



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

ESCUELA DE INGENIERÍA

TESIS

“SISTEMA INTEGRAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE BIOGÁS”

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN DESARROLLO
SUSTENTABLE

PRESENTA:
LUIS ANTONIO VAZQUEZ VALENCIA

DIRECTOR:
DR. ROILAN IGLESIAS DÍAZ

CO-DIRECTOR:
DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

ASESORES:
DR. GUILLERMO ROGELIO IBÁÑEZ DUHARTE
DR. PASCUAL LÓPEZ DE PAZ

Tesis presentada por: _____


Luis Antonio Vazquez Valencia

Aspirante al Título de:

Maestro en ciencias en Desarrollo Sustentable

Aceptado por el Comité Tutorial:



Dr. Roilan Iglesias Diaz
Director de tesis



Dr. Joel Moreira Acosta
Co- Director de tesis



Dr. Guillermo Rogelio Ibáñez Duharte
Asesor



Dr. Pascual López De Paz
Asesor

Marzo 2016.



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
18 de marzo de 2016
Oficio No. DIP-376/16

C. Luis Antonio Vázquez Valencia
Candidato al Grado de Maestro
en Ciencias en Desarrollo Sustentable
P r e s e n t e.

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la opinión favorable de la Comisión Revisora que analizó su trabajo de tesis denominado **“Sistema integral de generación de energía eléctrica por medio de biogas”** y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión** del documento mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que usted sustentará para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Desarrollo Sustentable. Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

Atentamente

“Por la Cultura de mi Raza”


Dra. María Adelina Schlie Guzmán
Directora.



C.c.p. Expediente

DEDICATORIA

A DIOS

Por estar conmigo en cada proyecto de mi vida.

A MI FAMILIA

Por los que siempre están conmigo y los que brillaron por su ausencia.

A MARIA DE LOS ANGELES

Por su amor y entrega, parte fundamental en este proyecto.

A YARETZI AMACALLI

Quien es la luz de mis ojos.

A MIS AMIGOS

Más que amigos mis hermanos de la vida, a los que sin pedirlo siempre están al pendiente, siempre ahí.

A MIS DIRECTORES DE TESIS

DR. ROILAN IGLESIAS DIAZ Y DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

Por el tiempo, la confianza y el apoyo aplicado en este proyecto.

INDICE

Índice	I
Lista de tablas	IV
Lista de figuras	V
Resumen	VII

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes en el uso del biogás y la generación de energía	3
1.2.1. Producción de biogás y generación de energía en Latinoamérica	5
1.2.2. Algunos ejemplos en los estados de México en la producción de energía con biogás	7
1.2.2.1. Inicios de biogás en Chiapas	9
1.3. Planteamiento del problema	10
1.4. Objetivos e Hipótesis	12
1.5. Límites de estudio	14
1.6. Justificación	14

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Marco teórico	16
2.1.1. Biogás	16

2.1.2. Etapas de la fermentación anaeróbica	17
2.1.2.1. Características físico-químicas de la fermentación anaeróbica	19
2.1.3. Biodigestor su definición y tipos de biodigestores	28
2.1.4. Características del biogás	29
2.1.5. H ₂ S presente en el biogás, opciones para su eliminación	31
CAPÍTULO 3. MÉTODOS	33
3.1. Área de estudio	33
3.2. Diseño investigativo	34
3.3. Construcción e instalación según diseño de un biodigestor DM1 para producir el biogás que será utilizado como biocombustible en la generación de energía eléctrica	35
3.3.1. Construcción según diseño de un biodigestor DM1	35
3.3.2. Instalación de un biodigestor DM1	38
3.4. Desarrollo de un sistema de purificación y compresión de biogás (SPCB), para disminución y eliminación de impurezas del biogás.	38
3.5. Aplicación del SPCB	42
3.6. Desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando biogás en un motor de combustión interna	44
3.1.6. Construcción y acoplamiento de las partes que integran al SIGEEB	45

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
4.1. Resultados de la construcción e instalación según diseño de un biodigestor DM1	48
4.1.1. Resultados de la construcción según diseño de un biodigestor DM1	48
4.1.2. Resultados de la instalación de un biodigestor DM1	51
4.2. Resultados de desarrollo del SPCB	53
4.3. Resultados de la aplicación del SPCB	59
4.4. Resultados al desarrollo del sistema de generación de energía eléctrica utilizando biogás en un motor de combustión interna	64
4.5. Resultados de la construcción, acoplamiento y puesta en marcha del SIGEEB	68
5. CONCLUSIONES	70
6. LITERATURA CITADA	73

Lista de Tablas	Pág.
1. Tabla 2.1. Relación del metano producido con respecto al peso vivo y al tipo de animal	21
2. Tabla 2.2. Desechos más utilizados en la fermentación anaeróbica	24
3. Tabla 2.3. Tiempo de retención hidráulica según materia orgánica	25
4. Tabla 2.4. Datos promedio sobre el contenido de solidos totales de diversos desechos	26
5. Tabla 2.5. Lista de los principales inhibidores de la fermentación anaeróbica	27
6. Tabla 2.6. Composición general del biogás	30
7. Tabla 2.7. Equivalencia al combustionar 1 m ³ de biogás	31
8. Tabla 3.1. Lista de materiales necesarios para construir biodigestor DM1	36
9. Tabla 3.2. Lista de materiales necesarios para la construcción del SPCB	41
10. Tabla 3.3. Elementos eléctricos de SPCB	42
11. Tabla 4.1. Consumo de energía de equipos de SPCB	61
12. Tabla 4.2. Características técnicas del M-G	64

Lista de Figuras	Pág.
1. Figura 2.1. Esquema teórico de etapas de la biodigestion anaeróbica	19
2. Figura 3.1. Ubicación del área a realizar la investigación	33
3. Figura 3.2. Plano de conjunto general biodigestor DM1	37
4. Figura 3.3. Esquema general de SPCB	40
5. Figura 3.4. Diseño general de generación de energía eléctrica del SIGEEB	45
6. Figura 3.5. Diseño general de SIGEEB construido y acoplado	47
7. Figura 4.1. Descripción del biodigestor DM1	50
8. Figura 4.2. Vía de acceso al banco de biodigestores	52
9. Figura 4.3 Materia orgánica	52
10. Figura 4.4. Elaboración de mezcla	52
11. Figura 4.5. Bolsas de biogás	52
12. Figura 4.6. Bioabono	52
13. Figura 4.7. Partes que forman al filtro primario	56
14. Figura 4.8. Funcionamiento filtro secundario	56
15. Figura 4.9. Tercera y cuarta fase del SPCB	57
16. Figura 4.10. Vista frontal desarrollo de SPCB	57
17. Figura 4.11. Vista lateral desarrollo de SPCB	58
18. Grafica 4.1. Valores promedio medidos por el equipo multitec 540	59
19. Grafica 4.2. Sistema de compresión final de SPCB Tiempo-Presión	61

20. Grafica 4.3. Valores de biogás al final del proceso SPCB	62
21. Figura 4.12. Toma de muestras con equipo multitec 540	63
22. Figura 4.13. Equipo multitec 540	63
23. Figura 4.14. SPCB	63
24. Figura 4.15. Manómetros	63
25. Figura 4.16. Diseño general de generación de energía del SIGEEB	66
26. Figura 4.17. Tanque 1 de biogás comprimido	67
27. Figura 4.18. Tanque 2 de biogás comprimido	67
28. Figura 4.19. M-G. con gasificador	67
29. Figura 4.20. Cámara de combustión	67
30. Figura 4.21. Arrancador manual	67
31. Figura 4.22. Plano general SIGEEB	69

RESUMEN

En México existen muchas comunidades que no cuentan con requerimientos más básicos para tener una vida digna, comunidades privadas de las oportunidades y de bajo índice de desarrollo humano (IDH), por tanto son comunidades de alta marginación y pobreza. En el estado de Chiapas esta situación se repite en mayor cuantía en estas comunidades, no existen servicios básicos, como el uso de una red eléctrica o red de drenaje, con grandes problemas de salud y pobreza, por tanto se hace urgente buscar una solución de forma sustentable a tal problemática.

En el presente trabajo se muestran los resultados del desarrollo de un sistema integral de generación de energía eléctrica por medio de biogás (SIGEEB), mediante la implementación de un sistema de producción biogás en biodigestores alimentados por excretas de ganado vacuno, para proponer su uso como biocombustibles en un motor de combustión interna de gasolina, que a su vez estará acoplado a un generador eléctrico (M-G). Al producir energía eléctrica combustionando biogás se amplían las opciones de ser implementadas en comunidades rurales para mejorar el IDH de los habitantes de las mismas. El biogás se obtuvo mediante biodigestores del tipo DM1 desarrollados por el Cuerpo Académico de Energía y Sustentabilidad de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), construidos e instalados en el Centro de Desarrollo y Evaluación de Biodigestores, dentro de la misma universidad.

Se desarrolló un sistema de purificación y compresión de biogás (SPCB) que permitió la eliminación de impurezas, así como la compresión de biogás limpio y almacenados en tanques de gas Lp, para finalmente proponerse su uso como

biocombustible en la generación de energía eléctrica. Los resultados obtenidos muestran que los dispositivos actuales que funcionan a gasolina pueden ser adaptables para usar como combustible el biogás, usando materiales factibles para este cambio de combustible.

Al utilizar una tecnología limpia y amigable con el medio ambiente, como es la aplicación del SIGEEB es una opción viable para mejorar los IDH de una comunidad de alta marginación, al contar con una fuente de energía eléctrica que les ayude a solventar las necesidades más esenciales de la vida e incluso esta energía podrá ser implementada en otras actividades, como programas vinculados a la educación y salud, siendo un fuerte aliado en la lucha contra el analfabetismo y problemas de salud; llevando así a estas comunidades ventajas sociales, económicas y un apoyo a la conservación del medio ambiente.

Palabras clave: biogás, biodigestor DM1, biocombustible, purificación, generación de energía eléctrica.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

Debido a la carente situación económica y social, a la emergente situación energética a nivel mundial, es importante utilizar cada uno de los recursos energéticos renovables de la forma más eficiente posible y buscar nuevas alternativas para la generación de energía eléctrica.

La demanda energética a nivel mundial es cada día más grande prueba de ello fue el año 2010, donde la energía primaria total ofertada en el mundo (EPTO) fue de 12,715 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtpe), de las cuales tan solo una pequeña parte provienen de las energías renovables, el 13.3 % (1,685.7 Mtpe). El crecimiento de las energías renovables ha sido del 2.9 % anual de 1990 a 2010 en este periodo las energías renovables contribuyeron con el 19.4 % en la generación de energía eléctrica mundial (SENER, 2012). Muchos son los factores que han permitido la tasa de crecimiento de la energía renovable, factores como el desabasto de energía fósiles en algunos países, el encarecimiento de estos o el alto impacto ambiental de los sistemas energéticos existentes así como el desarrollo y la merma en los precios de las tecnologías de energías renovables.

Países como Alemania, España, Dinamarca, Estados Unidos, Brasil, India y China punteros de lanza en el sector de energías renovables han invertido en el desarrollo y uso de tipo de energías colocándolos en el mundo como los países más grandes en producción de energía eléctrica con fuentes renovables (SENER, 2012).

La producción de biogás y energía a nivel mundial

La producción de biogás como fuente de energía renovable puede resolver diferentes tipos de problemas ambientales, como la deforestación ocasionada por el uso de leña para cocinar. Los biodigestores, son una tecnología para producir biogás que descontaminan el agua que utilizan y producen abono orgánico. Además, captan metano y óxido nitroso, lo que ayuda a reducir gases de efecto invernadero responsables de la lluvia ácida, que son producidos y liberados a la atmósfera por la fermentación de la materia orgánica a la intemperie.

La producción de biogás en el mundo fue de 1,025 peta joules de energía (PJ) estimación para el año 2010, con un crecimiento anual de 13.5%. Los principales países en utilizar biogás como combustible en la generación de energía térmica se encuentran Japón, Estados Unidos de América, Alemania, Italia, Dinamarca, Polonia y Australia. Difundir la información sobre el uso del biogás ha permitido que la instalación de biodigestores en el mundo vaya en aumento; se estima la instalación de biodigestores en 50 millones de hogares de China y en India se construyeron 60,000 pequeños biodigestores (SENER, 2012).

La producción de energía eléctrica en México se realiza en lo fundamental con el consumo de combustibles fósiles y usando la energía hidráulica, nuclear y geotérmica.

El biogás es uno de los biocombustibles que pueden ser utilizados como alternativa para la generación de energía eléctrica al usarse como combustible en motores de combustión interna; la obtención de biogás puede realizarse de manera fácil y

económica, el cual permite que pueda ocuparse como una alternativa energética al utilizarlo como combustible, siendo accesible para la sociedad y ser un apoyo para el medio ambiente.

1.2. Antecedentes en el uso del biogás y la generación de energía

Después del incremento de los precios y continua escases de los combustibles fósiles, la obtención de combustibles para los países en vía de desarrollo es de vital importancia. Efectivamente, la crisis financiera que golpea muchos países pobres, sigue restringiendo sus capacidades de importaciones y en particular de los recursos energéticos; por tanto la búsqueda incesante de variantes para solventar esa carencia de recursos y su aplicación en vía del mejoramiento de la calidad de vida del ser humano obliga a la comunidad científica actual a buscar soluciones a los grandes problemas energéticos actuales. Una solución de alto impacto para producir energía eléctrica es mediante el uso del biogás.

Datos del 2010 indican que del total de electricidad generada a partir de biogás en el mundo que ascendió a 43.6 Terawatthora (TWh), Alemania es el país que tuvo una mayor participación 37.3% en el uso del biogás como fuente para generación de energía eléctrica, generando 16.2 TWh, seguido por Estados Unidos con el 22.4%, generando 9.8 TWh , teniendo en tercer lugar a Reino Unido con el 13.1% generando 5.7 TWh, e Italia en el cuarto, con 4.6% generado 2.0 TWh (SENER, 2012).

Alemania y la empresa Envitec biogás

Dentro de los países más importantes en avances e investigaciones sobre el biogás se encuentra Alemania. Y por consiguiente es en este mismo país es en donde se encuentra la empresa con la planta más grande de biogás en el mundo denominada EnviTec Biogas. Esta empresa está dedicada a la implementación de plantas de biogás aptas para la comercialización directa de electricidad. En un comunicado publicado el 17 de julio 2013 la empresa enunció que con sede en lohe en la baja Sajonia se instalarán tres plantas con capacidad de una potencia de 526 kw cada una y citaron "Estamos orgullosos de que podamos completar el trabajo en el tiempo estipulado, a pesar del largo invierno", a su vez Roland Kurney, EnviTec el Gerente de Proyecto, comento que estas plantas son principalmente alimentadas con un sustrato que tienen como componentes estiércol líquido y con cultivos intermedios producidos en los alrededores del lugar. Los sustratos son proporcionados por la empresa KTG Agrar AG que es una de las empresas en el sector agrícola más importantes en Europa y como matriz de KTG Energie, la empresa cultiva más de 39.000 hectáreas en Alemania y Lituania (EnviTec Biogas, 2013). Jürgen Tenbrink, Director Técnico de EnviTec Biogás Dijo: "Todas las tres plantas EnviTec están técnicamente equipados con un techo de doble membrana. La capacidad de las compañías de energía de biogás almacenables puede incrementarse desde 500 hasta 2500 metros cúbicos", todo esto se ha logrado en Alemania debido al impulso del uso del biogás y de las energías renovables en Europa y principalmente en Alemania. En un proceso de purificación más alto la empresa EnviTec biogás trata

de almacenar de suministrar a la red de gas natural el biogás producido en cada una de sus plantas (EnviTec Biogas, 2013).

1.2.1. Producción de biogás y generación de energía en Latinoamérica

Inicio de generación de energía con biogás en Argentina

En un comunicado la empresa de nombre Energía Argentina Sociedad Anónima (ENARSA), en su página de internet “Energía Argentina S.A”, enuncia la instalación de dos centrales a biogás y así la generación de energía eléctrica usando como combustible biogás en motores a gas, los cuales se encuentran acoplados a generadores de energía eléctrica, la primera de nombre “SAN MARTÍN NORTE III-A” con una generación de 5,1 MW desde el 25 de mayo de 2012 y la segunda de nombre “SAN MIGUEL NORTE III-C” de 11,5 MW, desde el 05 de octubre del mismo año, teniendo un total entre ambas centrales 16.6 MW. Este proyecto fue adjudicado a la empresa “INDUSTRIAS JUAN F. SECCO S.A.” mediante la licitación nacional e internacional n° 001/2010; el biogás para alimentar a estas dos centrales es extraído de un relleno sanitario que cuenta con un área de 120 hectáreas, denominado “COMPLEJO AMBIENTAL NORTE III DEL CEAMSE”. La planta de generación cuenta con motores Ge Jenbacher de última generación, a partir del 25 de mayo del 2012 la primera central puso a disposición 5.1MW para suministrar energía a 1,200 familias aproximadamente (Enarsa, 2012).

Muestras del uso del biogás en Perú

San Martín, localidad que forma parte de la ciudad de Tarapoto, perteneciente a la amazonia peruana, quien en lucha para conservar los sorprendentes tesoros naturales que este país mantiene, inicia un nuevo ciclo introduciendo tecnología de energías renovables en el lugar; en San Martín se construyó la primera planta de generación de energía eléctrica con biogás alimentada con 500 kg estiércol de ganado vacuno de un establo que alberga a 120 cabezas de ganado, y aunque no menciona la cantidad de energía generada el propósito es la electrificación del medio rural y según la nota mostrada en el periódico “La Republica.pe ” esta planta es la primera en su tipo en Latinoamérica. Este proyecto fue logrado gracias al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria con la participación de CORDAID y FACT Foundation (La republica.pe. Tarapoto, 2012).

Inicios de la importancia del biogás en Chile

Una nota informativa obtenida de la página web: *noticias de empresas.com* enuncia que como iniciativa para la explotación de todos los beneficios y usos del biogás la Organización de Naciones Unidas (ONU) a través de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), presentó en Chile, un manual para el uso del biogás, mostrando todos los beneficios que pueden llegar a obtener mejorando la economía y un manejo sustentable de los recursos para los agricultores de la región (Noticias de empresas.com., 2012).

1.2.2. Algunos ejemplos en los estados de México en la producción de energía con biogás.

Estado de Nuevo León.

Las aplicaciones del biogás como una fuente de energía es posible para todos aquellos que encuentren en el biogás una oportunidad energética, una oportunidad de crecimiento y esta fue una de las visiones que fueron proyectadas para el estado de nuevo león.

Ejemplo de ello es la implementación de un sistema que permite el uso del biogás en el relleno sanitario en el municipio de Salinas Victoria. Siendo este municipio el primero en Latinoamérica generando electricidad a través de la basura, utilizando biogás como combustible sustraído de un espacio de 130 hectáreas de basura que equivalen a tener 18 millones de toneladas de basura. Todo esto gracias a la vinculación de la iniciativa privada y el gobierno del estado de Nuevo León fue posible este exitoso proyecto con una generación de inicio de 7.42 MW con generación esperada de 16.96 MW en su tercera etapa del proyecto teniendo así una producción de 120 mil MW anuales, energía que es utilizada para energizar las líneas que alimentan al metro y contribuir con el 52 % del alumbrado público de la ciudad de Monterrey, energía similar a la que 34 mil casas tendrían de consumo y evitando que más 90 mil toneladas de metano lleguen a la atmosfera (Semarnat, 2010).

En la Granja Porcina Ana Margarita, unidad productiva con 1200 vientres (ganado porcino), ubicado en el municipio de Montemorelos, Nuevo León, es otro ejemplo práctico de las ventajas que pueden llegar a tener con el uso correcto de los desechos provocados por animales en granjas al ser tratados en biodigestores. En

esta productiva de ganado porcino. Se tiene un biodigestor con una producción de 20,478 m³ de biogás al día, biogás que se utiliza en dos actividades, la primera parte de la cual se quema para la contabilización de Certificados de Reducción de Emisiones y otra parte satisfacer una demanda energética generando energía eléctrica mediante un generador con capacidad de 60 kW. La energía generada es utilizada para iluminación, calefacción en las salas de maternidad y destetes, ventiladores, líneas de alimentación, laboratorio de semen y bombeo de agua (SAGARPA FIRCO, 2007).

Coahuila: En la comarca lagunera la implementación de biodigestores tiene una presencia importante debido a los múltiples aplicaciones del biogás ejemplo es que únicamente en Torreón, existen más de 20 biodigestores instalados, y uno de ellos instalado propiedad de la empresa Grupo Agrícola Vigo, el cual produce electricidad mediante la combustión del biogás, generando 110 kw, utilizando la materia orgánica producidas por las 2000 Vacas cuentan en producción, alcanzando a cubrir más del 90 % de su demanda energética dentro del establo la cual es de 120 kW (Núñez, 2009).

Chihuahua. Chihuahua residencia del Grupo Agrícola los Lujan, ubicado en Delicias Chihuahua, cuenta con 8000 vacas en producción, todos los residuos producidas en este rancho son utilizados para producir biogás y generar 1000 kW de energía eléctrica para cubrir en su totalidad la demanda energética del establo la cual es de 350 kW (Núñez, 2009).

1.2.2.1. Inicios de Biogás en Chiapas

Fundación produce Chiapas

la fundación produce Chiapas en el ejercicio comprendido en el año 2008, mostro algunos resultados en la implementación de proyectos para la transformación de energías convencionales a energías renovables con la implementación de biodigestores en comunidades para productores chiapanecos, comunidades beneficiadas tales como el Duraznal municipio de San Cristóbal, Villa las Rosas y Villa Hidalgo municipio de Villaflores, rancho el bistorí municipio de San Fernando , ejido nuevo milenio municipio de Copainalá, ejido pasoyate municipio de Villa de Acala.

La implementación de estos dispositivos fue posible gracias al proyecto bajo el nombre “Módulos de difusión de tecnología para genera biogás (biodigestor)”. Este proyecto se desarrolló con la implementación de biodigestores de plástico rígido para disponer de energía debido al tratamiento de la materia orgánica producto de las actividades agropecuarias propias en los predios. Proponiendo un apoyo al medio ambiente al tratar los residuos orgánicos, generando biogás para disminuir el consumo de leña entre otros benéficos (Fundación Produce, 2008).

Avances en biogás en la UNICACH

En entrevista realizada por el autor el día 04 de octubre de 2013, a alumnos y docentes de la UNICACH que desarrollan un proyecto de generación de biogás mediante la utilización de heces fecales y estiércol; se planteó que el proyecto incluye el desarrollo de biodigestores, los cuales transforman la materia orgánica en

energía. Por ello el coordinador de investigación de posgrado de la facultad de ingeniería de la UNICAH, Dr. Joel Moreira acosta, enunció: “podemos decir que ya no se habla de estiércol, sino de una materia orgánica en el tema”, el Dr. Moreira considera de gran importancia el cuidado del medio ambiente y dijo: “Del estiércol se genera metano que se va al ambiente y lo daña ya que está dentro de los siete gases del efecto invernadero”.

Así también se lleva a cabo la construcción del Centro de Desarrollo y Evaluación de Biodigestores, perteneciente al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables (CIDTER) adscrita a la UNICACH; este centro se enfocada al estudio y desarrollo de tecnología de biogás, al desarrollo y evaluación de sistemas de generación (biodigestores), sistemas de purificación y almacenamiento, así como el desarrollo de nuevos prototipos para la implementación de este biocombustible en nuevas aplicaciones. Este centro de investigación es el primero en usar equipos de estudio del biogás en el país, tecnología adquirida en Alemania, la cual será una herramienta de gran aporte a esta investigación.

1.3. Planteamiento del problema

En México como ya se planteó existen muchas comunidades que no cuentan con requerimientos más básicos para tener una vida digna, comunidades con bajo Índice de Desarrollo Humano (IDH) por tanto son de alta marginación y pobreza. En el estado de Chiapas existen comunidades con altos índices de analfabetismo

(CONAPO, 2010, p:17)¹, excluidos del uso de una red eléctrica o red de drenaje, con grandes problemas de salud y pobreza; por tanto se hace urgente buscar una solución de forma sustentable, que permita resolver el problema de agresión al medio ambiente provocado por los desechos de materia orgánica consecuencia de la propia actividad humana, sea un apoyo a la salud para los habitantes de estas comunidades y que ayude a combatir los bajos IDH en estas comunidades.

Uno de los grandes problemas que enfrenta el gobierno del estado de Chiapas es los bajos IDH, es por ello que en el Plan de Gobierno 2012-2018 “Chiapas Sustentable, Eje de Desarrollo, Igualdad de Oportunidades”, se considera de suma importancia impulsar un programa amplio de construcción, mejoramiento de vivienda y desarrollo urbano con base en criterios innovadores a partir del uso de nuevos materiales, tecnologías y energías alternativas. Y es de suma importancia dotar de energías alternativas a todas aquellas comunidades dispersas en la geografía chiapaneca a las cuales no es posible electrificar con energía convencional. En contribución a este plan de desarrollo en esta tesis se propone un sistema que puede ser implementado en comunidades de alta marginación en el estado de Chiapas², que permita mejorar los IDH por medio de la utilización de biogás en la generación de energía eléctrica y a su vez contribuir con el tratamiento de desechos orgánicos que usualmente son tirados a la intemperie provocando

¹ Los datos del Censo General de Población y Vivienda 2010 muestran que en México los tres estados con los mayores niveles de analfabetismo son, en orden de importancia: Chiapas (17.9%), Guerrero (16.8%) y Oaxaca (16.4%), donde entre una y dos de cada diez personas de 15 años o más no sabe leer ni escribir. (CONAPO, 2010, p:17)

² CONAPO, 2010, p:25

focos de infección (SSA, 2013)³ y usarlos para alimentar a un biodigestor obteniendo de este biogás para iniciar el proceso de generación de energía eléctrica y como un subproducto un abono rico en nutrientes. Siendo esta una alternativa para elevar la calidad de vida de las comunidades de alta marginación al sugerir su implementación para la producción de energía eléctrica, en armonía con el medio ambiente y grandes posibilidades de ingresos económicos para los habitantes de estas comunidades.

1.4. Objetivos e Hipótesis

A continuación se enuncian el objetivo general y los objetivos específicos que son la parte medular y estructuran las partes que desarrollan a esta investigación, así también se exponen las hipótesis planteadas en este trabajo

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de sistema de generación de energía eléctrica utilizando como combustible biogás en un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico.

1.4.2. Objetivos específicos

1.- Construir e instalar según diseño un biodigestor DM1 para producir el biogás que será utilizado como biocombustible en la generación de energía eléctrica.

³ En el 2001, la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su Informe Mundial de la Salud, indicó que el 3.7% de la carga de todas las enfermedades en el mundo se debió a la falta de agua limpia, saneamiento básico y hábitos e higiene adecuados. Informe de la secretaria de salud (SSA), 2013.

2.-Desarrollar un sistema de purificación y compresión de biogás (SPCB), para disminución y eliminación de impurezas del biogás.

3.- Aplicar el SPCB desarrollado para disponer de biogás libre de H₂S y su aplicación en el motor de combustión interna.

4.- Desarrollar un sistema de generación de energía eléctrica utilizando biogás en un motor de combustión interna.

5.- Construir y acoplar las partes que integran al sistema integral de generación de energía eléctrica por medio de biogás (SIGEEB).

1.4.3. Hipótesis

1. Se puede desarrollar un sistema de purificación y compresión de biogás (SPCB) eficiente y de fácil manejo, que permita obtener como producto final biogás libre de impurezas y comprimido en tanques portátiles a alta presión, para finalmente proponer su uso como combustible en la generación de energía eléctrica.
2. La implementación de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando biogás en un motor de combustión interna es viable con mínimas adaptaciones.

1.5. Límites del estudio

Las fronteras de este estudio estarán contempladas en la propuesta del desarrollo de un sistema integral de generación de energía eléctrica (SIGEEB) utilizando como combustible biogás y su propuesta para futuras aplicaciones.

1.6. Justificación

Los desechos orgánicos que genera una comunidad generalmente son tirados a la intemperie provocando focos de infección, contaminación de mantos acuíferos, entre muchos problemas de salud y ecológicos. El sistema Integral de Generación de Energía Eléctrica por medio de Biogás (SIGEEB), permitirá implementar una tecnología limpia y amigable con el medio ambiente para la producción de energía eléctrica de forma sustentable al encontrar una oportunidad energética de un problema en materia de salud y de carácter ambiental, al dar tratamiento a los desechos provocados por la actividad humana en biodigestores, produciendo biogás y utilizándolo para generación de energía eléctrica. SIGEEB permitirá mejorar los IDH de las comunidades rurales al contar con una fuente de energía eléctrica que les ayude a solventar las necesidades más esenciales de la vida e incluso esta energía podrá ser implementado en otras actividades como programas vinculados a la educación y salud siendo un fuerte aliado en la lucha contra el analfabetismo y problemas de salud. Por tales condiciones la propuesta del SIGEEB está en apego al “Plan de Gobierno 2012-2018 Chiapas Sustentable, Eje De

Desarrollo, Igualdad de Oportunidades”, propuesta la cual brinda una oportunidad para obtener ventajas sociales y económicas a las comunidades de alta marginación, comunidades con las que cuenta el estado de Chiapas, ya que podrán contar con una fuente de energía limpia que podrá implementarse en actividades en la vida cotidiana de la comunidad (Plan de desarrollo, 2012).

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Biogás

Las primeras menciones sobre biogás se remontan a los años 1.600 pero fue hasta el año 1776 cuando el científico italiano Volta descubrió que el principal componente del biogás era el metano, 100 años después se descubrió el origen microbiológico de la formación del metano (Kaiser et al. 2002). En el año 1886 el científico comprobó la formación de metano a partir de acetato al igual que lo comprobó en 1887 el científico Hoppe-Seyler. Así mismo, tan solo un año después en el año 1888 que el científico Gayon obtuvo biogás mezclando boñiga (estiércol ganado vacuno) con agua, a una temperatura de 35°C. En el año 1890 se construye el primer biodigestor a escala real en la India y ya en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los biodigestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad. Tras las guerras mundiales comienza a difundirse en Europa las llamadas fábricas productoras de biogás cuyo producto se empleaba en tractores y automóviles de la época. En 1906 Soehngen descubrió la formación de biogás (metano) a partir de hidrógeno y dióxido de carbono (Kaiser et al. 2002)

El biogás es un biocombustible producto de la transformación de la materia en energía en un proceso anaeróbico en presencia de agua. La Fermentación Anaeróbica es el proceso tiene como característica principal la ausencia de

oxígeno. En este proceso se descompone la materia orgánica, en un recipiente diluido en agua, produciendo lo que se conoce como biogás. (Villamil et al., 2000).

La producción de biogás puede llevarse a cabo en reactores denominados biodigestores el cual podemos definir como el reactor que transforma la materia orgánica en energía en un proceso anaeróbico en presencia de agua. En el proceso anaeróbico deben de cumplirse ciertos procesos en condiciones especiales, como es el caso de la fermentación anaeróbica.

2.1.2. Etapas de la fermentación anaeróbica

Dentro de los procesos anaeróbicos (en ausencia de oxígeno), más del 90 % de la materia orgánica puede llegar a convertirse en productos denominados intermediarios (ácidos orgánicos y alcoholes) y posteriormente convertirse en metano (CH₄), dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, amonio. Logrando una degradación o reducción en el volumen de la materia orgánica contaminante en un 30% en un tiempo de retención de 30 días (Dias y Cesar, 2006). A continuación se muestran las principales etapas de la fermentación anaeróbica:

Etapas hidrolisis: En esta etapa las grasas y aceites contenidas en la materia orgánica a través de una reacción enzimática es hidrolizada por la acción de enzimas producidas por bacterias hidrolíticas, facultativas, son partidos y transformados de triglicéridos a ácidos grasos de cadena mediana y dióxido de carbono en una primera etapa (Dias y Cesar, 2006).

Etapa acidogénesis: Los compuestos simples solubles de la primera etapa sufren un proceso de fermentación que los convierten en ácidos y alcoholes de cadena corta (volátiles). Estas bacterias formadoras de ácidos, llamadas acidogénicas son también facultativas, es decir viven tanto en presencia como ausencia de oxígeno, en esas dos primeras etapas ocurre poca estabilización de DBO o DQO (demanda bioquímica de oxígeno) (Carrillo, 2003).

Etapa acetogenesis: en este proceso en lo esencial las moléculas provenientes de la acidogenesis son captadas para emplearlas por los microorganismos acetogenos y así se produce acetato, dióxido de carbono e hidrogeno (Schlegel y Zaborosch, 1993).

Etapa metanogénesis: En esta etapa los ácidos orgánicos simples producidos en la etapa anterior, devienen en substratos para la descomposición, estabilización y producción de metano mediante la producción de bacterias metanogénicas, estrictamente anaeróbicas los compuestos producidos en las etapas anteriores son transformados a metano y dióxido de carbono, principalmente (Davis y Masten, 2005). La acción de las metanobacterias o bacterias metanogénicas en la tercera etapa es el factor clave para el desarrollo de la fermentación anaeróbica, pues estos microorganismos son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura, viven solo en un rango muy estrecho de pH (6.6- 8.0). Además son sensibles a la toxicidad de ciertos materiales reduciéndose o hasta paralizándose la digestión (Soube, 1994). En la Figura 1 se muestra el proceso teórico que ocurre en la biodigestión anaeróbica.

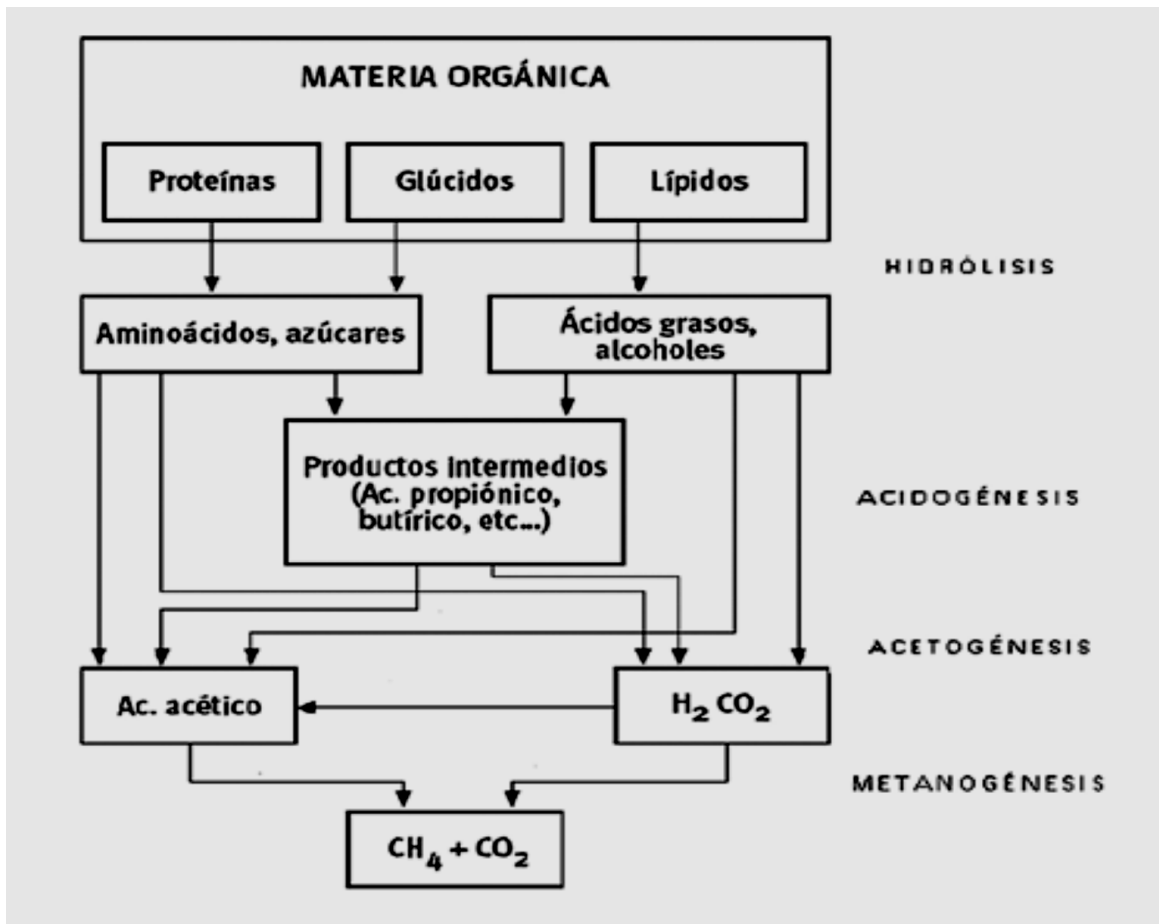


Figura 2.1. Esquema teórico de etapas en la biodigestion anaeróbica (Tchobanoglous, 1994).

2.1.2.1. Características físico-químicas de la fermentación anaeróbica

Los factores físico- químicos más importantes, que influyen en la fermentación anaeróbica son: Tipo de sustrato (tipo de materia orgánica disponible), temperatura, el pH, la relación C/N del sustrato, el tiempo de retención hidráulica (TRH), el porcentaje de sólidos totales y la agitación o mezclado (Carrillo, 2003). A continuación la descripción de estos factores

Tipo de materia prima: Al hablar de materia prima en el tema de biogás nos referimos a materia orgánica, esta es toda aquella materia de la que se disponga para ser depositados en el Biodigestor, para iniciar el proceso de fermentación anaeróbica mencionado anteriormente, la materia orgánica disponible son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganadería, actividad agrícola, etc.

Las materias primas fermentables, puede ser: excrementos de animales y humanos, aguas cloacales o residuales orgánicas de las industrias químicas o derivadas por ejemplo, de la producción de alcohol, alimentos en general, biomasa a partir de restos de cosechas y basuras de diferentes tipos. El proceso microbiológico no sólo requiere de fuentes de carbono y nitrógenos, también, deben estar presentes, en un cierto equilibrio, sales minerales tales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores Normalmente, las sustancias orgánicas como estiércoles y lodos cloacales, presentan estos elementos en proporciones adecuadas.

Otras sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, comportado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas (Ávila, 2009).

En la siguiente tabla 2.1 se enfatiza en lo referente a los principales estiércoles animales; debido a que el volumen producido y su degradación son variables y que dependerán fundamentalmente del tipo de animal, peso, alimentación y del manejo que se le dé a los mismos en el sitio, se citan algunos valores promedio

Tabla 2.1. Relación del metano producido con respecto al peso vivo y al tipo de animal, (Ávila, 2009).

Especie	Peso vivo	Kg Estiércol/Día	L/kg. S.V.	% CH ₄
Cerdos	50	4.5 - 6	340-550	65-70
Vacunos	400	25 - 40	90-310	65
Equinos	450	12 - 16	200-300	65
Ovinos	45	2.5	90-310	63
Aves	1.5	0.06	310-620	60

Temperatura: El proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15 hasta 55 °C. Sin embargo, para que más bacterias formadoras de metano trabajen en forma óptima, se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilen entre 33 y 38 °C dependiendo del tipo de bacterias que se adapten y desarrollen (Obando, 1991).

En la práctica, sobre todo en pequeños sistemas instalados en el medio rural, no se controla la temperatura del proceso, y se trabaja a temperatura ambiente, sin proporcionar calor al digestor. Una forma de aumentar la temperatura de operación y con ello la cantidad de biogás producido, es calentar el agua con la que se va a efectuar la mezcla, esto es porque el crecimiento microbiano es mucho más rápido a altas temperaturas, por ejemplo en calentadores solares. En la mayoría de los casos los digestores se construyen enterrados para evitar que se pierda mucho calor. Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen tres rangos de

temperatura, el rango Psicrófilico entre 10 y 20 °C, el mesófilico de 30 a 40 °C y el termófilico de 55 a 60 °C. (Kennedy y Berg, 1982).

El pH: El pH (potencial hidrógeno) de un medio caracteriza la acidéz (de 0 a 7) o la alcalinidad (de 7 a 14) de dicho medio. El valor normal de funcionamiento de una planta de biogás está entre 7 y 8 (neutro). Cuando la planta de biogás está recién funcionando, el ácido comienza hacer la primera actividad, reduciendo el pH por debajo de 7 (aumentando el contenido de ácido). Las bacterias metanogénicas luego, empiezan usando estos ácidos, aumentando el pH a neutro. En una planta de biogás, el nivel del pH, es controlado por el mismo proceso. El CO₂ producido por las bacterias disueltas en agua, forman iones de bicarbonato (HCO₃⁻), lo cual causa que la solución se torne ligeramente alcalina. La cantidad de bicarbonato en la solución depende de la concentración de dióxido de carbono y de la cantidad de ácidos de la carga inicial. (Hayes et al., 1979).

El pH de la mezcla es fácil de calcular, usando un pHmetro o con pequeñas tiras que usa como indicador un color determinado a cierto valor de pH según la sustancia a evaluada. Si el medio es demasiado ácido, detiene la actividad de las enzimas y si es demasiado alcalino las fermentaciones producen hidrógeno e hidrógeno sulfhídrico (H₂S). Con un pH entre 6.6 y 7.6 la digestión funciona, estando el óptimo entre 7 y 7.2 (Hayes et al., 1979).

Relación Carbono/Nitrógeno (RC/N): Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometido a un proceso de descomposición mediante la fermentación anaeróbica, la cantidad y calidad del biogás producido dependerá de la composición de la materia orgánica, del tipo materia utilizado, pH de la mezcla,

temperatura, TRH, cantidad de sólidos totales en la mezcla y RC/N. Como se enuncia en (Solari, 2004) el carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células.

Las bacterias formadoras de metano consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima es de 30. Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de biogás se verá limitada; al estar presente el nitrógeno en exceso, se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso de biodigestión.

Entre las principales materias primas que se usan para la generación de biogás, están los desechos animales (estiércol), cuya relación C:N es siempre menor que la óptima, debido a que tiene un contenido importante de nitrógeno. Otro tipo de materia orgánica muy usado son los residuos agrícolas, los que generalmente, tienen relaciones C:N muy altas, por su bajo contenido de nitrógeno, por lo que casi siempre se mezclan con desechos animales o se les agrega un compuesto nitrogenado, como puede ser urea para lograr una correcta relación C:N. Si hay demasiado carbón en la materia a fermentar, el proceso se hace más lento y tiende a acidificarse. Si hay demasiado nitrógeno, éste se perderá como amoníaco, aumentando el valor del pH en la mezcla y reduciendo el poder fertilizante y nutriente al final del proceso. (Solari, 2004). A continuación en la tabla 2.2 se

muestran los desechos o materia orgánica más utilizados en la fermentación anaeróbica para la producción de biogás.

Tabla 2.2. Desechos más utilizados en la fermentación anaeróbica (Solari, 2004).

Características	carbono (seco) %	Nitrógeno (seco) %	C/N
Vacuno	32	1.5	21
Ovinos	60	3.7	16
Equinos	47	2.4	20
Porcinos	73	2.6	28
Gallináceas	70.2	3.7	12
Conejo	47.2	0.7	23
Aguas Residuales	-	-	11

Tiempo de retención hidráulica: Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende directamente de la temperatura, ya que a mayores temperaturas el tiempo de retención (TRH) requerido para obtener una buena producción de biogás es menor. (Noyola y Monroy, 1994).

En un biodigestor que trabaja a régimen estacionario, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga. En un sistema de carga diaria, el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga Vcd que será necesario llenar al biodigestor, ya que se tiene la siguiente relación (Solari, 2004):

$$\text{Volumen De Carga Diaria (Vcd)} = \frac{\text{volumen del biodigestor (Vb)}}{\text{TRH}}$$

Despejando obtenemos:

$$\text{TRH} = \frac{\text{volumen del biodigestor (Vb)}}{\text{Volumen De Carga Diaria (Vcd)}}$$

Ávila (2009) enuncia que “el límite mínimo de los T.R.H está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas, y enuncia algunos valores según el tipo de sustrato”. Cabe mencionar que estos datos pueden variar si la temperatura aumenta o disminuye tomando como TRH mínimo para que se efectúe el proceso de biodigestión. A continuación se muestran en la tabla 2.3 los valores de TRH en días según materia prima

Tabla 2.3. Tiempo de retención hidráulica según materia orgánica (Ávila, 2009)

Materia prima	TRH (en días)
Estiércol vacuno líquido	20 - 30
Estiércol porcino líquido	15 - 25
Estiércol aviar líquido	20 - 40

Contenido de Sólidos Totales: Toda la materia orgánica está compuesta principalmente de agua y una fracción sólida, esta última se le denomina sólidos totales (Solari, 2004), al porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla, mezcla con que se llenara o cargara el biodigestor, esto es de suma importancia debido a que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos totales, por lo tanto puede verse afectada la eficiencia del proceso y no se lleve a cabo en forma satisfactoria, afectando directamente a la producción de biogás. Datos se ha demostrado que una carga que contenga entre 7 y 9% de sólidos totales (Solari, 2004) es posible para una óptima biodigestión de la materia orgánica.

En la siguiente tabla 2.4 se muestran la relación del porcentaje de sólidos totales y la cantidad de agua necesaria para llegar a un 8% de sólidos totales, que sería la ideal para una correcta biodigestión.

Tabla 2.4. Datos promedio sobre el contenido de Sólidos Totales de Diversos Desechos (Solari, 2004).

Material	Sólidos totales %	Litros de agua por kg. de desecho para obtener un 8 % de sólidos totales l/kg
Heces humanas	17	1.1
Estiércol de vaca	20	1.5
Caballos Bueyes y Mulas	25	2.1
Cerdos	18	1.3
Ovejas	32	3
Gallinas	44	4.5

Agitación – mezclado: La principal razón para la agitación y mezclado constante de la materia orgánica dentro del biodigestor es la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana existente dentro del reactor, evitar la formación de costra o nata que se forma dentro del biodigestor, uniformar la mezcla y con ello hacer homogénea la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica.

Existen varias opciones para lograr que la agitación dentro del sustrato sea la correcta, puede llevarse a cabo con agitadores mecánicos que se mueven manualmente o por medio de motores, con bombas que recirculan la mezcla (bombas de lodo), inyectores de presión para romper la capa interna formada o en el caso de biodigestores flexibles la agitación del mismo reactor.

Es de suma importancia cuidar la presencia de determinadas sustancias y concentraciones de metales pesados, antibióticos y el detergentes, como se muestra en la tabla 2.5, pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo y con ello la producción de biogás. Ácidos volátiles en concentraciones superiores a 2000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3600 ppm para la termofílica inhibirá la biodigestión, como así una elevada concentración de Nitrógeno y Amoníaco pueden destruir las bacterias metanogénicas.

Tabla 2.5. Lista de los principales inhibidores de la fermentación anaeróbica (Ávila, 2009)

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5.000 ppm
NO ₃	0.05 mg/ml
Cr	200 mg/ml
Cn (Después de aclimatación de las bacterias)	25 mg/ml
Na	3.500-5.500 mg/ml
Ca	2.500-4.500 mg/ml
NaCl	40.000 ppm
Cu	100 mg/ml
Ni	200-500 mg/ml
Detergente sintético	20-40 mg/ml
k	2.500-4.500 mg/ml
Mg	1.000-1.500 mg/ml

2.1.3. Biodigestor su definición y tipos de biodigestores

Para poder llevarse a cabo el proceso de biodigestión anaeróbica es necesario sea realizado en un reactor denominado biodigestor, el cual lo definió como el dispositivo o reactor que transforma la materia orgánica en energía en un proceso anaeróbico en presencia de agua, obteniendo dos productos de este, el primero es el biocombustible denominado biogás definido anteriormente y el segundo un bioabono de abundantes nutrientes para la agricultura.

Desde el surgimiento del primer biodigestor, se han inventado y probado varios modelos de plantas de biogás, con el objetivo de aumentar la eficiencia y bajar los costos de los mismos, dentro de los modelos principales destacan los de flujo continuo (tipo hindú y Taiwán) o de estanque o Batch (tipo chino), para uso particular o comunal (Kaiser et al., 2002), y los de laguna, estos últimos usados para biodigestores a gran escala (Pedraza et al., 2002). Para elegir el tipo de biodigestor a usar se deben tener en cuenta las condiciones climáticas en la que se desea construir y la disponibilidad económica y de materia orgánica degradable (Coto y Maldonado 2005). A continuación se enuncian de los principales biodigestores más usados

Biodigestor tipo hindú: Según Sosa (1999) el modelo de biodigestor de origen en la India, en la década de 1950 y funciona por un sistema de flujo continuo, lo que diferencia el modelo hindú del modelo chino, es que tiene como depósito de biogás una campana flotante sellada con agua. Esa campana o cúpula puede subir o bajar dependiendo de la cantidad de biogás que se produce por un aumento o disminución en la presión interna del biodigestor.

Biodigestor tipo chino: Argumenta Sosa (1999), que este tipo de biodigestor tiene origen en la China en la década de 1960. Era usado para la producción de biogás, pero principalmente para la producción de fertilizante orgánico con baja contaminación de microorganismos patógenos y se han instalado más de siete millones de biodigestores de ese tipo en China.

Biodigestor tipo Taiwán o tailandes: Descrito por (Botero y Aguilar, 2002) fue en el año 1985 en Taiwán fue probado por primera vez el biodigestor tipo taiwán, este modelo está difundido en varios países del Sureste Asiático y Latinoamérica actualmente es usado por productores. Este tipo de biodigestor tiene forma de tubo o de salchicha de forma cilíndrica permitiendo procesar una mayor cantidad de materia orgánica.

2.1.4. Características del biogás

Existe una infinidad de definiciones del concepto de biogás, para nuestro estudio lo definimos como un biocombustible producto de descomposición de la materia orgánica en un proceso anaeróbico en presencia de agua, obteniendo un biocombustible compuesta de una mezcla de gases entre ellos metano CH_4 , dióxido de carbono CO_2 , hidrogeno H_2 , nitrógeno N , ácido sulfhídrico H_2S y oxígeno O_2 , descritas en orden de mayor a menor porcentaje en volumen dentro de la mezcla. Como enuncia (Gutiérrez et al., 2012), la aplicación o el uso que se le dará al biogás será según la calidad del mismo (Ávila, 2009) y los porcentajes de biogás son

variables según su origen, debido a ello en la tabla 2.6 se enuncia los siguientes valores.

Tabla 2.6. Composición general del biogás (Gutiérrez et al., 2012 y Ávila, 2009).

Gas	Porcentaje
Metano	50 – 70
Dióxido de carbono	30 – 50
Nitrógeno	0.5 – 3
Ácido sulfhídrico	0.1 – 2
Vapor de agua	Trazas
Hidrogeno	1 – 2
Oxigeno	1

Debido a que el biogás posee un poder calorífico de 4500 a 6500 kcal/m³, puede ser utilizado como cualquier otro combustible, tanto para la cocción de alimentos (para sustituir cualquier combustible comúnmente utilizado), como para el alumbrado mediante lámparas adaptadas al biogás, en losas incandescentes calentando agua y hacerla fluir por tuberías de agua, generación de energía eléctrica al ser combustionado en motores de combustión interna, entre otras formas. Las mezclas de biogás con aire, en una relación 1:20, forman un gas detonante altamente explosivo, lo que permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados. Con un contenido de metano mucho menor de 50 %, el biogás deja de ser inflamable. (Dias y Cesar, 2006).

El elemento a combustionar en el biogás es el metano cuyo puntos de fusión y ebullición se producen a temperaturas muy bajas (p.f. -183°C, p.e. -161.5°C), es por eso que el metano se considera que es un gas a temperatura ambiente (UNAM,

2000). En la siguiente tabla 2.7 se muestran los datos de la capacidad al combustionar un metro cubico de biogás y un ejemplo de aplicación

Tabla 2.7. Equivalencia al combustionar 1 m³ de biogás (Gutiérrez et al., 2012)

1.25 Kw/h	De electricidad
6 horas	De luz con 1 bombillo de 60 watts
Mantener encendido durante 1 hora	1 refrigerador de 1m ³ de capacidad
Mantener funcionando 2 horas	1 motor de 1 hp

2.1.5. H₂S presente en el biogás, opciones para su eliminación

El biogás posee ácido sulfhídrico (H₂S) en su composición, el cual es tóxico si es respirado. El H₂S es un gas inflamable, incoloro, con un olor característico a huevos podridos, las personas pueden detectar su olor a niveles muy bajos. Se le conoce comúnmente como ácido sulfhídrico o gas de alcantarilla. Este gas es como resultado de la degradación bacteriana de materia orgánica y de la fermentación de los desperdicios de animales y humanos. El ácido sulfhídrico también puede ser producido por actividades industriales, tales como procesamiento de alimentos, fábricas de papel, curtidurías y refinerías de petróleo El H₂S tiene carácter corrosivo, especialmente en las condiciones de alta temperatura y presión, puede corroer los equipos de metal, y cuando se quema produce gas dióxido de azufre (SO₂) que también es un gas ácido fuerte con carácter corrosivo y tóxico para el sistema respiratorio, el nivel erosivo del H₂S es 2.5 mm/año (ATSDR, 2004). También el H₂S

es altamente corrosivo al reaccionar con el agua, convirtiéndose en ácido sulfúrico (H_2SO_4) productor de la lluvia ácida, causando corrosión severa en las partes metálicas utilizadas en los equipos para el aprovechamiento del biogás (Gutiérrez et al., 2012). Es por ello que se necesitan opciones prácticas y de bajo costo, que permitan captar al H_2S , retirándolo del biogás.

2.1.5.1. Métodos de purificación de biogás

Los métodos de purificación de biogás para la disminución o eliminación de H_2S se encuentran en los siguientes procesos: Proceso seco de oxidación, proceso de oxidación en fase líquida, separación por membranas, procesos de lavado, procesos biológicos (Morero et al., 2010), por mencionar los más importantes ya que existen procesos nuevos en evaluación.

Actualmente existen varios métodos dentro de los procesos anteriormente mencionados (físicos, químicos y biológicos) disponibles para la remoción del H_2S . Algunos ejemplos de aplicaciones prácticas son: limadura de hierro y esponjas de hierro, filtros con óxido de calcio, hidróxido de potasio impregnado con carbón activado, haciendo burbujear el biogás y a contra corriente en agua, o bien introduciendo aire, entre el 3 % al 5 % del volumen del depósito para el biogás (Morero et al., 2010).

CAPÍTULO 3. MÉTODOS

Para la generación de energía eléctrica combustionando biogás previamente obtenido de la fermentación de sustrato tratados en un biodigestor, es necesario una serie de pasos y requerimientos para llegar como producto final a la generación de energía eléctrica, los cuales serán enunciados a continuación.

3.1. Área de estudio

La siguiente investigación tendrá lugar en el Centro de Desarrollo y Evaluación de Biodigestores, perteneciente al (CIDTER) dichas instalaciones adscritas a la UNICACH, se asignara un área de construcción e instalación de los dispositivos a usar, así como de un área para realizar las evaluaciones necesarias para esta investigación. A continuación se muestra en la figura 3.1 un mapa de la localización del lugar



Figura 3.1. Ubicación del área a realizar la investigación

3.2. Diseño Investigativo

Una de las partes medulares de esta investigación es el desarrollo por separado de cada parte que integra al SIGEEB, debido a que cada parte es esencial para el óptimo funcionamiento de todo el proceso, para ello fue necesario delimitar cada función a realizar en cada etapa, para obtener como producto final la generación de energía eléctrica combustionando biogás. El SIGEEB incluye la instalación del sistema de generación de biogás que comprende la construcción e instalación según diseño del biodigestor DM1, los dispositivos de pre-tratamiento (materia orgánica) y post-tratamiento de los substratos (abono orgánico o bioabono), los sistemas de colecta y almacenamiento de biogás con todos sus elementos en su estado natural, todo ello como parte del sistema de generación de biogás. A su vez Desarrollar y usar un sistema de purificación y compresión de biogás (SPCB), para la disminución y eliminación de impurezas presentes en el biogás, para eliminación de H₂S principalmente ya que el uso de este elemento es corrosivo en dispositivos con partes metálicas. Por último el desarrollo de un sistema integral de generación de energía eléctrica, que acoplada en todas sus partes obtenga como producto final la generación de energía eléctrica combustionando biogás.

3.3. Construcción e instalación según diseño de un biodigestor DM1 para producir el biogás que será utilizado como biocombustible en la generación de energía eléctrica.

3.3.1. Construcción según diseño de un biodigestor DM1

La instalación del sistema de generación de biogás comprende el biodigestor, para ello es necesario la construcción del mismo, el tipo de biodigestor que se eligió fue Dm1, dispositivo que transforma la materia orgánica en un biogás y bioabono a través de un proceso anaeróbico en presencia de agua. Este dispositivo está hecho de polipropileno de alta densidad con forma similar a un tinaco, con una entrada de la mezcla de materia orgánica y agua, otra para la salida y recolección del bioabono, además de una toma de muestras de pH y temperatura, así como una para la salida del biogás generado.

El diseño de los biodigestores DM1 fue desarrollado en el Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables de la UNICACH. A continuación se ofrece una lista de materiales básicos necesarios para la construcción del biodigestor DM1.

Tabla 3.1. Lista de materiales necesarios para construir biodigestor DM1.

Materiales	Descripción
Tinaco 1100L	Sistema que funciona como cámara de biodigestión de la materia orgánica
Tubería PVC hidráulico (hco) 0.10 m de diámetro	Tubería que sirve para la entrada y salida de materia orgánica (mezcla).
Conexiones, codos, coples, conectores rosca interior y exterior (CRI,CRE) todos de PVC hco y de 0.10 m de diámetro	Sistema que permite mantener en sistema anaeróbico en la entrada y salida de materia orgánica
Tubería PVC hco 0.018 m de diámetro y 1.50 m de largo	Tubería que forma parte del sistema de remoción para la agitación y mezclado constante de la mezcla dentro del reactor
Aspas de PVC hco de 0.10 m de diámetro	Tubería que forma parte del sistema de remoción para la agitación y mezclado
Tubería PVC hco 0.018 m de diámetro y 1 m de largo	Sistema que permite toma de muestras de mezcla para medir el valor de pH dentro del reactor.
Termómetro	Dispositivo que indico la temperatura interna del biodigestor
Bolsa de Geomembra	sistema de almacenamiento de biogás con todos sus componentes
Tubería PVC hco 0.018 m de diámetro	sistema que se usa para la conducción de biogás
Válvulas PVC hco 0.018 m de diámetro	Sistemas que funcionan como compuertas para el flujo a la salida de biogás

Después de obtener todos los materiales recabamos al plano de conjunto general del biodigestor DM1 según el diseño, el cual se muestra en la figura 3.2 para su construcción.

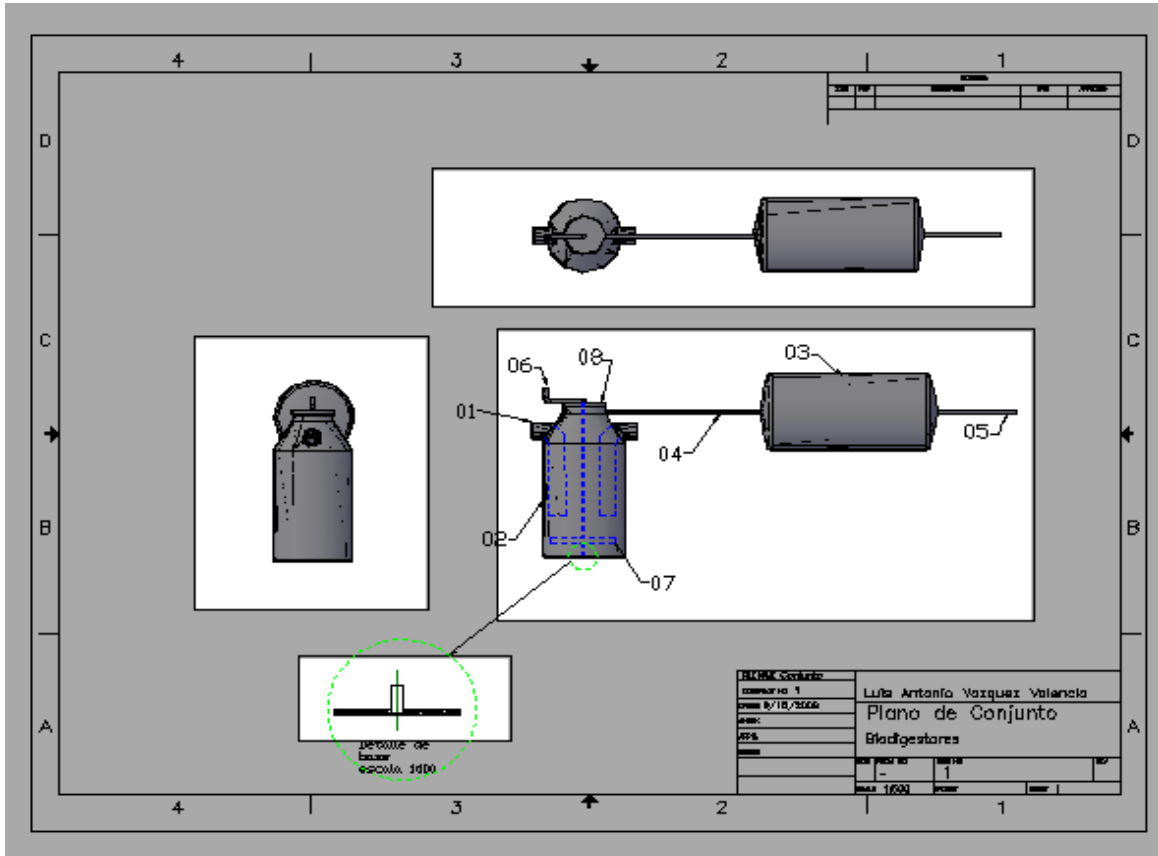


Figura 3.2 Plano de conjunto general biodigestor DM1

Partes: **1.**Entrada de mezcla, **2.**Tubería entrada (para la mezcla ingrese al fondo del reactor) y salida (abono orgánico), **3.**Bolsa de Geomembrana (almacenar biogás), **4.**Tubería para conducción de biogás, **5.**Tubería salida de biogás, **6.**Parte superior del sistema de remoción, **7.**Parte inferior del sistema de remoción, **8.**Sistema de almacenamiento primario de biogás en el biodigestor DM1.

3.3.2. Instalación de un biodigestor DM1

Posterior a la construcción del biodigestor DM1, se llevará a cabo la instalación del mismo, dentro de las instalaciones de la UNICACH para el manejo y monitoreo de la instalación, se tendrá en cuenta que el dispositivo este enterrado y en contacto con el sol y bajo una vía de acceso que permita el llenado del reactor y recolección de bioabono para su posterior uso. Se requiriere para el abasto del biodigestor de 300 L de residuos o estiércol de ganado vacuno y 450 L de agua previamente mezclados, ósea a razón de 1: 1.5 (Solari, 2004), finalmente se verterán 750 L de mezcla homogénea (materia orgánica + agua); el reactor se llena entonces a una capacidad entre del 70 % de su capacidad.

Trascurrido 25 días RTH comienza la generación de biogás, debe generarse aproximadamente de 5 a 6 m³ de biogás con dicha carga (Botero y Thomas, 1987). El biogás generado se conducirá hacia el SPCB diseñado con el objetivo de eliminarle las impurezas y comprimirlo, que en un aparto siguiente se muestra al detalle.

3.4. Desarrollo de un sistema de purificación y compresión de biogás (SPCB), para disminución y eliminación de impurezas del biogás.

El biogás posee ácido sulfhídrico (H₂S) en su composición, el cual es tóxico si es respirado. El H₂S tiene carácter corrosivo, especialmente en las condiciones de alta temperatura y presión (ATSDR, 2004), ya que en el proceso de generación de

energía eléctrica el biogás será suministrado a un motor de combustión interna el cual cuenta con partes metálicas, es de suma importancia eliminarlo de la mezcla de biogás para que sea usado en el proceso. También se pretende en este proceso de purificación disminuir la cantidad de CO_2 presente en el biogás, para tener la mayor cantidad en volumen de CH_4 , y además no expulsarlo a la atmosfera a sabiendas que es un gas de efecto invernadero.

Como se mencionó anteriormente existen varios métodos de purificación de biogás fundamentalmente para la disminución y eliminación de H_2S entre ellos se encuentran: Proceso seco de oxidación; proceso de oxidación en fase líquida, separación por membranas, procesos de lavado, procesos biológicos (Morero et al., 2010).

Para el proceso de esta investigación se desarrollará un sistema de purificación y compresión de biogás (SPCB) el cual consta de cuatro fases.

En La primera fase la cual está es destinada al filtrado de H_2S mostrada en la figura 4.9, posee un filtro denominado “filtro primario” para la disminuir el por ciento de H_2S , este es un filtro estará construido por policloruro de vinilo (PVC) hidráulico (hco) de 0.10 m de diámetro y 0.80 m de largo con una entrada y salida para biogás de 0.018 m de diámetro, en el interior de este se depositan 3.5 kilogramos de limaduras de óxido férrico (F_2O_3) previamente tratadas para su aplicación en el tratamiento de biogás (Cepero et al. 2012).

La segunda fase destinada a la disminución de CO_2 y eliminación residual de la fase 1 del H_2S también mostrada en la figura 3.2 consta de otro filtro denominado “filtro secundario”, del mismo material y dimensiones que el primario, pero con una

entrada y salida para biogás de 0.0190 m de diámetro y una entrada y salida para agua de 0.0125 m, que permita mantener un volumen constante de cuatro litros de agua dentro de este filtro (50 % de su capacidad).

Para la tercera fase es necesario utilizar un filtro de humedad, que absorberá el agua o humedad residual que contenga aún el biogás, este es un filtro que se utiliza en aplicaciones de refrigeración.

Para la última etapa son necesarios dos elementos de vital importancia, el primero una bomba de recirculación de agua por el filtro secundario y el segundo un compresor para la compresión del biogás libre de impurezas, los cuales son equipos de bajo consumo de energía eléctrica, el consumo eléctrico de estos equipos se enuncian en la tabla 3.3. A continuación se muestra el esquema general del SPCB en la figura 3.3 y la lista de materiales que son necesarios para la construcción en la tabla 3.2.

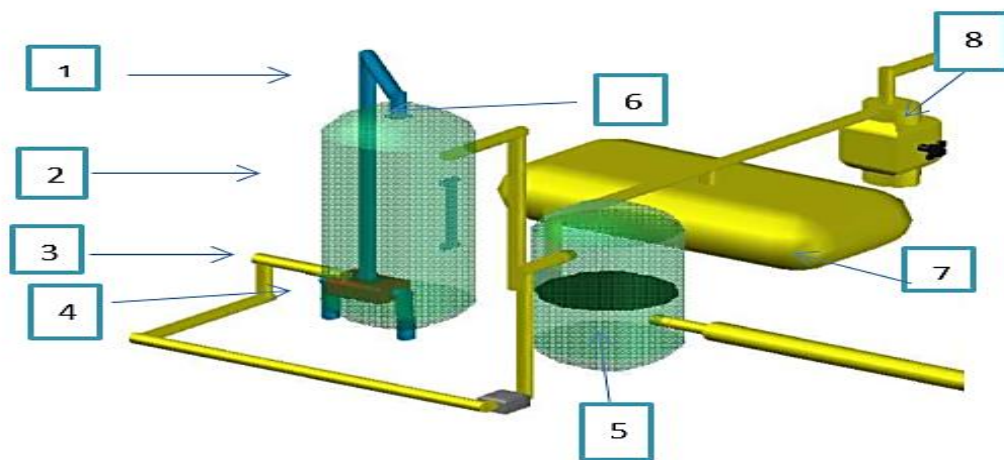


Figura 3.3. Esquema general del SPCB.

Partes: 1.Tubería de agua a presión, 2.Filtro húmedo para eliminación H₂S y CO₂, 3.Tubería de entrada de biogás, 4. Bomba de agua, 5. Filtro seco eliminación de H₂S, 6.Esparciador de agua a presión, 7. Almacenamiento de biogás comprimido, 8.Compresor de biogás

Tabla 3.2. Lista de materiales necesarios para la construcción del SPCB.

Material	Parte del sistema
Tubo PVC hco para gas	Tubería para conducción de biogás.
Tubo PVC hco para agua	Tubería para conducción de agua en filtro secundario.
Tubo PVC hco 0.1 m de diámetro con tapa	Filtro primario y filtro secundario.
Bomba de agua de 1/2 hp	Necesario para hacer circular agua en el filtro secundario correspondiente a la fase 2 del sistema
Tanque plástico de 20 L de capacidad	Recipiente para depósito de agua necesario en el filtro secundario.
Limaduras de óxido férrico (Fe ₃ O ₂)	Contenido en el filtro primario.
Regadera de agua con un diámetro de entrada de 0.0125 m	Sistema que esparce el agua que circula en el filtro secundario.
Filtro de humedad	Fase 3 del sistema
Manguera de presión con un diámetro de entrada y salida de 0.0062 m	1.- Enlace de fase 1 a fase 2 (biogás con impurezas)
	2.- Enlace fase 3 a fase 4
	3.- Para conducción de biogás limpio
Válvulas PVC hco	Sistema de agua y gas
Manómetro baja presión	Fase 3 del sistema
Manómetro alta presión	Fase 4 del sistema
Compresor ½ hp	Sistema de compresión (fase 4 del sistema)
Madera	Estructura del sistema.

Tabla 3.3. Elementos eléctricos de SPCB.

Elemento	Consumo watts/hora (w/h)
1.- Bomba de agua	600
2.- Compresor	744

3.5. Aplicación del SPCB

Es necesario hacer un análisis de la composición de biogás para evaluar los porcentajes de H_2S y CO_2 al inicio y al final del proceso de purificación y compresión. Para ello se utilizará el equipo “multitec 540”, tecnología diseñada para medir los valores de porcentaje en volumen de los componentes más importantes de biogás. Este equipo multitec 540 tomará una muestra directamente de la bolsa de almacenamiento de biogás, para conocer sus características iniciales antes de que este ingrese el SPCB. Este equipo también será usado para tomar una nueva muestra al finalizar el proceso dentro del SCPB y así conocer las características finales del biogás purificado.

El SPCB diseñado consta de cuatro fases principalmente, las cuales se describirán a continuación.

En la primera fase la cual está enfocada al filtrado de H_2S mostrada en la figura 3.2, posee un filtro denominado “filtro primario” para la disminución de H_2S , por este se hará fluir biogás con todos sus elementos primarios tomado de la bolsa de

almacenamiento, una vez terminada esta fase primaria el biogás pasa a la segunda etapa.

En la segunda fase se disminuye el por ciento de CO₂ y se elimina el H₂S residual. Aquí se hará fluir biogás proveniente del filtro primario a través del filtro secundario, en donde se pone en contacto con el agua por burbujeo y aspersion, el agua entrará al filtro y será esparcida en su interior interactuando con el biogás a contracorriente y por burbujeo con el agua depositada en el fondo del filtro; el agua saldrá por la parte inferior del filtro para ser nuevamente recirculada por una bomba (Morero et al., 2010); al terminar esta segunda fase el biogás con menos contenido de CO₂ y sin H₂S pasará a la siguiente fase.

La tercera fase se encarga de la eliminación de humedad del biogás adquirida en las dos primeras fases, aquí pasará por un tercer filtro, filtro de humedad, que absorberá un alto por ciento de agua o humedad residual que contenga aún el biogás.

En la cuarta y última fase, se destina a la compresión de biogás, la cual consta de un tipo de compresor que se usa para aplicaciones en refrigeración, con una capacidad de compresión máxima de 3447.37 kPa, cuya función principal es succionar biogás desde el filtro primario, hacer pasar biogás por el filtro secundario y posteriormente por el filtro de humedad; comprimir y almacenar el biogás libre de impurezas, en un tanque de alta presión de capacidad máxima de 10 kg diseñado para almacenar gas Lp, a una presión entre 1620.26 y 3447.37 kPa.

El SPCB propuesto en esta investigación es factible para aplicaciones prácticas y con requerimientos de uso y consumo energético mínimos, cabe destacar que este dispositivo es único en su tipo por el sistema de compresión que presenta.

3.6. Desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando biogás en un motor de combustión interna.

Después de trabajar en la generación de biogás, en su purificación, compresión y almacenamiento, este está en condiciones de ser usado en la generación eléctrica. Debido a ello es de suma importancia la elección de la parte principal del sistema como lo es el motor-generador (M-G); a su vez es necesario desarrollar el sistema de suministro de biogás al M-G para su correcta combustión. La elección del M-G a utilizar deberá cumplir con las características técnicas que permitan el uso práctico del mismo, que sea de un tamaño portátil, de fácil manejo, arranque manual, de bajo consumo y por ende de bajo costo, ya que la tecnología existente en la generación de energía eléctrica con biogás es costosa así como su mantenimiento.

El sistema de suministro de biogás al M-G está básicamente diseñado para disminuir la presión del biogás almacenado en el tanque de alta presión y llevarlo a una presión menor para que pueda ingresar a la cámara de combustión del M-G; una vez suministrado el M-G con biogás se procede a accionar el arranque manual llevándose a cabo la combustión y generando así energía eléctrica en CA.

Este diseño que se muestra en la figura 3.4, utiliza aditamentos mecánicos fáciles de conseguir para que su explotación y mantenimiento pudieran ser de una manera práctica y sin capacitación especializada al usuario.

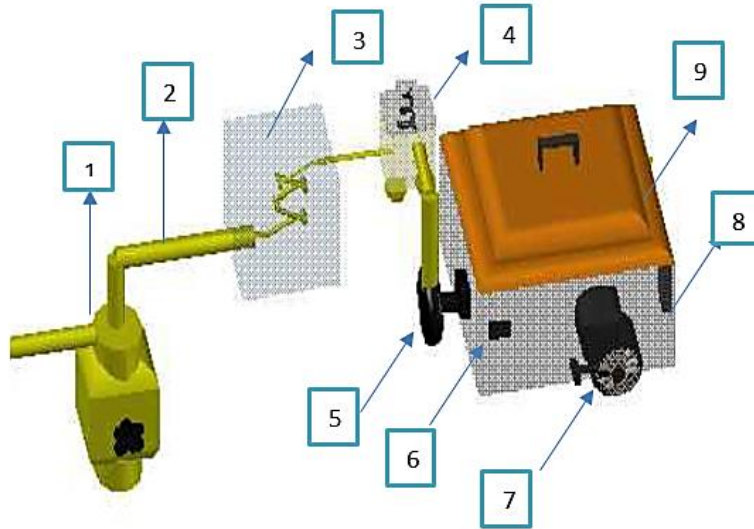


Figura 3.4. Diseño general de generación de energía del SIGEEB

Partes: 1.Almacenamiento de biogás a alta presión 2.Tubería de inyección 3.Gasificador 4.Reductor de presión 5.Mezclador 6.Paso de combustible 7.Arracador manual 8.Salida de energía eléctrica en corriente alterna (CA), 9. M-G.

3.1.6. Construcción y acoplamiento de las partes que integran al SIGEEB.

El SIGEEB inicia con la construcción de cada parte del sistema por separado para su posterior acoplamiento, quedando así el sistema integral construido. Desde el momento que se inicia con el diseño general de todo el sistema, hasta el momento en que ocurra la generación de energía eléctrica del M-G y la evaluación de SIGEEB acontecen una serie de procesos que se detallan a continuación.

Se Inicia con la etapa de generación de biogás teniendo un biodigestor DM1⁴ de 1100 L de capacidad construido, instalado y cargado de materia orgánica, que comienza a generar biogás transcurrido 25 días, este estará acoplado a un sistema de almacenamiento de biogás, conformado por tres bolsas de geomembrana con

una capacidad de almacenamiento de 2 m³ cada una. Posteriormente esta cantidad de biogás se hace pasar por el SPCB para su tratamiento de eliminar impurezas y comprimirlo. Después de pasar por el SPCB el biogás está libre de impurezas y es comprimido y almacenado en los tanques de biogás a alta presión, estos tanques se utilizan para almacenar una mayor cantidad de biogás limpio en un menor espacio. Estos tanques suministran biogás listo para usarse al gasificador encargado de bajarle la presión hasta la presión de trabajo, adaptación propuesta debido a que el M-G inicialmente fue diseñado para utilizar como combustible gasolina. El biogás en el gasificador con una menor presión, es suministrado al mezclador que realiza la mezcla con aire, la cual ingresará a la cámara de combustión para iniciar la combustión en el M-G, comenzando así la generación de energía eléctrica en CA. En la figura 3.5 se muestra diseño general de SIGEEB acoplado

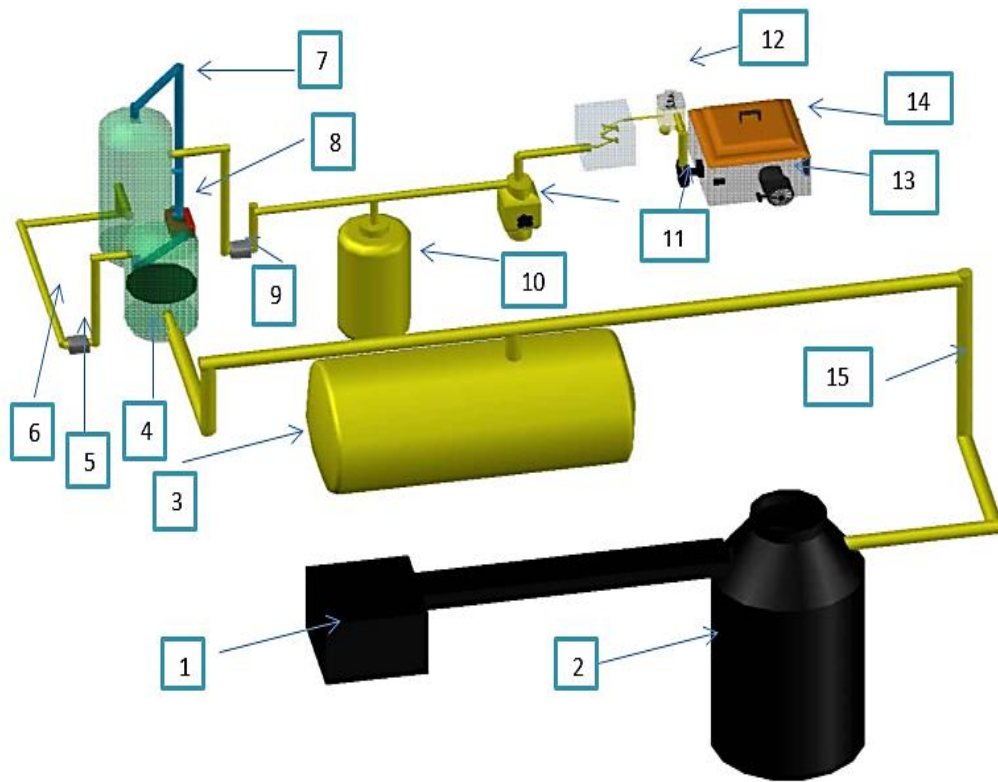


Figura 3.5. Diseño general de SIGEEB construido y acoplado.

Partes: 1.Área de mezcla (materia orgánica-agua), 2.Biodigestor, 3.Sistema de almacenamiento de biogás, 4.Filtro seco H₂S, 5.Filtro de humedad, 6.Tubería biogás, 7.Tubería de agua a presión, 8.Bomba de agua, 9.compresor, 10.Tanque de biogás a presión, 11.Mezclador, 12.Gasificador, 13.Arracador manual, 14.Salida de energía eléctrica en CA, 15.Tubería biogás principal.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra los resultados de la investigación, el cumplimiento de cada una de las tareas correspondiente a cada uno de los objetivos que se propusieron; que finalmente conllevo a proponer una solución al problema plantado.

La construcción de cada parte del SIGEEB fue realizada por separado para su posterior acoplamiento como se planteó inicialmente, quedando así conformado el sistema integral. Desde el momento que se inicia el desarrollo general del sistema hasta que ocurre la generación de energía eléctrica en el M-G, así como la evaluación del SIGEEB se sigue una metodología a la cual se le dio cumplimiento y se expone está a continuación.

4.1. Resultados de construcción e instalación según diseño de un biodigestor DM1.

4.1.1. Resultados de la construcción según diseño de un biodigestor DM1

La etapa de este proyecto es la generación de biogás. Esta comienza con el desarrollo y construcción según diseño del biodigestor DM1, se eligió un tinaco de 1100 L de capacidad hecho de polipropileno de alta densidad, para su construcción, posteriormente siguiendo la lista de materiales, se prosiguió con la construcción del mismo.

A continuación se describe el proceso de construcción realizado y mostrada en la figura 4.1.

Se inicia el trabajo con la perforación del tinaco de un diámetro de 0.10 m, para la entrada de materia orgánica(1) y la salida de bioabono del biodigestor(2), posteriormente se introducen los CRE y CRI (3), así como la tubería de PVC de esta misma medida, agregando a estos partes de PVC hco silicón de alta temperatura(4) para garantizar la hermeticidad y se pueda llevar a cabo el proceso anaeróbico, seguidamente se disponen de dos tubos de PVC, el primero de 0.10 m de diámetro por 0.80 m de largo para acoplarse con un codo de 90° de PVC hco de 0.10 m de diámetro y esta a su vez unirse a la entrada de materia orgánica (5) , y el segundo de 0.10 m de diámetro por 0.30 m de largo acoplado a un codo de 45° de PVC hco de 0.10 m para unirse a la salida de bioabono(6); quedando así construido por completo la entrada y salida del biodigestor.

Posterior a ello se construyó el sistema de remoción del biodigestor (7). Para ellos es necesario fabricar las paletas, estas son de tubería de PVC hco de 0.10 m de diámetro por 0.40 m de largo, estos tramos son cortados a la mitad e incrustados en un soporte de PVC hco de 0.018 m de diámetro por 1.5 m de largo que constituye el eje del sistema de remoción, pegados con cemento para PVC, anclados en una base en el fondo del biodigestor(8), el cual no permitirá que se formen costras o capas que frenen el proceso de biodigestion, este sistema es operado desde fuera del reactor manteniendo la hermeticidad a través de un sello de silicón.

Finalmente se coloca la tapa superior del tinaco (9) en la cual fueron instaladas las toma de muestras de pH (10) y temperatura (11), así como una válvula que regula

la salida del biogás(12), todas estas conexiones de PVC hco y de 0.018 m de diámetro. La tapa superior se fija y se sella con silicón (13).

Es necesario instalar un sistema de seguridad (14) para prever un aumento excesivo de presión en el reactor, el cual consta de un recipiente con agua (15) y tubería de PVC hco y así evitar que el dispositivo se dañe. Terminada la construcción del biodigestor, este se conecta a la bolsa de almacenamiento (16), usando tuberías y conexiones de PVC de 0.018 m de diámetro (17); quedando así el sistema de generación de biogás construido.

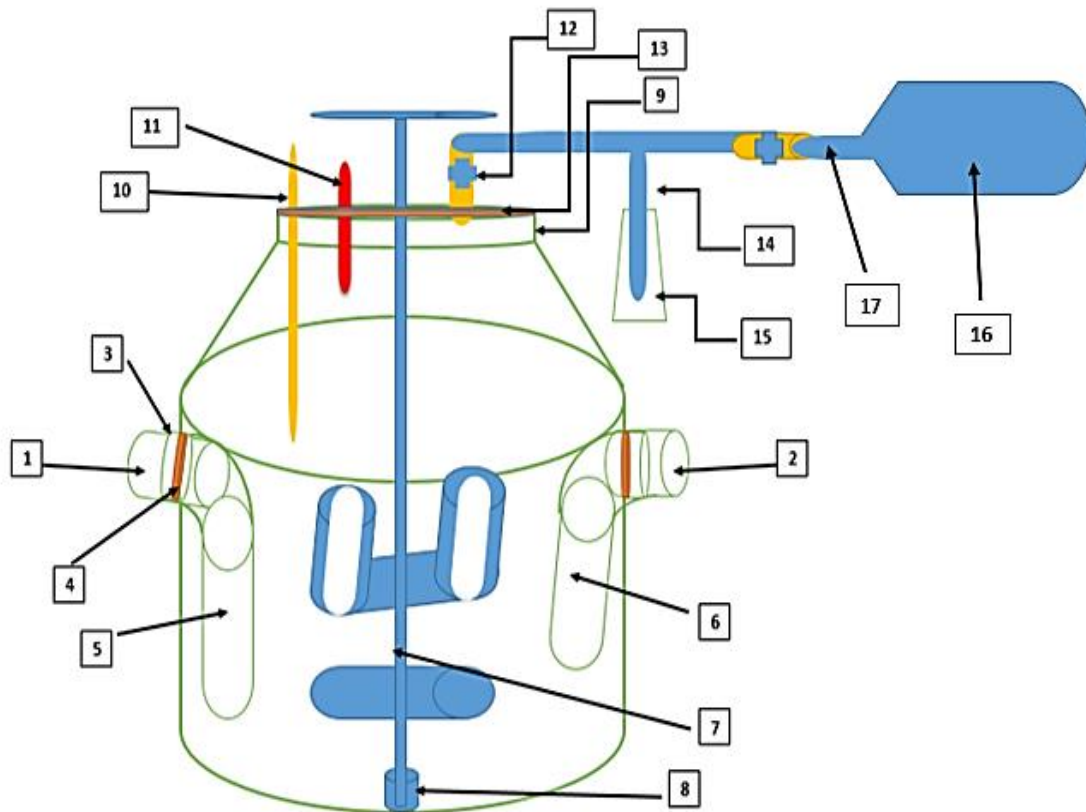


Figura 4.1. Descripción del biodigestor DM1

4.1.2. Resultados de la instalación de un biodigestor DM1

Habiendo dimensionado y construido se prosiguió con la instalación del biodigestor DM1, fue instalado dentro de las instalaciones de la UNICACH, se instaló en el área del Centro de Desarrollo y Evaluación de Biodigestores del CIDTER; perteneciente a esta universidad. El sistema está enterrado, en contacto con el sol y bajo una vía de acceso (Figura 4.2) que permite el llenado del reactor y recolección de bioabono, y adjunto a esta instalación se encuentra la bolsa de geomembrana instalada para el almacenamiento de biogás. Para cargar el biodigestor se adquirieron 300 L estiércol de ganado vacuno (Figura 4.3), y 450 L de agua para realizar la mezcla homogénea que se incorpora al reactor; después hecha la mezcla se vertieron los 750 L de ella (Figura 4.4), llenando el reactor a un 70 % de su capacidad total.

Desde este momento y hasta los 40 días de RTH se da remisión a la mezcla interior con el sistema de agitación evitando que se detenga el proceso de biodigestión anaeróbica.

A los 25 días comenzó la generación de biogás y a los 40 días de RTH se han obtenido aproximadamente 6 m³ de biogás. Este biogás es almacenado en bolsas de 2 m³ (Figura 4.5) y a su vez se generaron 600 L de bioabono o abono orgánico (figura 4.6), listo para usarse en la agricultura.



Figura 4.2. Vía de acceso a banco de Biodigestores



Figura 4.3 materia orgánica



Figura 4.4. Elaboración de mezcla



Figura 4.5. Bolsas de biogás



Figura 4.6. Bioabono

4.2. Resultados del desarrollo del SPCB

Anteriormente se mencionó el problema que significa ácido sulfhídrico (H_2S) presente en la composición del biogás, ya que en el proceso de generación de energía eléctrica el biogás será suministrado a un motor de combustión interna el cual cuenta con partes metálicas, por ello se fue necesario desarrollar SPCB para eliminar el H_2S de la mezcla de biogás y a su vez disminuir la cantidad de CO_2 presente en el biogás, para tener la mayor cantidad posible de CH_4 en la mezcla propia del biogás.

Dentro de los métodos de purificación de biogás para la disminución o eliminación de H_2S , se utilizaron dos métodos: uno el proceso seco de oxidación y el de lavado, ambos procesos recomendados (Morero et al., 2010).

El desarrollo del SPCB, consta de 4 etapas las cuales son: filtrado de H_2S , disminución de CO_2 y eliminación residual de H_2S , eliminación de humedad de biogás y finalmente la fase de compresión. A continuación se ofrece una explicación de la construcción del sistema

Dentro del desarrollo del SPCB, se construyó el filtro primario como se muestra en la figura 4.7, este es de forma tubular de PVC hco de 0.10 m de diámetro y 0.80 m de largo(1), sellada en ambas caras con una tapa del mismo material y pegadas con cemento para PVC(2), se le instalo a este filtro una entrada(3) y salida para biogás(4) de 0.018 m de diámetro ambas con válvulas de esfera(5) de la misma medida; para este filtro fue necesario 3.5 kg de limaduras de óxido férrico (F_2O_3)

las cuales fueron tratadas; el procedimiento de este proceso se describe a continuación:

Se recolectaron limaduras de hierro en talleres de maquilado mecánico, posteriormente se lavaron con detergente desengrasante y secaron; a continuación a esto se sumergieron en una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 5 % durante 10 minutos, se extraen y se secan al aire; por último, fueron sumergidas en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5 %, por otros 10 minutos más, dejando secar al aire. Como resultado, las virutas se convierten en Fe_2O_3 , compuesto que reacciona rápidamente con el H_2S , cuyo límite de absorción en Fe_2O_3 es de 56 %. Listas estas virutas se colocaron en el filtro primario (7) sellándolo posteriormente asegurando que el sistema sea hermético concluyendo aquí la primera fase del sistema.

La segunda fase destinada a la disminución de CO_2 y eliminación residual de H_2S , para ello fue necesario la construcción del filtro secundario como se muestra en la figura (4.10), este hecho del mismo material y dimensiones que el primario, pero con una entrada (1) y salida para biogás (2) de 0.0190 m de diámetro y una entrada (3) y salida para agua (4) de 0.0125 m, conectándole una bomba de agua (5) que permite mantener un volumen constante de cuatro litros de agua(6) dentro de este filtro esto sin sobre pasar el 50 % de la capacidad del filtro, de esta forma el biogás que viene del filtro primario pasa al secundario, en este filtro permitirá que el biogás(7) burbujee al entrar por la parte inferior del mismo e interactuara a contracorriente al ser inyectado agua por la bomba y esparcida desde la parte

superior del filtro secundario (8), y haciendo recircular en más de una ocasión la misma agua.

En la figura 4.9 se muestra cómo se lleva a cabo la tercera fase, en la cual ocurre al conectar la tubería proveniente del filtro secundario (1) a un filtro de humedad (2), que absorberá agua o humedad residual que contenga aun el biogás, este es un filtro que se utilizan para aplicaciones en refrigeración.

Así mismo también en la figura 4.9 se muestra la última etapa del proceso del SPCB, para el cual fue necesario conseguir e instalar un compresor (3) con capacidad máxima de 3447.37 kPa, es un compresor que se utiliza usualmente en equipos de refrigeración, esto para la compresión de biogás limpio libre de impurezas (4). Las conexiones y tuberías para biogás (5) fueron hechas de PVC hco y las mangueras del compresor (6) y el tanque de almacenamiento de biogás (7) diseñadas a trabajar alta presión.

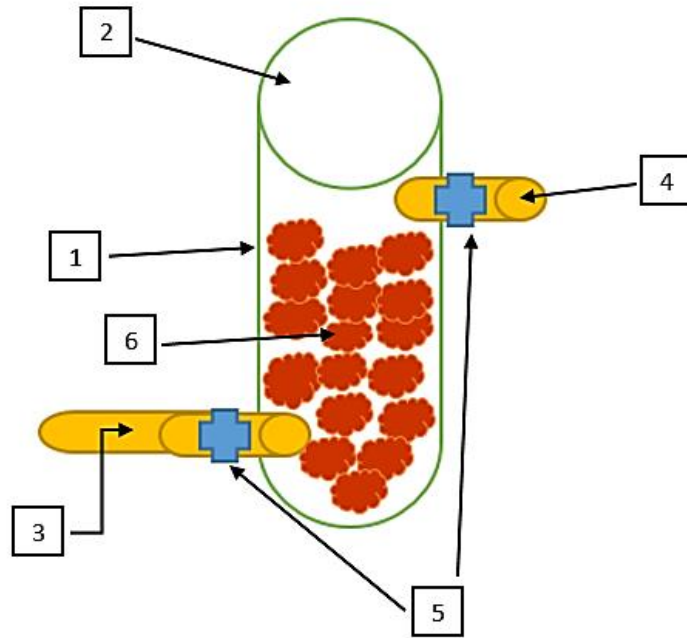


Figura 4.7. Partes que forman al filtro primario.

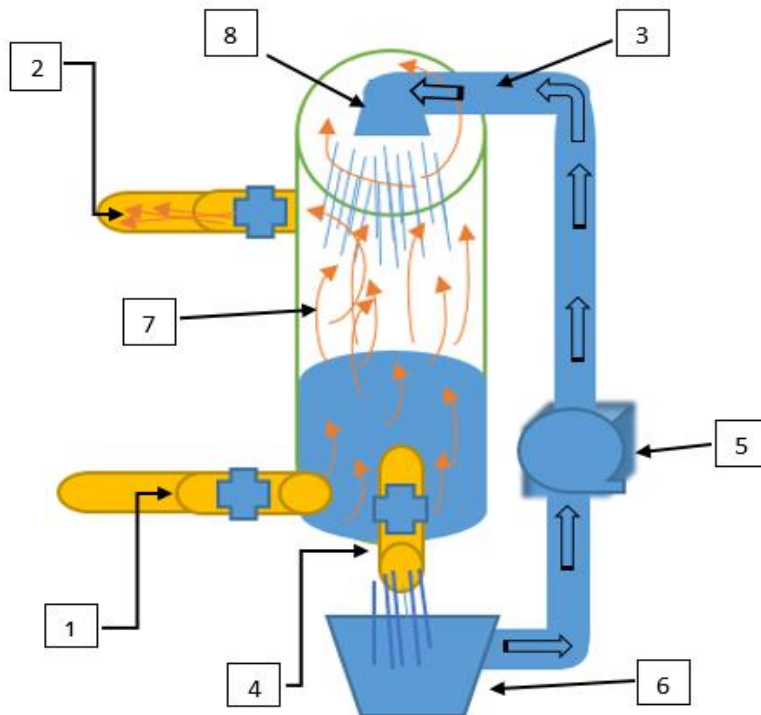


Figura 4.8. Funcionamiento filtro secundario

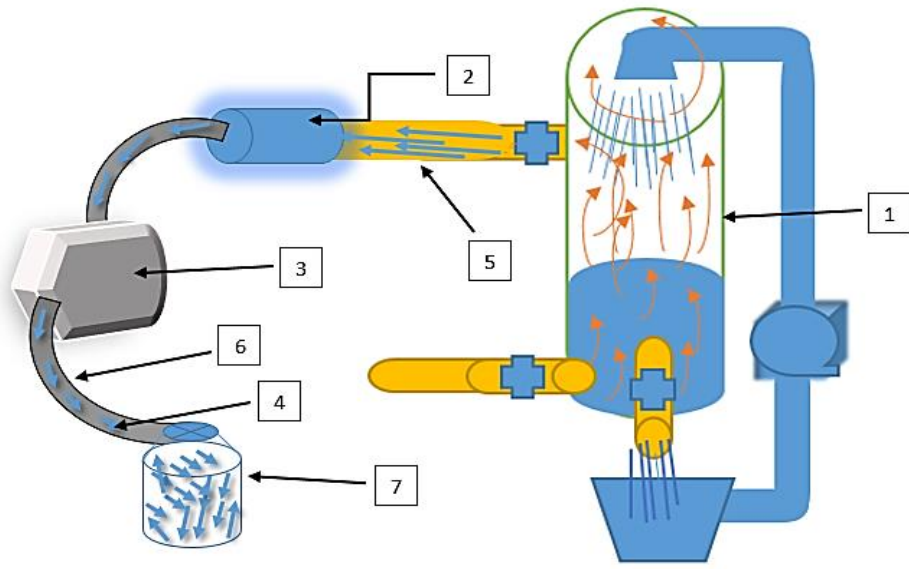


Figura 4.9. Tercera y cuarta fase del SPCB

A continuación se muestra un diagrama general de SPCB construida y conectada en todas sus partes que la integran figuras 4.10 y 4.11.

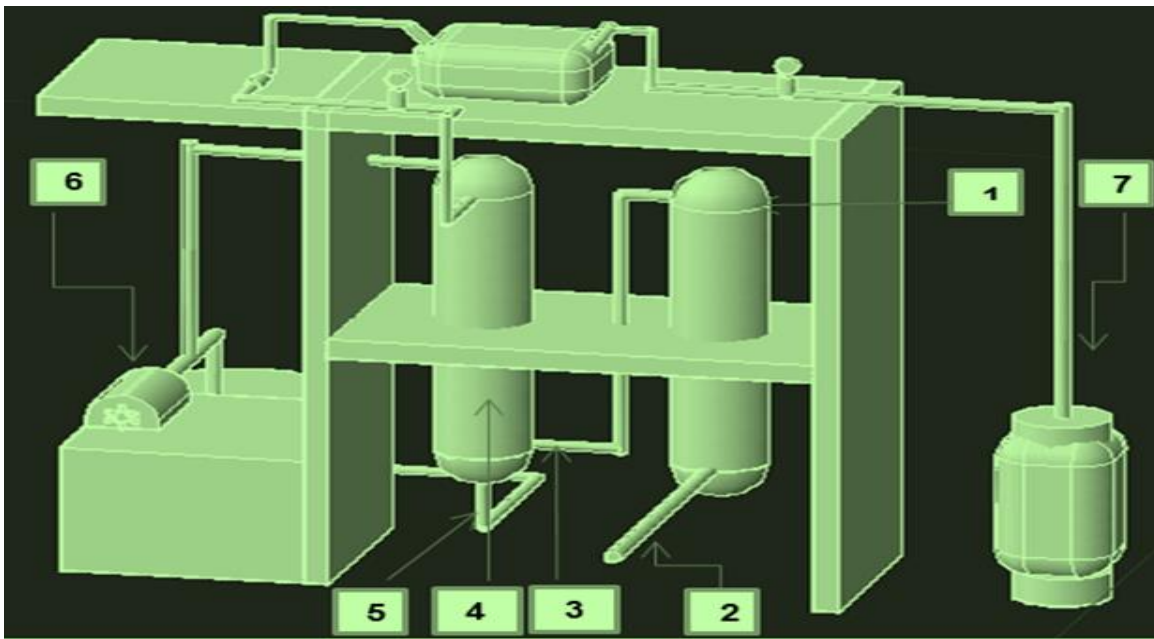


Figura 4.10. Vista frontal del SPCB

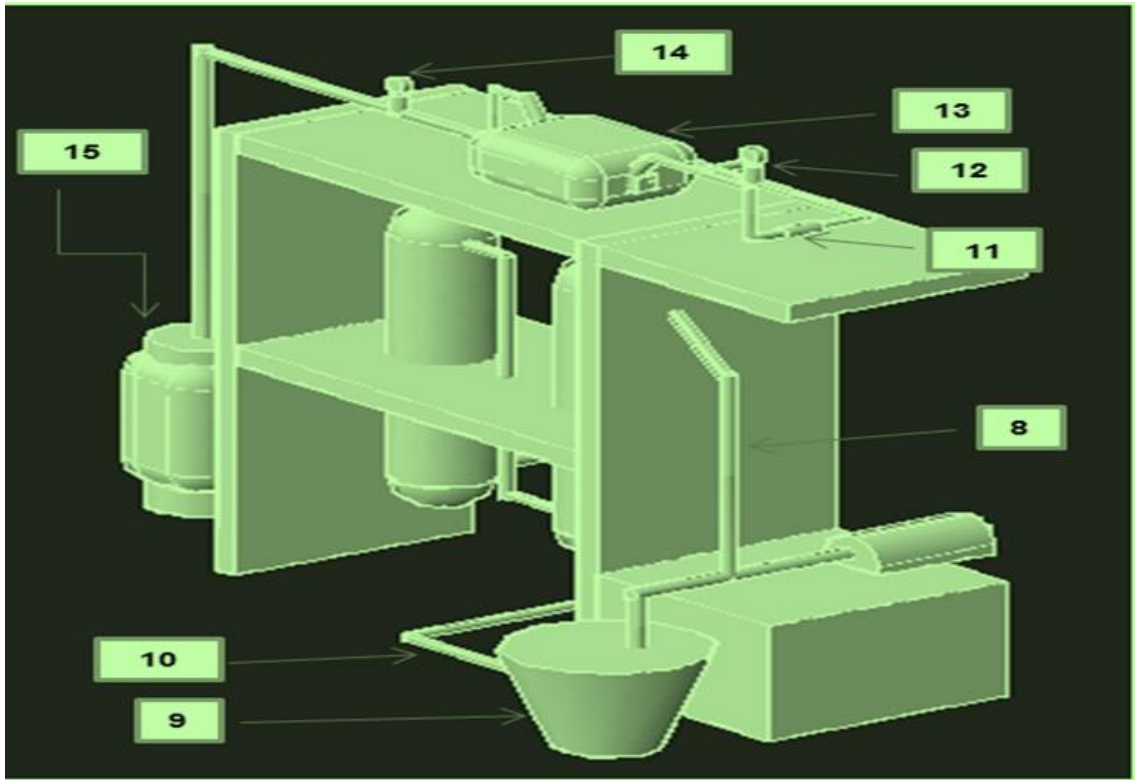
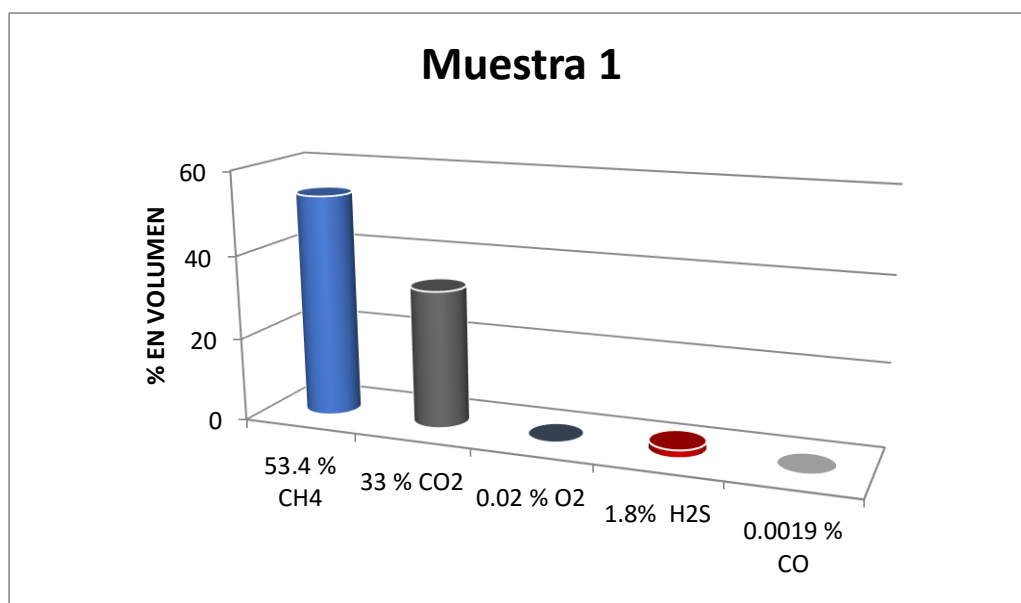


Figura 4.11. Vista lateral del SPCB

Figura 4.10 y 4.11. Partes: 1.Filtro primario, 2.Entrada de biogás desde la bolsa, 3.Tubería de biogás del filtro primario hacia el filtro secundario, 4.Filtro secundario, 5.Tubería de recirculación de agua, 6.Bomba de agua, 7.Cilindro de alta presión para CH₄, 8.Tubería de agua, 9.Depósito de agua, 10.Tubería de agua hacia depósito, 11.Filtro de humedad, 12.Manómetro de baja presión, 13. Compresor, 14.Manómetro de alta presión, 15.Cilindro de alta presión para CH₄.

4.3. Resultados de la aplicación del SPCB

El proceso SPCB se inicia al tomar 1 m³ de biogás como muestra 1 desde las bolsas de almacenamiento, (Figura 4.12), para la toma de muestra se usó el equipo multitec 540 (Figura 4.13), este equipo succiona biogás mediante una bomba interna, analiza la muestra y arroja los valores de su composición; esto para conocer las características del biogás en sus condiciones iniciales antes de ingresar al SPCB. El multitec 540 arroja valores de la composición del biogás en por ciento de volumen de cada uno de los gases presentes en la muestra, cuyo resultados promedios se muestran en la gráfica 4.1.



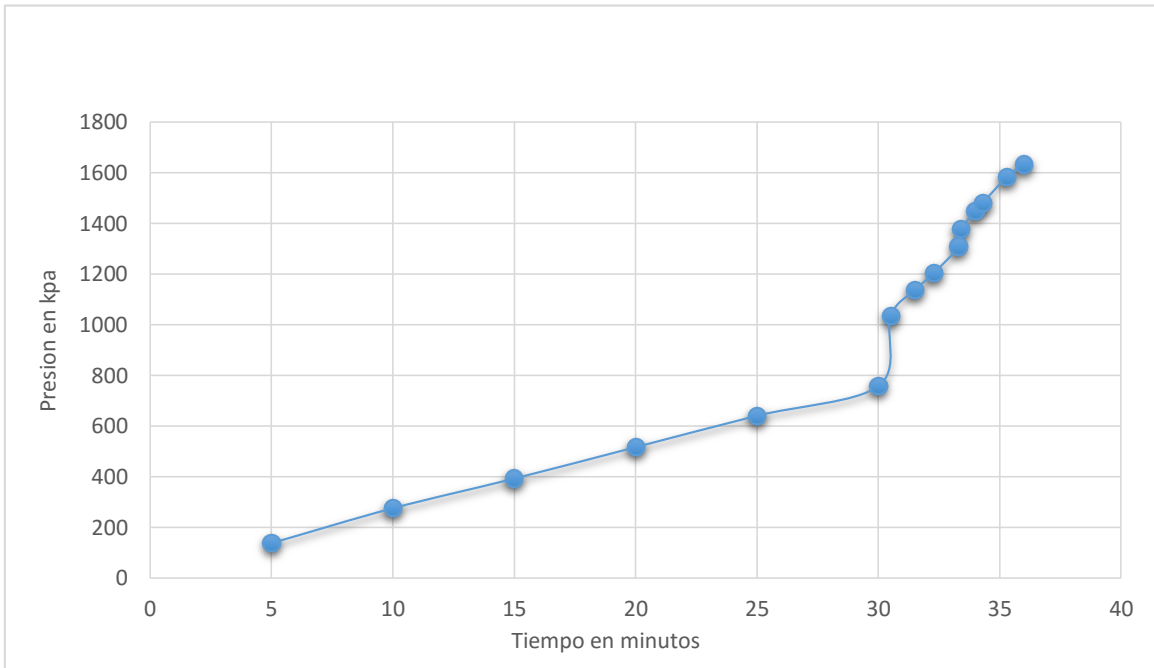
Grafica 4.1. Valores promedio medidos por el equipo multitec 540.

Una vez conocida la composición inicial del Biogás se está en condiciones de hacerlo pasar las fases que comprenden el SPCB el cual se muestra en la figura 4.14.

Al iniciar el SPCB se hizo fluir biogás tomado de la bolsa de geomembrana (muestra 1), este biogás pasa por el filtro primario, conectándose con tubería el filtro primario al secundario, a su salida del filtro secundario el biogás libre de impurezas pasa hacia el filtro de humedad, donde se le retira el agua o humedad del mismo. Llegando a la parte final del proceso comprimiendo y almacenando el biogás libre de impurezas, en un tanque de alta presión de capacidad de 10 kg diseñado para almacenar gas Lp, a una presión de 1620.26 kPa, obteniéndose un biogás comprimido en tanques de alta presión libre de H₂S y con un valor de porcentaje de CO₂ menor que el porcentaje inicial, estos valores pertinentes al H₂S y CO₂ son corroborados al ser tomada una segunda muestra al concluir el proceso de SPCB denominada muestra 2 (Grafica 4.2).

El tiempo que dura este proceso es de 35 minutos, tiempo en el que se usó la bomba de recirculación de agua que se utiliza en el filtro secundario y el compresor para la compresión de biogás limpio, los cuales son equipos de consumo de energía eléctrica, estos equipos se describen en la tabla 4.1, aunque el tiempo y consumo de energía eléctrica puede ser variados según la cantidad de biogás a tratar.

Los siguientes datos corresponden a la etapa de compresión (Grafica 4.2), cabe mencionar que los datos graficados se obtuvieron con el uso de manómetros (Figura 4.15), los datos obtenidos originalmente en unidades PSI para su posterior conversión en kPa

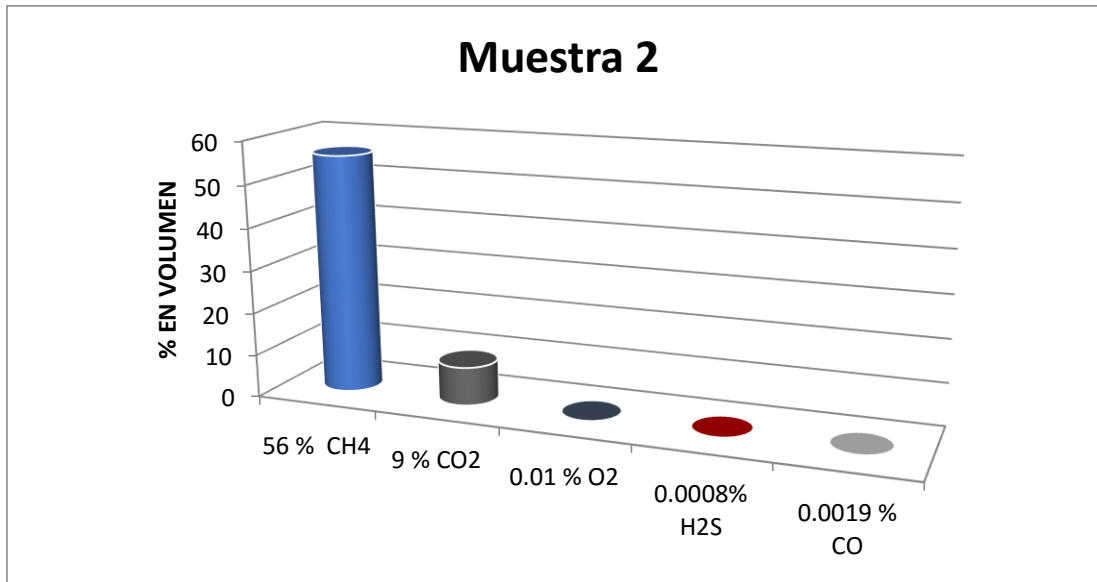


Grafica 4.2. Sistema de compresión final de SPCB Tiempo-Presión.

Tabla 4.1. Consumo de energía de equipos de SPCB.

Elemento	Consumo watts/hora (w/h)	Tiempo operación en minutos	Consumo total en watts
Bomba de agua	600	30	300
Compresor	744	30	372
		Total	672

De los tanques en los que se encuentra almacenado el biogás libre de impurezas y a una presión de 1620.26 kPa se tomaron muestras para evaluarlas con la ayuda nuevamente del equipo multitec 540, a continuación el valor promedio de estas muestras



Grafica 4.3. Valores de biogás al final de proceso SPCB

Después del análisis de la muestra 2 se comprueba que el Sistema cumplió con el objetivo de disminuir los valores de CO₂ en el biogás desde un 29.6 % de su valor inicial hasta un 9 %, y del 1.5 % de H₂S a 0.0008 %, prácticamente despreciable. Se obtiene un biogás de alta calidad comprimido a 1,620.26 kPa para su aplicación en la generación de energía.

Este sistema ofrece como producto final un biogás de alta calidad almacenado en tanques pequeños de 10 kg de capacidad máxima, a una presión de 1,620.26 kPa (Grafica 4.2) facilitando su transporte, almacenamiento para uso en múltiples aplicaciones, tales como la generación de energía eléctrica a través de su uso en un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico M-G.

En estas condiciones el biogás no afecta los componentes del M-G por estar libre de H_2S . Todo el proceso en el SPCB dura 35 minutos, con un consumo de energía de 672 W.



Figura 4.12. Toma de muestra con equipo multitec 540



Figura 4.13. Equipo multitec 540



Figura 4.14. SPCB



Figura 4.15. Manómetros

4.4. Resultados al desarrollo del sistema de generación de energía eléctrica utilizando biogás en un motor de combustión interna.

Usando el SPCB desarrollado se logra procesar los 6 m³ de biogás que produce la primera carga del biodigestor, biogás libre de impurezas y almacenado a una presión de 1,620.26 kPa en tanques de alta presión usado para gas Lp. Una vez terminado este proceso se dispone el biogás para ser suministrado al M-G

El M-G seleccionado (Figura 4.16) es un sistema de dimensiones pequeñas, portátil, de marca TRUPER, con una capacidad máxima de generación de 800 W continuos en CA los datos técnicos se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Características técnicas del M-G:

Potencia nominal del motor	1 864 W (2,5 Hp)
Tipo de motor	A 4 tiempos
Cilindrada del motor	97 cm ³ (ml)
Tipo de carburante	Gasolina
Nivel sonoro	Menor a 95 dB a 4 m
Tanque de gasolina	3,5 Litros
Salida:	1 contacto doble polarizado de 120 V [~]
Tensión:	120 V [~] / 60 Hz
Máxima salida de carga:	800 W
Salida nominal:	750 W
Tipo de aceite:	SAE 10W/30

Antes de hacer las adaptaciones necesaria al M-G para SIGEEB se evaluó el rendimiento que tiene el M-G usando gasolina, mostrando después de realizadas las pruebas un consumo de gasolina promedio 1L de gasolina por cada dos horas de uso continuo, habiendo a disposición en la toma de energía eléctrica 800 W continuos en CA según las especificaciones del MG, este consumo de combustible puede variar debido a la necesidad misma del M-G, debido que las pruebas se realizaron si consumo eléctrico del M-G.

Posterior a esto se prosiguió con acoplamiento tal como se muestra en la figura 4.16, de los tanques de almacenamiento (Figura 4.17 y 4.18) con mangueras de alta presión, estos tanques posteriormente se conecta con una manguera de alta presión al gasificador (Figura 4.19) del SIGEEB el cual cuenta con un reductor de presión y permite el previo llenado para el suministro a la cámara de combustión (Figura 4.20), seguidamente ya llenada la cámara de combustión se prosigue a accionar el arrancador manual (Figura 4.21) y en automático a esto inicia la generación de energía eléctrica, obteniendo resultado el encendido del M-G observando que el funcionamiento del sistema es regular entregando un voltaje nominal oscilante entre 110V y 120V, sin carga o consumo eléctrico en ese momento, estos valores son valores aceptados para tomar energía para equipos de consumo eléctrico a 110V- 127V, comenzando así la generación de energía eléctrica en CA al combustionar biogás en SIGEEB. A continuación se muestra el diseño general del sistema de generación de energía del SIGEEB acoplado

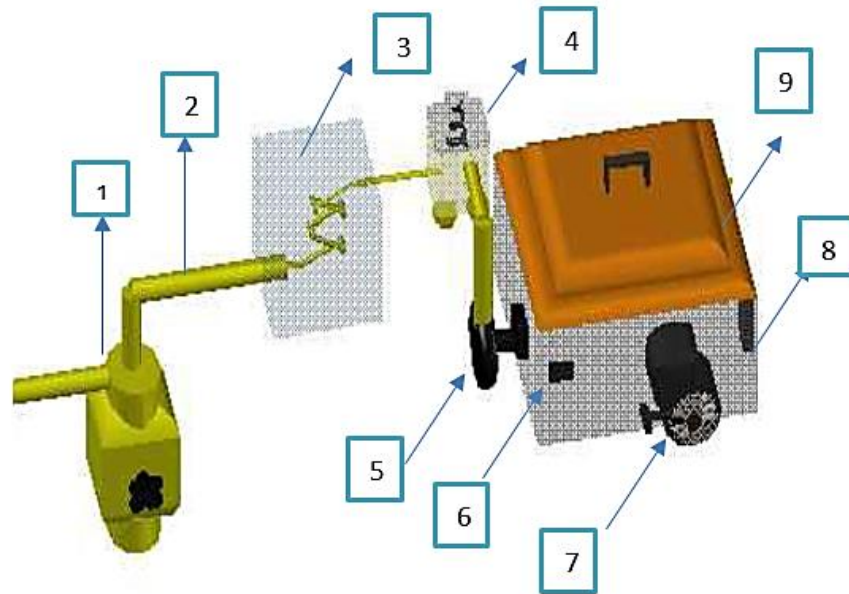


Figura 4.16. Diseño general de generación de energía del SIGEEB

Partes: **1.** Almacenamiento de biogás a alta presión (sistema de almacenamiento de biogás a 1,620.26 kPa), **2.** Tubería de inyección (manguera de alta presión para inyección de biogás al gasificador), **3.** Gasificador (sistema que permite reducir la presión y acondicionar el biogás antes de ingresar al M-G), **4.** Reductor de presión (sistema de seguridad de presión antes de ingresar al M-G), **5.** Mezclador (sistema que realiza la mezcla combustible con O₂), **6.** Paso de combustible (permite o no el paso de combustible a la cámara de combustión), **7.** Arracador manual (permite el arrancado manual del M-G) **8.** Salida de energía eléctrica en corriente alterna (CA), **9.** M-G.



Figura 4.17. Tanque 1 biogás comprimido



Figura 4.18. Tanque 2 biogás comprimido



Figura 4.19. M-G con Gasificador



Figura 4.20. Cámara de combustión



Figura 4.21. Arrancador manual

4.5. Resultado de la construcción, acoplamiento y puesta en marcha del SIGEEB.

Diseñadas, construidas e instaladas cada una de las partes que conforman SIGEEB fue necesario llevar a cabo la evaluación propia del sistema, para comprobar el funcionamiento y rendimiento del mismo como se representa en la Figura 4.22 se muestran todos los componentes de SIGEEB acopladas.

Después de hacer las adaptaciones al M-G para que usara biogás en el SIGEEB anteriormente mencionadas, se evaluó el sistema utilizando biogás limpio de impurezas y comprimido, obteniendo como resultado la generación de energía eléctrica combustionando 1 m³ de biogás por cada 1.15 horas de uso, teniendo a disposición en la toma de energía eléctrica 800 W continuos según las especificaciones del M-G, y de la misma forma que al usar gasolina el consumo de biocombustible puede variar debido a la demanda energética sustraída del M-G. Al usar biogás en SIGEEB se obtiene adicional a la generación de energía eléctrica, un ahorro económico de 14 pesos en promedio por el uso del sistema, precio de la gasolina en México en el año actual y sujeto a variaciones, este ahorro se dará por cada dos horas de uso del M-G, pudiéndose trabajar de forma continua por varias horas cuando así se requiera.

Los 800 W disponibles pueden usarse en aplicaciones propias del lugar como pueden ser iluminación, extracción de agua por alguna bomba, para uso de equipos electrodomésticos o para alguna actividad propia del lugar que requiera del uso de energía eléctrica. Habiéndose generado esta energía con un combustible que fue

generado a través materia que en su caso no representa un costo económico el adquirirla, y a su vez se genera abono que permite ser utilizada en sistemas de la agricultura propias del lugar en donde se instale el sistema o para iniciar el comercio de este abono debido a las excelentes características que posee, incrementando así los beneficios energéticos y económicos que ofrece SIGEEB. Siendo así la energía producida por SIGEEB, energía limpia y generada sin costo alguno, contemplando únicamente como costo el que se requiera para la construcción, instalación y mantenimiento del mismo sistema.

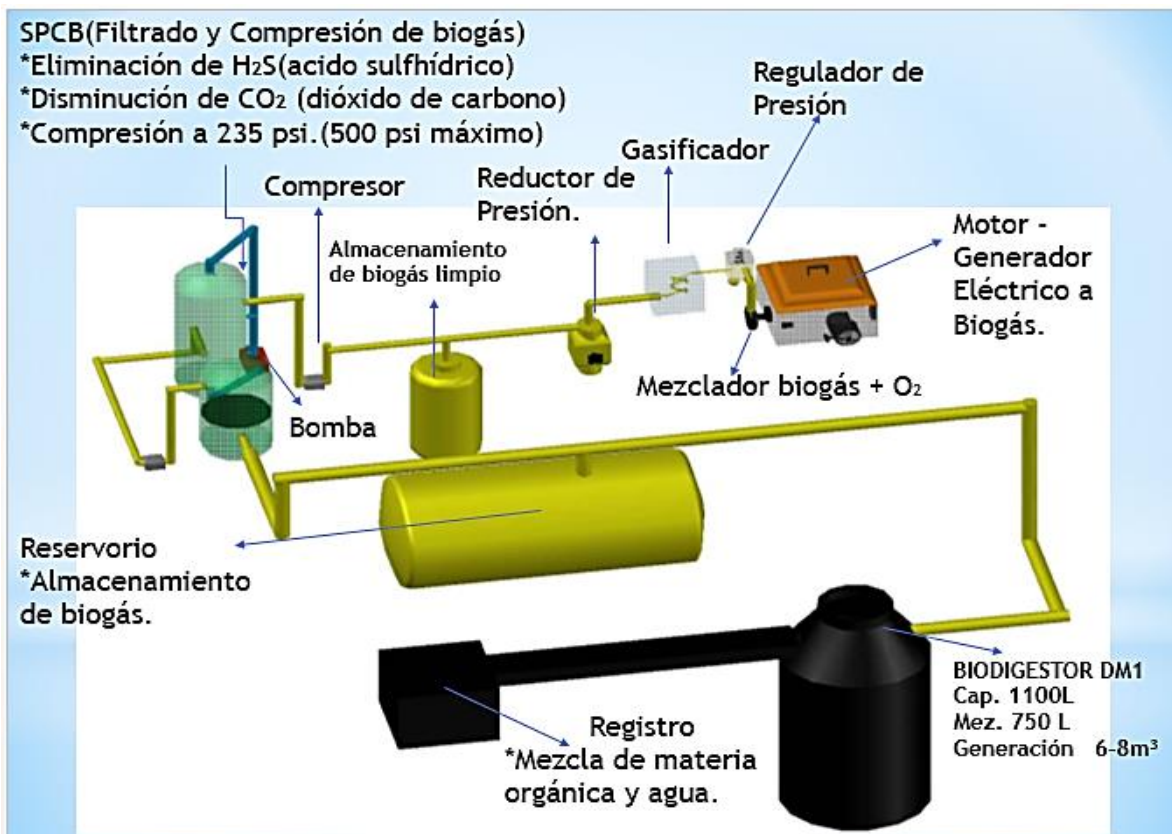


Figura 4.22. Plano general de SIGEEB

5. CONCLUSIONES

Una vez terminado con los resultados y habiendo concluido los objetivos planteados en este trabajo se llega a las siguientes conclusiones:

1.- Se construyó e instaló un sistema de generación de biogás, el cual incluye un biodigestor DM1 de 1100L, así como un sistema de almacenamiento de biogás que consta de 3 bolsas de geomembrana de 2 m³ de capacidad cada una.

2.- Para el abasto del sistema de generación de biogás se utilizaron 300 L de estiércol de ganado vacuno mezclado con 450 L de agua, con dicha mezcla de 750 L se generó 6 m³ de biogás y 600 L de bioabono en 35 días.

2.- Se desarrolló un SPCB para disminuir los valores de CO₂ y eliminar H₂S en el biogás, con una capacidad de procesamiento de 67 m³ de biogás antes de reemplazar los 3.5 kg de limaduras de Fe₃O₂ del filtro primario, siendo recargable este filtro cambiando las limaduras. Este SPCB es construido con materiales existentes y factibles de conseguir, de consumo eléctrico muy bajo, así como lo práctico en su manejo.

3.- Se demostró la eficiencia del SPCB al disminuir los valores de CO₂ en el biogás desde un 29.6 % de su valor inicial hasta un 9 %, y del 1.5 % de H₂S a 0.0008 %, prácticamente despreciable. Este sistema ofrece como producto final un biogás de alta calidad almacenado en tanques pequeños de 10 kg de capacidad máxima, a una presión de 1,620.26 kPa, facilitando su transporte y almacenamiento, para uso en múltiples aplicaciones, tales como la generación de energía eléctrica.

4.- Se desarrolló un sistema que permitió se utilizara biogás en un motor generador (M-G), sistema que permite la inyección de biogás a la cámara de combustión del MCI propio del M-G, diseñado anteriormente a usar gasolina.

5.- Se desarrolló un sistema de generación de energía eléctrica utilizando como combustible biogás, obteniendo como resultado la generación de energía eléctrica combustionando 1 m³ de biogás por cada 1.15 horas de uso, con salida de 800 W de potencia en CA nominal a 110 V.

6.- Finalmente se consiguió acoplar los sistemas de producción, el sistema de purificación y compresión y el sistema de generación de energía eléctrica usando biogás, para obtener un SIGEEB, teniendo a disposición en la toma de energía eléctrica 800 W continuos en CA a una tensión nominal comprendida en 110- 120 V. Esta energía puede ser propuesta para aplicaciones como: iluminación, extracción de agua por bombeo, para uso de equipos electrodomésticos o para alguna actividad propia que requiera del uso de energía eléctrica.

7.- El SIGEEB permite la generación de energía limpia con un combustible producto del tratamiento de la materia orgánica y a su vez se genera bioabono que permite ser utilizado en la agricultura, encontrando en este sistema una oportunidad energética en apoyo al medio ambiente ante el problema de la emisión de gases de efecto invernadero, al reducir la emisión descontrolada de metano y la concentración de CO₂ en la atmósfera que es proveniente de la ganadería.

8.- El sistema propuesto da tratamiento a los residuos orgánicos de la propia actividad humana de las comunidades, evitando focos de contaminación de mantos freáticos, contaminación de suelos, que conllevan al surgimiento de enfermedades.

6. LITERATURA CITADA

1. Arthur R., 2011. Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study. *Renewable Energy* (36) 1510-1516.
2. Arvizu Fernández, J., I. "Energía a partir de la basura" en: *Boletín IIE*, Vol. 21, Núm. 6, 1997, p. 273-280.
3. Arvizu, J. y Huacuz, J., 2003." Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad", *Boletín IIE*, octubre-diciembre del 2003.
4. Atuesta Venegas, M.R., 2005. Valorización de impactos tecnológicos en el desarrollo social de comunidades rurales. *Revista Universidad EAFIT*. Abril-junio, año/vol. 41, número 138. IAA: 0120-341X. Colombia.
5. Ávila Soler E., 2009. "Biogás: opción real de seguridad energética para México". Instituto politécnico nacional, México. Presenta en la escuela superior de ingeniería y arquitectura para obtener el grado de maestro en ciencias en administración, planeación y economía de hidrocarburos.
6. Bautista, Bautista G., 2008. "Efectos de Agregados al Estiércol de Bovino de Desechos de Manzana en la Producción de Biogás". Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Presenta en la

División de Agronomía Departamento de Fitomejoramiento para obtener el grado de Ingeniero Agrónomo en Producción.

7. Botero Botero, R.; Aguilar, F.X., 2002. Estimación de los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor Guácimo, CR, Universidad EARTH.
8. Botero Botero, R.; Preston, T., 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizantes a partir de excretas. Cali, CO. 30 p.
9. Casas Prieto, M. A., et. al., 2009. Estudio de Factibilidad para la puesta en marcha de los biodigestores anaeróbicos en establos lecheros en la cuenca de delicias, Chihuahua. Revista Mexicana de Agronegocios, enero-junio, año/vol. XIII, número 024. Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria.
10. CEMAT, 1977. Centro Mesoamericano de Estudios sobre Tecnología Aplicada. Planta de biogás a pequeña escala de la India. Handbook of Appropriate Technology of the Canadian Munger Foundation. Guatemala, Guatemala. El biogás y sus aplicaciones. Pág. 11 - 18.
11. Cervantes, R. L., Aguilar G., 2011. Evaluación de un efluente de biodigestor anaerobio empleado como mejorador de suelos en el crecimiento de plantas. Verano de la Investigación Científica.

12. Coto Rodríguez, J.E.; Maldonado Maldonado, J.J. 2005. Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en EARTH. Tesis Lic. Ing. Agr. Guácimo, CR, Universidad EARTH. 62 p.
13. De la guerra Carrasco A., 2011. Generación distribuida a partir de biogás producido en granjas porcinas. Ciudad universitaria, México: s.n. Presenta en el instituto de ingeniería UNAM para obtener el grado de ingeniero eléctrico y electrónico.
14. Diario tribuna Chiapas, 2013. "UNICACH en la mira de las nuevas tecnologías". Tuxtla Gutiérrez Chiapas. México.
15. Dias E. y Cesar J. 2006. "Evaluación de la productividad y del efluente de biodigestores suplementados con grasas residuales. Universidad EARTH. Trabajo de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Guácimo, Costa Rica.
16. Davis, M.L.; Masten, S.J. 2005. Ingeniería y ciencias ambientales. Trad. V. Gonzáles y Pozo; S.A.D. Reyes; J.L Blanco; C. Magallanes. México, DF, McGraw-Hill. 750 p.
17. Enarsa, 2012. "Generación de Energía Eléctrica a Partir de Biogás".

18. EnviTec Biogas. 2013. EnviTec Biogas establece tres plantas de biogás para KTG Energie.
19. Escalante Estrada, V. 2002. Tratamiento de efluentes de una granja porcícola en el estado de Campeche. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Instituto de procedencia IMTA Y UAC.
20. García Rolando., et al., 1988. Deterioro ambiental y pobreza en la abundancia productiva. El caso de la comarca Lagunera. IFIAS; CINVESTAV.
21. Giannina S., 2004. Tesis: Diseño de Construcción de un sistema de digestión Batch de 10 metros cúbicos para la producción de biogás en el Fondo Agropecuario de la Universidad Alas Peruanas. Lima Perú.
22. Gutiérrez G de J.; Mondaca I.; Meza Montenegro M.; Fuentes F.; Balderas J de J., Gortares P.; 2012. "Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía". Ide@s CONCYTEG, 7 (85), pp.881-894.
23. Huacuz Villamar, J M., 2002. "Comentarios y conclusiones del Primer Coloquio Internacional sobre la conversión a electricidad del gas producido en los rellenos sanitarios en México", ITESM, Aguascalientes.

24. Kaiser F.; Bas F.; Gronauer A., 2002. Producción de biogás a partir del guano animal: el caso de Alemania. Santiago, CL, Universidad Católica de Chile.
25. Kennedy, J.K. y D.V. Berg. 1982. Anaerobic digestion of piggery waste using a stationary fixed film reactor. *Agric. Wastes* 4: 151-158.
26. Laines Canepa, J.R., et al., 2011. Microorganismos que intervienen en la generación de biogás. *Hacia la Sustentabilidad: los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*. Pp. 640-644.
27. Mandujano M., I. 1981. Biogás: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.
28. Marchaim U., 1992. Biogas processes for sustainable development. FAO, Agricultural services bulletin 95, Roma.
29. McCaskey A.T., 1990. Microbiological and chemical pollution potential of swine waste. pp. 12-32. In: *Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdos*. CINVESTAV.

30. Morero B.; Gropelli E.; Campanella E., 2010. "Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás". Ciencia y tecnología 10, ISEU 2010.
31. Noyola A. y Monroy O., 1994. Experiencias y expectativas del tratamiento de residuales porcinos en México. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa. pp. 331-340. In: III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales". Montevideo, Uruguay.
32. Núñez O., 2009. Utilización de biogás como fuente de energía. Instituto Tecnológico de Cd. Juárez. México.
33. Obando R., 1991. Biogás, alternativa energética en explotaciones porcinas. Tesis Lic. Ing. Agr. San José, CR, UCR. 74 p.
34. Pedraza G.; Becerra M.; Conde N.; Chará J., 1995. Descontaminación productiva de aguas utilizadas en labores domésticas y en sistemas de producción en zonas de montaña. En: Sistemas Pecuarios Sostenibles para las Montañas Tropicales. CIPAV – CENDI. Cali, Colombia.
35. Pedraza G.; Chará J.; Conde N.; Giraldo S.; Giraldo L., 2002. Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. Fundación Centro de Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), Cali, Colombia.

36. SAGARPA FIRCO, 2007. Aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario.
37. Salazar G., 1993. Los digestores: Una alternativa energética en la porcicultura y un medio para evitar la contaminación. SARH-INIFAP-CIPAC. Campo Experimental Centro de Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.
38. Segovia G, C., 2002. "Proyecto GEF-Banco Mundial en Monterrey" en: Memorias Primer Coloquio Internacional sobre la conversión a electricidad del gas producido en rellenos sanitarios en México, ITESM. Aguascalientes.
39. SEMARNAT, 2010. Diagnóstico de la disposición final de los residuos sólidos urbanos. México.
40. SENER., 2012. Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. México.
41. Solari G., 2004. "Diseño de Construcción de un sistema de digestión Batch de 10 metros cúbicos para la producción de biogás". Universidad Alas Peruanas. Lima Perú.
42. Soria F; Ferrera R; Etchevers J; Alcantar G; Trinidad S; Borges L; Pereyda G., 2001. Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. Terra 19: 353-362.

43. Soria F.; Tun S; Trejo R; Terán S., 1994. Producción de hortalizas en la península de Yucatán.
44. Sosa R., 2006. "Tratamiento y uso de recursos producidos con excretas porcinas. *In* Encuentro sobre Nutrición y Producción de Animales Monogástricos (5, 1999, Maracay, VE). 1999. Maracay, VE, SIAN.
45. Soubes M., 1994. Biotecnología de la digestión anaerobia. pp. 136-148. In: III Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento de Aguas Residuales". Montevideo, Uruguay.
46. Schlegel H.G., and C. Zaborosch, 1993. General Microbiology, 2 edición. UK Cambridge University Press.
47. Tchobanoglous G., H., Theisen Y S., Vigil, 1994. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Mcgraw-Hill. Isbn 04-481-124.
48. Vázquez E. y Manjarrez R. 1993. Contaminación del agua subterránea por la actividad porcícola. Tecnología del Agua (España) 109: 38-43.
49. Verastegui L., J. 1980. El biogás como alternativa energética para zonas rurales. OLADE (Organización Latinoamericana de Alternativas de Energía). Boletín Energético del Ecuador 14:57-94.

50. Villamil, C.M.; Duque, C.O.; Caicedo, L.A. Sistemas de tratamiento para los residuos de la industria porcícola. ACP, Universidad Nacional, CORPOICA. 2000. 120 p.

51. Villamil, et. al., 2000. Sistemas de tratamiento para los residuos de la industria porcícola. CORPOICA, pag. 120.

Páginas Web

1. http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts114.html
2. <http://usi.earth.ac.cr/glas/sp/50000030.pdf>
3. http://www.diariolatribunadechiapas.com.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=34991&Itemid=27
4. <http://www.envitec-biogas.com/en/news-downloads/current-news/details/article/envitec-biogas-baut-drei-biogasanlagen-fuer-ktg-energie.html>
5. <http://www.enarsa.com.ar/index.php/es/areasdenegocios/385-generacion-de-energia-elctrica-a-partir-de-biogas>
6. <http://www.noticiasdeempresas.com/onu-promueve-el-uso-de-biogas-en-latinoamerica/publireportaje/4081/>
7. http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PER_2012-2026.pdf
8. <http://www.larepublica.pe/13-10-2012/tarapoto-inauguran-la-primera-planta-de-generacion-de-energia-electrica-con-biogas-de-estiercol#!foto2>

9. http://www.cofupro.org.mx/cofupro/archivo/fondo_sectorial/Chiapas/14chiapas.pdf
10. http://www.cmp.org/apoyos/BIOGAS0902/0524_LIBRO_de_BIOGAS.pdf
11. http://organica1.pquim.unam.mx/qo1/MO-CAP2.htm#_Toc476376054