equipos convencionales sencillos como los quemadores a gas, los cuales son sencillamente adaptables cambiando la relación aire-gas, que pueden trabajar con biogás con niveles inferiores de 1000 ppm de sulfuro de hidrogeno para llegar a puntos de rocío de 150°C, alimentado a los quemadores con presiones de entre 8 a 25 mbar, además este biogás también tiene aplicaciones térmicas directas como en hornos, calentadores y calderas, usado en invernaderos, hornos de cerámica, calentadores infrarrojo, evaporación de lixiviados, etc.⁵⁰.

⁵⁰ VARNERO MORENO, María Teresa. Manual de Biogás. Roma: D - FAO, 2011.

4.4.2 Biometano. El biometano es un producto obtenido a partir de la purificación de Biogás que se genera por la fermentación anaerobia de residuos orgánicos, el cual, es utilizado como combustible gaseoso, reemplazando Gasolina o Diésel y Gas Natural por tener sus propiedades similares a las del Gas Natural, Tabla N° 25, muestra algunas ventajas del biometano entre los dos combustibles. En América la implementación de Biogás no es aún muy usada a gran escala, y esto se debe, en gran parte a que no se tiene la cultura, ni la conciencia de la correcta disposición de los RSU para su aprovechamiento. Un estudio realizado por el laboratorio National Renewable Energy Laboratory (NREL)⁵¹ de determina que el potencial de metano a partir de fuentes orgánicas y rellenos sanitarios se estima en 7,9 millones Ton/año lo cual reemplazaría en un 61% el Gas Natural aprovechado en un 5% en energía eléctrica y un 56% en el sector de transporte, lo que demuestra la gran oportunidad que se está desaprovechando⁵².

Tabla 25. Ventajas del Biometano frente al Gas Natural.

GAS NATURAL	BIOMETANO
Combustible de origen fósil.	Combustible de origen renovable.
La descomposición de la materia orgánica tarda millones de años para la producción de Gas Natural.	La producción de biogás se obtiene a partir de la materia orgánica “fresca”, que se descomponen rápidamente.
La producción de biogás depende únicamente de las reservas naturales que varían de un país a otro.	La materia prima para la obtención de biogás, se puede producir en cualquier parte del mundo.
Intervienen drásticamente en el ambiente, la producción de Gas Natural conlleva a procesos de perforación de suelos y destrucción de hábitats.	Su producción no afecta el medio ambiente, ni representa un riesgo de pérdida de biodiversidad.
La combustión del Gas Natural incrementa las emisiones de CO ₂ .	El Biometano también emite CO ₂ a la atmosfera, pero estas emisiones corresponden a las mismas que tendría la materia orgánica en descomposición.

Fuente: APARIZIO, Adriana. Biometano: alternativa sostenible del gas natural. En revista cdtdegas, Santander. p. 66-67

⁵¹ Laboratorio Nacional de Energía Renovable, NREL.

⁵² APARICIO, Ariza and ADRIANA, Alejandra. BIOMETANO: ALTERNATIVA SOSTENIBLE DEL GAS NATURAL

4.4.2.1 Combustible vehicular. Los vehículos pueden usar biogás como fuente alterna para su funcionamiento, provistos de tanques de gas, también deben contar con el suministro de gasolina o diésel como combustible regular⁵³.

Para la aplicabilidad de biogás como combustible vehicular debe tener una calidad similar a la del gas natural, los vehículos que emplean gas natural como combustible se consiguen reducciones en las emisiones gaseosas contaminantes.

4.4.2.2 Inyección a la red de gas natural. El uso de biometano como reemplazo del Gas Natural, tiene gran ventaja gracias a que ya se cuenta con una infraestructura de suministro a la red para su implementación, aun con esta ventaja se tienen altos costos inversión y de operación al emplear este sistema debido a que, se requiere de procesos de purificación con altas eficiencias en remoción de impurezas, además se deben cumplir con muchas regulaciones que van desde permisos, estándares de calidad, monitoreo del gas, etc.⁵⁴.

4.4.3 Generación de electricidad. La generación de electricidad a partir del biogás formado y tratado en los rellenos sanitarios es de las principales aplicaciones que se le puede dar a este, mediante la utilización de motores de combustión interna, micro turbinas y turbinas, lo que ha llevado a reemplazar los derivados del petróleo como la gasolina y el diésel⁵⁵.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores es necesario realizar un tratamiento de purificación al biogás, en el cual, se busca eliminar humedad y sustancias corrosivas como el sulfuro de hidrogeno a concentraciones menores a 8 ppm, debido a que este al entrar en contacto con moléculas de agua reacciona produciendo ácido sulfúrico, el cual es un compuesto altamente corrosivo que llegaría a causar grandes daños al sistema mecánico de los motores de combustión interna.

⁵³ VARNERO, María T. Manual de Biogás. Roma: D - FAO, 2011.p. 56-58

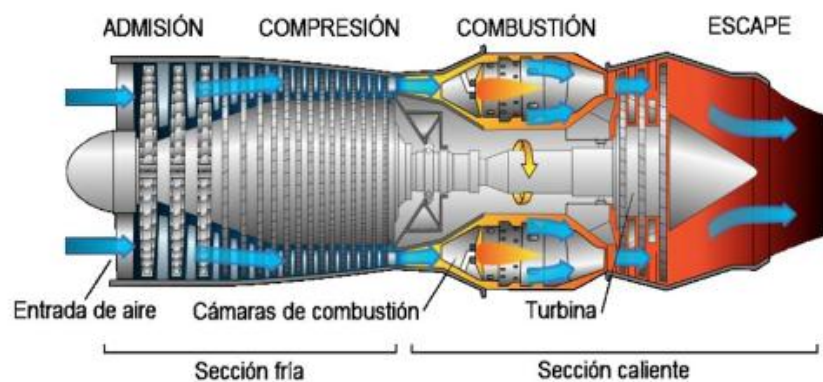
⁵⁴ GARCIA SANCHEZ, Jose Francisco. Producción de biometano a partir de biogás de vertedero.

⁵⁵ BLANCO, Gabrie; SANTALLA, Estela and LEVY, Alberto. Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos.

4.4.3.1 Motores de combustión interna. Un motor de combustión interna es aquel que recibe energía mecánica a partir de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Para la implementación de biogás, generado en los rellenos sanitarios. En este tipo de motores se debe cumplir con un porcentaje mínimo de metano cercano al 50% con flujo de entre 8 a 30 m³/min y capacidad de energía entre 800 kW y 3 MW puede ser usado en esta clase de motores⁵⁶.

4.4.3.2 Turbinas a gas. Son máquinas térmicas las cuales funcionan mediante la entrada de aire a un compresor incrementando su presión y temperatura que posteriormente se mezcla con un combustible (biogás) en una cámara de combustión para cumplir con el proceso de combustión como se muestra en la Imagen N° 9, los gases generados se mezclan nuevamente con aire para así pasar a la turbina con la temperatura adecuada y generar trabajo. (Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica a Partir de Biogás.). Se requiere de flujos de biogás mayores a 40 m³/min para ser implementado en turbinas a gas⁵⁷.

Ilustración 19. Diseño interno de una Turbina a gas.



Fuente: TURBINAS DE GAS. En Energiza. en línea tomado de <http://www.energiza.org/tubinasgasmarcho14/124-especial-turbinas-de-gas/971-principio-de-operaci%C3%B3n-en-una-turbina-de-gas>

4.5 VIABILIDAD DEL BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA”

El biogás generado puede ser aprovechado en diferentes aplicaciones como las mencionadas anteriormente, las cuales intervienen en las actividades diarias que se realizan comúnmente como cocinar, combustión directa de estufas, iluminación, calefacción, y reemplazo de los derivados del petróleo (gasolina y diésel), de ahí la importancia de realizar seguimientos a las diversas investigaciones que se realizan para optar la viabilidad del biogás como uso de energía alternativa, siendo la generación de energía eléctrica la opción más viable y atractiva desde diferentes

⁵⁶ BLANCO, Gabrie; SANTALLA, Estela and LEVY, Alberto. Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos.

⁵⁷ Op.cit

puntos de vista, financiero, social y ambiental, en este apartado se escribirá el diseño de una planta piloto para la generación de electricidad a partir del biogás generado en el relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales, Caldas.

4.6 SELECCIÓN DE EQUIPOS

En esta sección se hará una recopilación de los equipos y materiales que podrían usarse para el desarrollo de uso del biogás como generador de energía eléctrica.

4.6.1 Biofiltro. El biogás generado en el relleno sanitario debe ser conducido a través de tuberías hasta llegar al lugar donde se planea situar la planta de consumo de biogás, que en primer lugar se debe poner el contacto con el sistema de purificación de biogás.

Para el desarrollo de los biofiltros la opción más viable es tubería de presión de PVC (policloruro de vinilo rígido), ya que este tipo de tubería presenta grandes ventajas frente a otros materiales para conducción de gas, este tipo de tubería se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión, material duradero, resistente al envejecimiento y variaciones de temperaturas, material económico y manejable.

4.6.1.1 Dimensionamiento del biofiltro. En la Tabla N° 22, se describen los parámetros que se deben tener en cuenta para realizar el dimensionamiento de los biofiltros.

Tabla 26. Parámetros específicos para el desarrollo del diseño del biofiltro.

PARÁMETROS	VALORES
Tipo de biofiltro.	Biológico.
Tipo de materiales.	Materiales orgánicos.
H ₂ S min para generador.	ppm.
Temperatura del sistema.	22,77 °C
Tiempo de residencia.	7,12 s
Generación de biogás.	2.065 m ³ /h.
Generación máxima de biogás.	2.378 m ³ /h.
Caudal planta piloto.	50 m ³ /h.
Porcentaje de H ₂ S en el biogás.	200 ppm.

Fuente. Elaboración propia.

Para el diseño de una planta piloto se determinará un flujo máximo de 50 m³/h de biogás, ya que el relleno sanitario no cuenta con un sistema de captura de biogás definido y hay zonas que aún no están contempladas para disponer de residuos que determinan de generación de biogás respecto al área total del relleno.

Ecuación 7 Flujo máximo de biogás.

$$50 \frac{m^3}{h} \times \frac{1 h}{3600 s} = 0.01388 \frac{m^3}{s}$$

Se calcula el caudal del biogás en segundos para hallar el volumen requerido que debe tener el biofiltro.

- ✓ EBRT: Tiempo de residencia.
- ✓ V_f : Volumen final de biofiltro.
- ✓ Q: Caudal.

Ecuación 8 Volumen final.

$$EBRT = \frac{V_f}{Q}$$

Ecuación 9 Calculo de volumen final de biogás.

$$V_f = 0.01388 \frac{m^3}{s} \times 7.12 s = 0.0988 m^3$$

Una vez se tiene el volumen definido se procede a calcular la altura del biofiltro basándose en la ecuación del volumen de un cilindro ver ecuación (10).

Ecuación 10 Altura del biofiltro

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$h = \frac{0.0972 m^3}{\pi \times (0.15m)^2}$$

$$h = 1.3977 m$$

Tabla 27. Resumen de dimensiones Biofiltro.

DIMENSIÓN	UNIDAD
Caudal	50 m ³ /h
Volumen	0,0988 m ³
Altura	1,3977 m

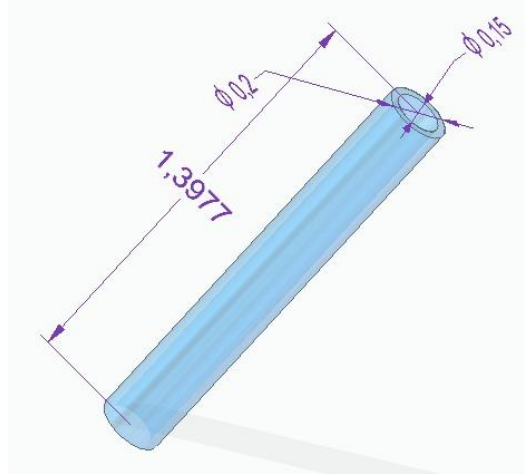
Tabla 27. (Continuación).

DIMENSIÓN	UNIDAD
-----------	--------

Diámetro interno 0,15 m

Fuente. Elaboración propia.

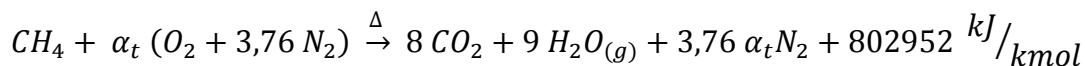
Ilustración 20. Dimensionamiento de Biofiltro.



Fuente. Elaboración propia.

4.6.2 Moto-generador. Se determina el poder calorífico de biogás para establecer que cantidad de kilovatios pueden generar 50m³ de biogás, tomando en cuenta que 1m³ de biogás puede producir 2.2 kWh⁵⁸, para ello se tendrá en cuenta la reacción de combustión del metano según la estequiometría de la ecuación (13).

Ecuación 11 reacción general estequiométrica



La ecuación anterior representa el cambio de entalpia que hay entre el metano y el aire en condiciones estándar 1 atm de presión y 25 °C, conociendo que el volumen aproximado que ocupa un gas es de 1 mol se puede determinar la siguiente ecuación⁵⁹.

Ecuación 12 volumen del gas

$$1 \text{ m}^3 = 1.000 \text{ L} = 0,044643 \text{ kmol}$$

$$802952 \text{ kJ}/\text{kmol} = 35846,18 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

Según la caracterización realizada al biogás de las chimeneas del relleno sanitario “La Esmeralda” este contiene un 56% de metano en su composición, dato con el

⁵⁸ IZA CHILUISA, SANDRA MARISOL. SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE BIOGÁS PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA HACIENDA SAN FRANCISCO.

⁵⁹ ORDÓÑEZ, María del Carmen, et al. Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléc. En: SCIENTIA ET TECHNICA. vol. 1, no. 47, p. 23-28

cual se puede calcular el poder calorífico inferior del metano contenido en el biogás generado en el relleno sanitario como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$PCI_{biogás} = \% CH_4 \times PCI CH_4$$

$$PCI_{biogás} = 0,56 \times 35846,18 \text{ kJ}/\text{m}^3 = 20073,86 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

Se sabe que:

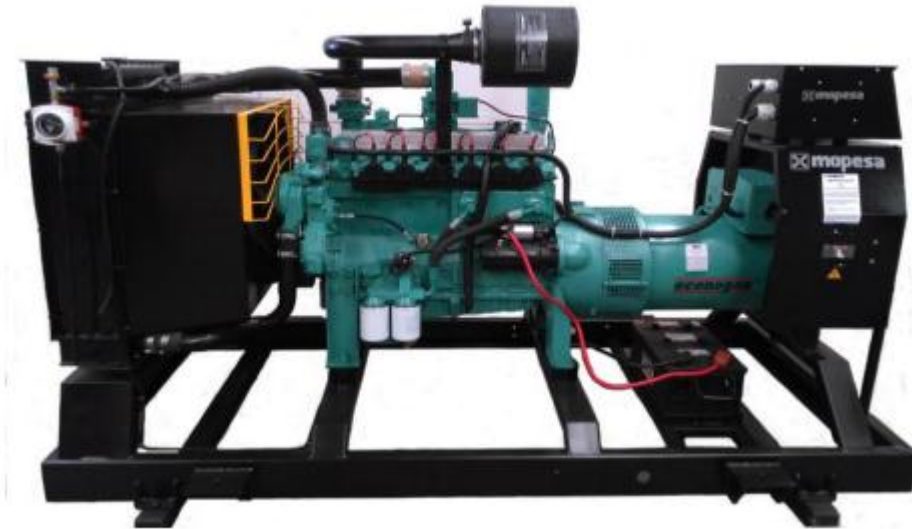
$$3600 \text{ KJ} = 1 \text{ kWh}$$

Entonces,

$$20073,86 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} = 5.5761 \text{ kWh}$$

Entendiendo así que para los 50 m³ de biogás que se plantean para el diseño de planta piloto se requerirá de un moto-generador de potencia de aproximadamente 100 kW.

Ilustración 21. Planta eléctrica de 127 kW continua a biogás.



Fuente: MOPESA. Plantas eléctricas en línea tomado de www.mopesa.com

La planta eléctrica de 127 kW a biogás es un modelo que funciona como planta de transferencia manual o planta de transferencia eléctrica, equipada de con un tablero multifuncional, el cual está diseñado para la automatización de la operación de la planta, medición de parámetros críticos, arranque y paro, así como el manejo de transferencia de carga, ver Tabla N° 28.

PRINCIPALES FUNCIONES:

- ✓ Medición de voltaje, frecuencia, temperatura, presión y corriente.
- ✓ Secuencias de fases en suministro normal y de emergencia.
- ✓ Protección de falla por baja energía, presión de aceite y altas temperaturas.
- ✓ Sobrecarga.

Tabla 28. Dimensiones y especificaciones moto-generador.

ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	
Modelo	GE12TIC
Tipo de motor	Doosan
RPM	1800
Tipo de encendido	Dectronico.
Combustible	Biogás.
Numero de cilindros	6 en línea.
Diámetro	123 mm.
Cilindraje	11.051 L.
Consumo de combustible a plena carga.	92 m ³ /h.
ESPECIFICACIONES DEL GENERADOR	
Potencia del generador	184 kWe.
Modelo	GTA252AIVB
Tensión	220 V a 440 V.
Factor de potencia	0.8
Frecuencia	60 Hz.
Amperaje	300 a 600 A.
Ciclo de operación	Intermitente y/o continuo.
PANEL DE CONTROL	
Largo	2970.20 mm.
Alto	1588.42 mm.
Ancho	1320.80 mm.
Peso	1010 Kg.

Fuente: MOPESA. Plantas eléctricas en línea tomado de www.mopesa.com

4.6.3 Accesorios. Se requiere de un número de accesorios para la implementación de una planta piloto para la generación de energía eléctrica a partir de biogás, que controlan y monitorean las diferentes variables que intervienen en el sistema.

4.6.3.1 Válvula. Es necesario incluir una válvula al sistema que ayude a controlar el flujo del biogás, la válvula de tipo bola es adaptable y proporciona la ayuna necesaria para lo que se requiere en el sistema, consta en su interior de una esfera perforada que permite el cierre total o parcialmente del fluido por periodos cortos ya que esta puede sufrir un desgaste interno. Este tipo de válvula tiene grandes ventajas, bajos costo, fabricadas en acero inoxidable o en termoplásticos como PVC y CPVC que favorece a fluidos que puedan generar corrosión, alta capacidad, pocas fugas, poco mantenimiento y no requiere de lubricación.

Ilustración 22. Imagen interna de una válvula tipo bola.



Fuente: EQUIPOS Y CONTROLES INDUSTRIALES. Válvulas y actuadores en línea Tomado de <http://www.eci.co>

4.6.3.2 Manómetro. Es indispensable la utilización de un manómetro, el cual ayudará a medir y controlar la presión del fluido, ya que a través de la presión se pueden detectar anomalías o manejar variables como lo son: nivel, volumen, flujo y densidad⁶⁰.

Ilustración 23. Manómetro.

⁶⁰ MEDICIÓN DE PRESIÓN: características, tecnologías y tendencias. En artículos técnicos en línea tomado de <http://www.smar.com/espanol/articulos-tecnicos/medicion-de-presion-caracteristicas-tecnologias-y-tendencias>

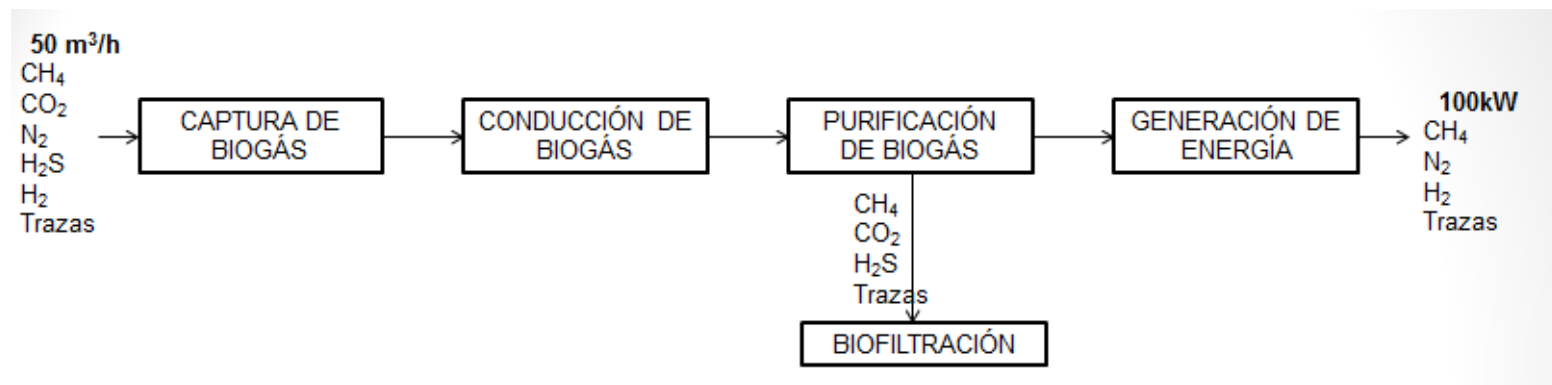


Fuente: MANOMETRIA INSTRUMENTACION. Productos manómetros. En línea tomado de <https://mei.es>

4.7 PROCESO ALTERNATIVO DE PURIFICACION DE BIOGÁS.


En la ilustración N°24 se describe el proceso que llevaría a cabo la implementación del tratamiento que se le debe realizar al biogás para generar una fuente de energía eléctrica.

Ilustración 24 Proceso de purificación de biogás.



Fuente: elaboración propia.

Tabla 29 Proyección de generación de Biogás en el relleno sanitario la esmeralda.

 Modelo Colombiano de Biogás de Rellenos Sanitarios v.1 Fecha: Septiembre 2010 Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de los EE.UU.											
PROYECCIONES DE GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS La Esmeralda Manizales, Caldas, Colombia											
Año	Disposición (Mg/ir)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás		Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
2016	147.680	2.973.326	2.008	35,9	0%	0	0	0,0	0,0	0	0
2017	147.000	3.120.326	2.039	36,4	0%	0	0	0,0	0,0	0	0
2018	147.700	3.268.026	2.065	36,9	0%	0	0	0,0	0,0	0	0
2019	147.700	3.415.726	2.091	37,4	0%	0	0	0,0	0,0	0	0
2020	147.700	3.563.426	2.115	37,8	65%	1.375	809	24,6	2,3	4.312	90.557
2021	147.700	3.711.126	2.138	38,2	65%	1.390	818	24,8	2,3	4.358	91.511
2038	147.700	6.222.026	2.358	42,1	65%	1.532	902	27,4	2,5	4.806	100.927
2039	147.700	6.369.726	2.365	42,3	65%	1.537	905	27,5	2,5	4.821	101.235
2040	147.700	6.517.426	2.372	42,4	65%	1.542	907	27,5	2,6	4.835	101.526
2041	0	6.517.426	2.378	42,5	65%	1.546	910	27,6	2,6	4.848	101.801
2042	0	6.517.426	1.958	35,0	65%	1.273	749	22,7	2,1	3.992	83.837

PARÁMETROS del MODELO Contenido de Metano en el Biogás: 50% Factor de Corrección de Metano: 1,0				NOTAS * La capacidad máxima de la planta de electricidad asume que el índice de calor bruto es de 10,800 Btus por kW-hr (hhv).			
Categoría de Residuos:	Degradación Rápida	Degradación Moderada	Degradación Lenta	**Reducción de emisiones no toman en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto. La reducción de emisiones es calculada usando una densidad de metano de 0.0007168 Mg/m3 a temperatura estándar.			
Índice de generación de CH ₄ (k):	0,400	0,070	0,035				
Potencial de generación de CH ₄ (Lo) (m3/Mq):	70	169	200				

Fuente: STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Hoja de cálculo. Sep. 2009. V 1.0. p.2.

5. ANÁLISIS FINANCIERO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS EN EL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA” DE LA EMPRESA EMAS S.A.

Mediante el desarrollo de este capítulo se pretende realizar una estimación de los costos que se generarían si se implementaría un sistema de purificación de biogás de acuerdo a la alternativa propuesta en el capítulo 4. Para la estimación de la misma se evalúa el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), de acuerdo a esto se contemplará la posible puesta en marcha del sistema.

5.1 EGRESOS

Los egresos son los costos mensuales que genera la implementación del sistema de purificación, que pueden estar representados por equipos, reactivos, ensamble, mantenimiento y préstamos.

Tabla 30. Egresos, Equipos/Sustratos.

EQUIPO		CANT	CARACT	PROVEEDOR	PRECIO	COSTO TOTAL
Manguera		1	PVC azul rígido (15m).	Representaciones industriales.	50.000	50.000
Sustrato	Cascara de coco.	1	kg	Galería de Manizales.	7.000	7.000
	Aserrín-piedra pómez.	1	kg	MI Industrias	18.000	18.000
	Carbón.	1	kg	Galería de Manizales.	11.000	11.000
Planta eléctrica.		1	Marca Econogas	MOPESA	28.000.000	28.000.000
Equipo multigases.		1	MAX XTII	Procesos y soluciones ambientales.	2.269.796	2.269.796
Válvula de bola.		2	PVC, 4”.	Distribuidores de sistema de riego.	82.600	165.200
Manómetro.		1	Marca Winters.	Simaro	86.500	86.500
Costo Total						30.607.496

Fuente: elaboración propia.

5.1.1 Costos mano de obra. Se debe adecuar una zona específica en el relleno sanitario para la implementación del sistema de purificación, teniendo en cuenta que se requiere de la asesoría e interventoría de un Ingeniero, se estima un costo para esto de \$ 5.541.000 incluyendo los materiales.

5.1.1.1 Mantenimiento. Debe monitorearse constantemente el sistema de purificación y realizar el respectivo mantenimiento a las tuberías, biofiltro y planta eléctrica, la empresa cuenta con personal capacitado para realizar este tipo de labores y el valor de este mantenimiento se asume dentro de la nómina de los empleados.

5.1.2 Préstamo. Para poner en marcha la planta piloto la empresa EMAS S.A podrá recurrir a un préstamo por un valor de \$ 28.000.000 con el banco Bancolombia una tasa efectiva anual de 30,68 % con cuotas mensuales de \$ 2.739.013 por un periodo de 12 meses.

Tabla 31. Amortización de préstamo.

PERIODOS DE PAGO	CUOTA	PAGO DE INTERESES	AMORTIZACIÓN DEL PRINCIPAL	COSTE DE CANCELACIÓN
0				\$ 28.000.000,00
1	\$ 2.739.013,63	\$ 715.866,67	\$ 2.023.146,97	\$ 25.976.853,03
2	\$ 2.739.013,63	\$ 664.141,54	\$ 2.074.872,09	\$ 23.901.980,94
3	\$ 2.739.013,63	\$ 611.093,98	\$ 2.127.919,65	\$ 21.774.061,29
4	\$ 2.739.013,63	\$ 556.690,17	\$ 2.182.323,47	\$ 19.591.737,82
5	\$ 2.739.013,63	\$ 500.895,43	\$ 2.238.118,20	\$ 17.353.619,62
6	\$ 2.739.013,63	\$ 443.674,21	\$ 2.295.339,43	\$ 15.058.280,19
7	\$ 2.739.013,63	\$ 384.990,03	\$ 2.354.023,60	\$ 12.704.256,59
8	\$ 2.739.013,63	\$ 324.805,49	\$ 2.414.208,14	\$ 10.290.048,45
9	\$ 2.739.013,63	\$ 263.082,24	\$ 2.475.931,40	\$ 7.814.117,05
10	\$ 2.739.013,63	\$ 199.780,93	\$ 2.539.232,71	\$ 5.274.884,34
11	\$ 2.739.013,63	\$ 134.861,21	\$ 2.604.152,42	\$ 2.670.731,92
12	\$ 2.739.013,63	\$ 68.281,71	\$ 2.670.731,92	\$ 0,00

Fuente: elaboración propia.

5.2 FLUJO DE CAJA PARA LA EMPRESA EMAS S.A

Tabla 32. Flujo de caja.

		ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Beneficio financiero													
Total Ingresos	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072	\$ 15.939.072
Manguera	\$ 50.000												
Sustrato		\$ 36.000		\$ 36.000		\$ 36.000		\$ 36.000		\$ 36.000		\$ 36.000	
Planta eléctrica.	\$ 28.000.000												
Equipo multigas.	\$ 2.269.796												
Válvula de bola.	\$ 165.200												
Manómetro.	\$ 86.500												
Mantenimiento.		\$ 320.000				\$ 320.000				\$ 320.000			
Cuota mensual Bancolombia		\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013	\$ 2.739.013
Total egresos	\$ 30.571.496	\$ 12.844.059	\$ 13.200.059	\$ 13.164.059	\$ 13.200.059	\$ 12.844.059	\$ 13.200.059	\$ 13.164.059	\$ 13.200.059	\$ 12.844.059	\$ 13.200.059	\$ 13.164.059	\$ 13.200.059
Utilidad	(\$ 14.632.424)	\$ 5.575.547	\$ 5.931.547	\$ 5.895.547	\$ 5.931.547	\$ 5.575.547	\$ 5.931.547	\$ 5.895.547	\$ 5.931.547	\$ 5.575.547	\$ 5.931.547	\$ 5.895.547	\$ 5.931.547

Fuente: elaboración propia.

5.3 VALOR PRESENTE NETO (VPN)

Por medio del valor presente neto se determina la viabilidad financiera de la inversión que se requiere realizar para poner en marcha la propuesta planteada en el presente proyecto, la ecuación que sigue la evaluación nombrada es la siguiente:

$$VPN = \frac{\sum R_t}{(1-i)^t} = 0$$

Dónde:

- t = Tiempo estimado para el proyecto. (12 meses)
- i = Tasa de descuento.
- R = Ingresos mensuales.

$$VPN = -Inversión + \frac{\sum_{1-12}^t Utilidad}{(1-i)^t}$$

Al aplicar la ecuación 16 nos da como resultado un valor de *VPN* \$ 3.500.270, representando un valor positivo indicando que la viabilidad del proyecto es buena.

5.4 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Mediante este indicador se quiere medir la rentabilidad que tiene la ejecución de un proyecto.

Para calcular la tasa interna de retorno se utilizan los valores calculados en la tabla N° 27 teniendo en cuenta que la tasa es de 30,68% dada por el interés del préstamo, obteniendo un TIR equivalente al 35,27%, evaluando que este resultado es mayor al que la tasa de oportunidad se establece que el proyecto es aceptado y viable para su implementación.

6. CONCLUSIONES

- ✓ Se desarrolló la evaluación del biogás que tiene como fin aprovechar un recurso natural para generar fuentes de energía no convencionales, y es la empresa EMAS S.A quien ve la oportunidad de contribuir en la mitigación del impacto ambiental mediante la evaluación que se planteó durante el presente trabajo.
- ✓ Las concentraciones iniciales de sulfuro de hidrogeno contenido en el biogás de las chimeneas de la zona activa tenían un promedio de 200 ppm en su composición.
- ✓ Se llevó a cabo una caracterización del biogás generado en las chimeneas en el relleno sanitario La Esmeralda, determinando que el 58.33% de las chimeneas evaluadas de la zona activa no contenían concentraciones de H₂S posiblemente por el adecuado tratamiento que se le da a los lixiviados en el relleno los cuales, pueden eliminar este compuesto.
- ✓ De acuerdo al diagnóstico establecido en la caracterización, se llevó a cabo un selección de la alternativas que se pudiesen desarrollar como proceso de purificación del biogás, se tuvo en cuenta las ventajas y desventajas que tenían cada una de las alternativas y mediante las herramientas que proporciona una matriz de selección en la cual se contemplaron criterios como diseño, construcción, operación y eficiencia, de las 4 alternativas que involucraban métodos de absorción, adsorción, separación por membrana y biológica que se plantearon se seleccionó el método de purificación biológica, la cual era la que menos presupuesto e impactos ambientales generaba.
- ✓ El proceso de purificación seleccionado tiene una remoción promedio de sulfuro de hidrogeno del 96.80%.
- ✓ El costo de inversión inicial para la purificación del biogás en el relleno sanitario es de alrededor de treinta millones de pesos para un caudal de 50m³/h.
- ✓ Mediante una evaluación financiera se determinó la viabilidad económica del proyecto dada como viable para la ejecución mediante el cálculo del valor presente neto y tasa de retorno interno este último fue de 35,27% mayor a la tasa de oportunidad.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Implementar un sistema de captura de biogás determinando la cantidad de biogás que se puede llegar a purificar para generar mayores cantidades de energía.
- ✓ Realizar una evaluación de las demás opciones planteadas para el aprovechamiento del recurso y hacer un análisis comparativo frente al uso como energía eléctrica.
- ✓ Se recomienda realizar la caracterización del biogás mediante métodos más detallados (Cromatografía de gases) en aquellas chimeneas donde no se pudo determinar con certeza la presencia de sulfuro de hidrogeno.
- ✓ Realizar una serie de monitoreo y muestreos mediante los cuales se pueda detallar profundamente la cantidad de biogás y sulfuro de hidrogeno a diferentes tiempos del año.
- ✓ Se recomienda evaluar los materiales orgánicos utilizados en los biofiltros para generar mayor remoción de sulfuro de hidrogeno.

BIBLIOGRAFÍA

APARIZIO, Adriana. Biometano: alternativa sostenible del gas natural. En revista cdtdegas, Santander. p. 66-67

ARELLANO,Luis, et al. Purificación y usos del biogás. [0]:Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), 2017. p. 19-85

BACULIMA, Mario and ROCANO, Gabriela C. Estudio para la determinación de la producción de energía eléctrica a partir del aprovechamiento del biogás de una granja porcina ubicada en la ciudad de Azogues. [0]:2015.

BARRERA, José and LASSO, Yamil. Relleno sanitario es amigable con el medio ambiente

BLANCO, Gabrie; SANTALLA, Estela and LEVY, Alberto. Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos.

CALDERON, Saenz.; CEVALLOS, Francisco., Los sustratos. En Drcalderonlabs. Bogota D.C., en línea tomado de http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm.

CALVO, M. Colombia apuesta por los rellenos sanitarios para producir electricidad. Colombia, 2013

CALVO, Marta. Colombia apuesta por los rellenos sanitarios para producir electricidad en línea tomado de <https://twenergy.com/co/a/colombia-apuesta-por-los-rellenos-sanitarios-para-producir-electricidad-960>

COLMENARES, Mayanga, & Santos Bonilla, K. Ingeniería Química . 2007

COPLASTIC. tubería PVC., España. en línea tomado de <http://www.coplastic.es/categorias/tubo-pvc-transparente/5>

DEUBLEIN, Dieter and STEINHAUSER, Angelika. Biogas from waste and renewable resources. 2., rev. and expanded ed., 2. repr. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 3527327983. p. 49-56

DECRETO 948 DE 1995. Reglamento de protección y control de la calidad del aire. República de Colombia. En línea tomado de: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec_0948_1995.pdf.

DEPARTAMENTO DE AMBIENTE Y DESARROLLO. Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás. Honduras [1] p. 2-10:

Gallego. (2017). BIOGÁS DOÑA JUANA. Recuperado Abr 2018

García, F. Producción de biometano a partir de biogás de vertedero. Sevilla: Universidad de Sevilla. 2016. p .5-47

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN FLUIDOS Y ENERGÍA, GIFE.; Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas and km 2 vía El Refugio. Piedecuesta. Santander. Colombia. biometano: alternativa sostenible del gas natural. [1]: p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: el instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

IZA,Sandra. Sistema de conducción de biogás para generar energía eléctrica en la hacienda san francisco.2015. p. 18-53

JUANA, B. D. (s.f.). BIOGÁS DOÑA JUANA.

LEY 607 DE 2000. la creación, funcionamiento y operación de las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria, UMATA, y se reglamenta la asistencia técnica directa rural en consonancia con el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología. Colombia. En línea recuperado de: <https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Leyes/Ley%20607%20de%202000.pdf>

LEY 788 DE 2002. Impuesto sobre la renta y complementarios. República de Colombia. En línea tomado de: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0788_2002.html

MARTINEZ,Alfonso and EMREQUI,Felix. Propuesta del sistema para la purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural. Jun.

MARIN MARIN,Mirella Lucia. Purificación biológica de biogás. Universidad de Chile.

MARTINEZ,Juan. Análisis Composicional de Gas; Rellenos sanitarios RFLA 1603114.Ago 31,. p.11

MICHELSEN, J.Tipos de proyectos de generación de energía a partir del biogás. buenos aires: scs eginners.2010.

MORERO, Betzabet Del Valle. Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. [0]:2014.

NIÑO CARVAJAL, Lissette Ximena; RAMÓN VALENCIA, Jacipt Alexander and RAMÓN VALENCIA, Jairo Lenin. Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga. En: PRODUCCIÓN + LIMPIA. Jan 1, .vol. 11, no. 1, p. 66-74

ORDOÑEZ, María del Carmen, et al. Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléc. En: SCIENTIA ET TECHNICA. vol. 1, no. 47, p. 23-28

ORTEGA VIERA, Lianys, et al. Características funcionales de membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Aug 1, .p. 57-67

ORTEGA VIERA, Lianys, et al. Principales métodos para la desulfuración del biogás. En: INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL. Apr 1, .vol. 36, no. 1, p. 45-56

QUINTERO, Elio Zondo; HERRERA, Ana. And NAPOLEÓN, Eduardo. Evaluación de medio filtrantes para la reducción de sulfuro de hidrogeno en el mejoramiento de la calidad el biogás. En: Bdigital. Honduras. p.31-36

Sanata Fernandez , E., & Montalvo Martinez, S. J. (s.f.). metodos economicos y ecologicamente viables para purificar gases contaminantes.

STEGE. G Alex., Manual de Usuario: Modelo Colombiano de Biogás. Sep 2009. V 1.0. p.4-29.

URREGO-MARTÍNEZ, Elizarova and RODRÍGUEZ-MIRANDA, Juan Pablo. Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana, Bogotá - Colombia. En: UNIVERSIDAD Y SALUD. Aug 31, .vol. 18, no. 2, p. 338

VARNERO, María T. Manual de Biogás. Roma: D - FAO, 2011. p. 11-91

VARNERO, María T., et al. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. En: información tecnológica. vol. 23, no. 2, p. 31-40

VARNERO, María T. Purificación de biogás y conversión de dióxido de carbono a metano (gas natural), mediante procesos bacterianos. [0]:2012.

ANEXOS

ANEXO A

ANÁLISIS COMPOSICIONAL DEL GAS, RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA EN MANIZALES CALDAS.

Sampling Location	Relleno Sanitario La Esmeralda
Cylinder Number	COL - 513
Sample Description	Chimenea
Sampling Conditions	1.0 psig @ 73.0°F

	Component	Mole %	Weight %
H ₂	Hydrogen	0.01	0.00
H ₂ S	Hydrogen Sulphide	0.02	0.02
CO ₂	Carbon Dioxide	41.47	65.66
N ₂	Nitrogen	1.31	1.32
C ₁	Methane	57.19	33.00
C ₂	Ethane	0.00	0.00
C ₃	Propane	0.00	0.00
iC ₄	i-Butane	0.00	0.00
nC ₄	n-Butane	0.00	0.00
iC ₅	i-Pentane	0.00	0.00
nC ₅	n-Pentane	0.00	0.00
C ₆	Hexanes	0.00	0.00
C ₇	Heptanes	0.00	0.00
C ₈	Octanes	0.00	0.00
C ₉	Nonanes	0.00	0.00
C ₁₀	Decanes	0.00	0.00
C ₁₁	Undecanes	0.00	0.00
C ₁₂ ⁺	Dodecanes plus	0.00	0.00
Totals :		100.00	100.00

Note: 0.00 means less than 0.005.

Calculated Residue Properties	Mole Weight (g mol ⁻¹)	Density (g cm ⁻³ at 60°F)
C ₇ ⁺ Heptanes plus	-	-
C ₁₀ ⁺ Decanes plus	-	-
C ₁₂ ⁺ Dodecanes plus	-	-

Calculated Whole Gas Properties		
Gas Gravity	0.9598	(Air=1 @ 14.73 psia & 60°F)
Whole Sample Mole Weight	27.800	g mol ⁻¹
Ideal Gas Density	1.1698	kg m ⁻³ @ 14.65psia, 60°F
Ideal Gross Calorific Value	575.8	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Ideal Net Calorific Value	518.3	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Pseudo Critical Press.	831.60	psia
Pseudo Critical Temp.	426.30	Rankine
Gas Compressibility Factor, Z	0.996969	@ 14.65 psia & 60°F
GPM (80% Propane)	0.0000	Gal/1000 PC
GPM (100% Propane)	0.0000	Gal/1000 PC

Additional Information		
Real Gross Calorific Value	577.6	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Real Net Calorific Value	519.8	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F

ANEXO B.
HOJA DE DATOS DEL MEDIDOR MULTIGAS.

Honeywell BW™ Max XT II Especificaciones técnicas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
TAMAÑO	13,1 x 7,0 x 5,2 cm / 5,1 x 2,8 x 2,0 pulg.
PESO	328 g / 11,5 oz.
TEMPERATURA	-20 to 50°C / -4 to 122°F
HUMEDAD	10 - 100% RH (sin condensación)
ALARMAS	Visual, vibratoria y sonora (95dB) Bajo, Alto, STEL, TWA, OI (fuera de límites), batería baja, bomba
PRUEBAS	Alarmas sonoras y visuales en el momento de la activación, sensores, batería, bomba y circuitos (continua)
VIDA ÚTIL TÍPICA DE LA BATERÍA	13 horas a 0°C / 32°F 8 horas a -20°C / -4°F Se recarga en 6 horas
EXTRACCIÓN DE BOMBA	Muestra desde hasta 23 m Nota: No intente calibrar un dispositivo Honeywell BW™ Max XT II con tuberías de mayor longitud que las tuberías de calibración estándar provistas con el detector
OPCIONES DEL USUARIO	<ul style="list-style-type: none"> • Pípedo de seguridad • Bloqueo de seguridad (sensor) • Alarmas retenidas • Modo de pantalla segura • Bloqueo de calibración IR • Selección de lugar • Forzar prueba de bloqueo • Forzar prueba de respuesta cuando la fecha de prueba ya ha transcurrido
CALIFICACIONES	Interferencia de radiofrecuencia/interferencia electromagnética
PROTECCIÓN DE ACCESO	Cumple la directiva EMC 2004/108/EC IP66/67
CERTIFICACIONES Y APROBACIONES	<ul style="list-style-type: none"> • : Clase I, Div. 1, Grupo A, B, C, D • : Ga Ex ia IIC T4 • : II 1 G Ga Ex ia IIC T4 • : Br Ex ia IIC T4
GARANTÍA	Garantía total de dos años que incluye todos los sensores

ESPECIFICACIONES DEL SENSOR		
GASES	RANGO DE MEDICIÓN ESTÁNDAR	RESOLUCIÓN
SULFURO DE HIDRÓGENO (H ₂ S)	0 - 200 ppm	1 / 0,1 ppm
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	0 - 1.000 ppm	1 ppm
OXÍGENO (O ₂)	0 - 30% vol.	0,1% vol.
GASES COMBUSTIBLES (LEL)	0 - 100% LEL 0 - 5,0% v/v	1% LEL 0,1% v/v

Los valores de activación de alarma de todos los sensores son ajustables por el usuario. Los valores de activación de alarma se muestran automáticamente durante el arranque del instrumento.

OPCIONES Y ACCESORIOS



Compatible con MicroDock II
Estación de acoplamiento de instrumentos automatizada



Funda a prueba de golpes



Honeywell BW™ Connect*
Monitoreo en tiempo real.
*Póngase en contacto con Honeywell Analytics para obtener más información sobre su disponibilidad



Cargador soporte multiunidad

Para más información

www.honeywellanalytics.com

Europa, Medio Oriente, África
gasdetection@honeywell.com

Américas
detectgas@honeywell.com

Asia Pacífico
analytics.ap@honeywell.com

Servicios Técnicos
EMEA: HAexpert@honeywell.com
US: ha.us.service@honeywell.com
AP: ha.ap.service@honeywell.com

Datashwet_MaxXT II_DS01105-07_ES | 06/18
©2018 Honeywell International Inc.

Honeywell

• Texto en varios idiomas: inglés, francés, alemán, español y portugués

concentraciones de gas en tiempo real
• Cumplimiento visual constante con IntelliFlash™

estación automática de prueba y calibración MicroDock II

Connect para monitoreo en tiempo real

ANEXO C.
PRECIPITACIÓN MEDIA TOTAL ANUAL 1981-2010, REPÚBLICA DE
COLOMBIA.

