



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN
EN ENERGÍAS RENOVABLES**

T E S I S

**“DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN FILTRO
PARA LA REDUCCIÓN DE DIÓXIDO DE
DIÓXIDO DE CARBONO PRESENTE
EN EL BIOGÁS, APLICABLE AL
SISTEMA DE BIODIGESTORES DM1”**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**PRESENTA:
MARCO ANTONIO PALAFOX MATUS**

**DIRECTORES:
DR. JOEL MOREIRA ACOSTA
M.C. YANHSY HERNÁNDEZ PORTILLO**



Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Dirección de Servicios Escolares
Departamento de Certificación Escolar
Autorización de impresión



TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS
14 DE MAYO DE 2019

C. PALAFX MATUS MARCO ANTONIO

Pasante del Programa Educativo de: INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN FILTRO PARA LA REDUCCIÓN DE DIÓXIDO DE
CARBONO PRESENTE EN EL BIOGÁS, APLICABLE AL SISTEMA DE BIOGESTORES DM1

En la modalidad de: TESIS PROFESIONAL

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional

Atentamente

Revisores

DR. PASCUAL LÓPEZ DE PAZ

DR. NEÍN FARRERA VAZQUEZ

M.C. YANHSY HERNÁNDEZ PORTILLO

Firmas

Ccp. Expediente

Revisión 1

Agradecimientos

A MIS PADRES.

Antonio Palafox y Birgina Matus, por todo el apoyo y la confianza que me han brindado a lo largo de todo este tiempo, por la comprensión y por estar siempre conmigo en todos los pequeños pasos que he dado, por las palabras de aliento cuando las cosas no parecían ir bien, quiero que sepan que este pequeño logro es de ellos más que mío. Gracias papá y mamá!

A MIS DIRECTORES.

Al Dr. Joel Moreira Acosta y la MC. Yanhsy Hernández Portillo, por la paciencia y todo el apoyo brindado en todas las horas y horas de trabajo, por ayudarme y alentarme siempre a aprender cosas nuevas y nuevos retos, a no perder las ganas en este proyecto, por supuesto que sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible.

AL EQUIPO DE BIOENERGÍA.

Gracias a todos mis compañeros del equipo bioenergía por su apoyo siempre incondicional en los trabajos realizados, al Arq. Efraín, al MC. Oscar, a la MC. Lorena, al Ing. Fidel, al Dr. Neín, al Dr Pascual, a mis amigos y compañeros Uriel, Luis Enrique y Williams Moisés, gracias por todo.

A MIS AMIGOS DE UNIVERSIDAD.

Por acompañarme en esta aventura, por brindarme muchas y grandiosas experiencias, a Ernesto, Darwin, Wilian, Luis, Didier, Bine, Edgar y Oscar, gracias por todo.

Índice general

Agradecimientos	i
Resumen	v
1. Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.2.1. Historia del biogás	2
1.2.2. Primeros biodigestores DM1 en Chiapas	3
1.2.3. Tecnologías para la mejora en la calidad del biogás	4
1.2.4. Captura de los gases de combustión con soluciones alcalinas	4
1.2.5. Tecnologías para la purificación de biogás para generación eléctrica en Chile	5
1.2.6. Filtros de purificación de biogás como componente de una instalación de un biodigestor DM1	6
1.2.7. Generación de biogás en el laboratorio de bioenergía, con biodigestores DM1	7
1.2.8. Principales metodos de purificación de biogás a gran escala	7
1.3. Problemática.	9
1.4. Objetivos e hipótesis	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos Particulares	10
1.4.3. Hipótesis	11
1.5. Justificación	11
	ii

1.6. Conclusiones	11
2. Fundamentos teoricos	12
2.1. Clasificación de las energías renovables	13
2.2. Biomasa	13
2.3. Biogás	13
2.4. Biodigestores	14
2.5. Tipos de biodigestores	14
2.5.1. Biodigestor de domo flotante o Indú	14
2.5.2. Biodigestor tipo Chino	15
2.5.3. Biodigestor batch (discontinuo o de regimen estacionario) . . .	16
2.6. Generación	17
2.6.1. Reacciones bioquímicas en la generación	18
2.6.2. Tiempo de retención	18
2.7. Características del biogás	19
2.7.1. Composición del biogás	20
2.7.2. Ventajas en el uso del biogás	20
2.8. Medición de CO_2	22
2.8.1. H_2S Presente en el biogás	23
2.8.2. Presencia de N_2 y O_2 en el biogás	24
2.9. Purificación de biogás	24
2.9.1. Encapsulado de gases	26
2.10. Remoción de H_2S	26
2.10.1. Utilización de óxido de hierro	27
2.10.2. Carbón activado	28
2.10.3. Eliminación de H_2S con tecnologías húmedas	29
2.10.4. Utilización de bio-tecnologías	29
2.11. Remoción de CO_2	31
2.11.1. Absorción con agua	31
2.11.2. Absorción con solventes físicos	33
2.11.3. Absorción química	33
2.12. Análisis y sistemas de medición de gases	35
2.12.1. Cromatografía	35

2.12.2. Multitec 540	37
2.12.3. Landtec GEM-5000	38
3. Metodología	40
3.1. Desarrollo del filtro de remoción de CO_2	41
3.1.1. Diseño	41
3.1.2. Selección de materiales	41
3.2. Construcción e instalación	42
3.2.1. Construcción	42
3.2.2. Instalación del filtro de purificación de CO_2 al sistema de generación de biogás	43
3.3. Evaluaciones con el filtro de remoción de CO_2	44
3.3.1. Elaboración de la mezcla	45
3.3.2. Análisis del gas	48
4. Resultados y conclusión	50
4.1. Diseño	51
4.1.1. Modelado 3D con software CAD	53
4.1.2. Selección de materiales	59
4.2. Construcción e Instalación del sistema de purificación	61
4.2.1. Construcción	61
4.2.2. Instalación	71
4.3. Evaluaciones	75
4.3.1. Elaboración de la mezcla	75
4.3.2. Análisis al biogás	78
4.3.3. Conclusión	90
4.3.4. Trabajos a futuro	92
5. Anexos	93
5.1. Ecuación para el dimensionado del filtro	93
5.2. Ecuación de cantidad de hidroxido	95
5.2.1. Ecuación para determinar molaridad	96
Bibliografía	97

Resumen

En la actualidad, las tecnologías para cubrir la demanda energética mundial se encuentran en un punto crucial, mientras que; por una parte los hidrocarburos, conocidos también como combustibles fósiles comienzan el declive de su ciclo de vida, tecnologías no tan usuales como las energías renovables, están revolucionando el sector energético mostrando nuevas alternativas. Dentro de las energías renovables se encuentra la bioenergía, que en la actualidad está en creciente desarrollo.

El siguiente trabajo de investigación, muestra los resultados obtenidos del diseño, construcción y evaluación de un filtro de remoción de impurezas presentes en el biogás (principalmente CO_2), y su posterior instalación al sistema de biodigestores DM1, mismos que generan biogás a partir de la descomposición de materia orgánica (estiércol vacuno). En dicho proyecto, se muestra también la adecuación de un filtro desarrollado previamente a base de óxido de hierro III (Fe_2O_3) que se encargan de capturar partículas de H_2S que se encuentran presentes en el biocombustible generado.

Como se indicó inicialmente, el filtro desarrollado se encarga de eliminar las partículas de CO_2 por medio de una mezcla alcalina de agua destilada e hidróxido de potasio (KOH), esto es llevado a cabo con la conducción del biogás desde la salida del biodigestor, pasando primeramente por el filtro de H_2S y posteriormente la inducción de dicho gas al filtro de CO_2 , donde reacciona con la mezcla depositada al interior de este, acción que es realizada con una pequeña tubería al interior del filtro y conectada al sistema de conducción del biocombustible, de este modo el biogás entra en contacto con la mezcla que se encarga de encapsular las partículas de CO_2

presentes.

De esta manera, se consiguió un biogás con índices de CO_2 altamente bajos, respecto a los presentados directamente a la salida del biodigestor, se apreció también una disminución en las cantidades de H_2S presente, reduciendo aún más las que entrega el filtro de óxido de hierro III.

Capítulo 1

Generalidades

1.1. Introducción

El crecimiento de la población representa una problemática de gran importancia, ya que con ello las necesidades para la supervivencia de los individuos se vuelven cada vez más complejas, una muestra de esto es la manera de cubrir la demanda energética mundial, que va en aumento diariamente, en el pasado esta necesidad fue cubierta con energía que se obtiene de la transformación en mayor medida de los hidrocarburos que se encuentran en el subsuelo. Más tarde el conocimiento científico demostró que esta forma de generación posteriores a su utilización generan residuos que de una manera u otra son nocivos para la calidad de vida de los seres vivos, esto sin contar que tiene un periodo de regeneración prácticamente inalcanzable a escala humana. Derivado de esto se estudiaron diversos métodos de generación de energía, con el fin de cumplir con la demanda energética mundial y a la vez reducir los impactos ambientales que se venían presentando con los hidrocarburos.

Por estas cuestiones y con ayuda del avance científico y tecnológico se desarrollan tecnologías para la generación de energía a partir de fuentes renovables, reducir el uso de los hidrocarburos. Las energías renovables se clasifican en distintos tipos, como lo son la energía solar, eólica, bioenergía, hidráulica, etc [1].

En el Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (3IER) de la

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), se trabaja actualmente el área de bioenergía la cual permite obtener energía útil de residuos orgánicos, en este tema se encuentran los biodigestores que son dispositivos encargados de transformar en energía útil la materia orgánica, a través de un proceso de descomposición anaerobia para aprovecharla como biogás. Dicho gas, se compone en mayor cantidad por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), el gas metano es parte fundamental en el biogás y es con este que se lleva a cabo la combustión, el dióxido de carbono por otra parte es un elemento no benéfico para este fenómeno por no ser un gas de combustión.

Debido a que no se puede aumentar la cantidad de metano que compone al biogás, lo que se pretende es eliminar el mayor porcentaje de CO_2 posible. Y con esto lograr una mejora en el poder calorífico.

1.2. Antecedentes

La estrategia de utilizar los desechos orgánicos como materia prima para la generación de algún tipo de energía que sea de utilidad para los individuos se remonta a muchos años atrás, aunque en la antigüedad no se realizaron registros o anotaciones de los experimentos, así como sus resultados. En la actualidad el tema de generación de biogás a partir de desechos orgánicos esta en crecimiento pero las investigaciones y experimentos realizados han servido como punto de referencia para guiar a las investigaciones con fines de mejorar.

1.2.1. Historia del biogás

Los primeros indicios del biogás se remontan a los años 1600 cuando se descubre que es un gas proveniente de la descomposición de desechos orgánicos por científicos de la época. Tiempo más tarde, en el año 1896 se desarrolló el primer biodigestor en la India y posteriormente el crecimiento de esta tecnología se extendió por toda Europa [2].

Con la problemática que implicaron las guerras mundiales, el estudio de generación de biogás se profundizó en países como China, India y gran parte de Europa,

quienes a raíz de este fenómeno se convirtieron líderes en la materia, dicha situación se vio interrumpida por el fácil acceso a los hidrocarburos. Y posteriormente derivado de una crisis energética en la década de los y 70's la investigación por la tecnología de generación de biogás se retomó no solo en Asia y Europa si no también en países de Latinoamérica.

En los últimos 25 años, las investigaciones con respecto a la generación de biogás y sus aplicaciones han proporcionado excelentes resultados que han permitido el estudio de los microorganismos presentes en la digestión anaerobia y esto dio como resultado que en la actualidad países como Alemania, India, China, Estados Unidos, Italia, Suiza, Holanda, Francia y Filipinas, esten posicionados como los más importantes en la generación de tecnologías aplicables al biogás y sus aplicaciones [2].

Actualmente, México cuenta con 70 centrales de generación que emplean bioenergía, ya sea biomasa o biogás. Las regiones con mayor producción de energía eléctrica a través de estos bioenergéticos son Oriental y Occidental, con 598.0 GWh y 389.0 GWh respectivamente.

En 2015, se logró una capacidad de generación de 203.6 GWh siendo la región del sureste conformada por estados como Veracruz, Chiapas y Oaxaca de los más importantes en cuanto a la producción de energía por medio de Biomasa [3].

1.2.2. Primeros biodigestores DM1 en Chiapas

Los primeros biodigestores de cúpula fija fueron diseñados y desarrollados por el cuerpo académico de la Universidad Politécnica de Chiapas, conformado por el Dr. Joseph Sebastian Pathiyamattom, Dr. Joel Moreira Acosta, Dr. Joel Pantoja Enríquez, el Dr. Guillermo Ibáñez Duharte, junto con alumnos de la licenciatura en ingeniería en energía. Estos biodigestores fueron instalados en el rancho Santa Malena en Villa Hidalgo, municipio de Villaflores en el año 2006 [4].

En el año 2010, se retomaron los trabajos de poner en marcha los biodigestores DM1, pero ahora en las instalaciones del laboratorio de bioenergía perteneciente al

entonces CIDTER en la UNICACH. En el transcurso de ese tiempo se realizaron varias modificaciones al diseño original del biodigestor DM1, se hicieron también nuevas instalaciones en comunidades de este nuevo diseño, como en la ranchería San Fernando y algunas otras colonias de Cintalapa, las instalaciones fueron un éxito pero nadie tomo la iniciativa de continuar con la evaluación de los dispositivos por lo que actualmente se tienen muy pocas referencias escritas de ellos [4].

1.2.3. Tecnologías para la mejora en la calidad del biogás

Con el fin de mejorar la calidad de biogás, se realizaron distintas investigaciones para encontrar los medios y metodos para llevar a cabo el proceso. Como resultado se consiguió que se pueden eliminar porcentajes de CO_2 al hacer contacto dicho gas con el agua, aunque si a esta le agregan ciertas sustancias, la eficiencia para este metodo incrementa.

1.2.4. Captura de los gases de combustión con soluciones alcalinas

Debido a la abundante cosecha de arroz en la región de la Orinoquia Colombiana, estudiantes de la universidad nacional sede Medellín, realizaron un experimento combustionando la cascarilla del arroz que se cosecha con el fin de encapsular los gases generados a través de soluciones.

Los ensayos se realizaron en un dispositivo de combustión que se desarrolló específicamente para el experimento. El dispositivo contó con horno quemador de material metálico un diámetro de 0.30 m, y una altura aproximada de 1m, en la parte intermedia se encuentra la cámara de combustión la cual cuenta con un soporte metálico en donde se depositan las muestras de cascarilla de arroz previamente secadas. Después de realizar la combustión, los gases que se generaron se condujeron a un recipiente con capacidad de 25 litros, en donde se encuentran 10 litros de una mezcla de 100 gramos de $NaOH$ en 10 litros de agua, esto con el fin de en encapsular los gases en la solución alcalina.

El ensayo fue realizado 5 veces en un tiempo promedio de combustión de 140 minutos, en donde el pH del $NaOH$ tuvo un promedio inicial de 12.40 y un promedio de acidez final de 8.30. La sustancia alcalina se transformó en $CaCO_3$ (carbonato de calcio), y se sometió a micro análisis de composición por microscopía electrónica de barrido, en donde se determinaron los componentes de dicha sustancia, descubriendo con esto que el producto final de los ensayos resulto ser un elemento de gran beneficio en cuestiones agrícolas si se utiliza como abono [5].

1.2.5. Tecnologías para la purificación de biogás para generación eléctrica en Chile

Derivado de la problemática energética que atravesó el país Chileno y las modificaciones a la ley en el sector energético, investigadores de la universidad de Chile desarrollaron investigaciones en el área de la bioenergía con el fin de realizar filtros que sean empleados en el área del biogás para su uso en la generación de energía eléctrica.

Partiendo de la problemática que resulta la presencia de (H_2S) ácido sulfhídrico como componente del biogás, los investigadores desarrollaron análisis sobre algunos métodos para la remoción de esta sustancia del biogás, ya que es un gas altamente corrosivo, por lo que genera inconvenientes al momento de llevar a cabo su almacenamiento y traslado.

Así mismo, detallaron las tecnologías con las que se cuenta para llevar a cabo el proceso de purificación del biogás y de las estrategias que se han utilizado para disminuir los costos.

En la investigación mencionaron tres importantes métodos para llevar a cabo la purificación del gas; por adsorción, absorción y método de filtración por membrana. Además realizaron investigaciones sobre los métodos biológicos para la eliminación del H_2S como componente de biogás y con esto lograr una disminución de residuos tóxicos al momento de realizar la purificación así como también los costos, siendo estos dos puntos una gran ventaja que presentan los filtros biológicos ante los

fisicoquímicos [6].

1.2.6. Filtros de purificación de biogás como componente de una instalación de un biodigestor DM1

En las instalaciones del CIDTER, se ha estado trabajando en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías a partir de fuentes renovables, en dicho centro se encuentra ubicado un laboratorio de bioenergía el cual cuenta con un sistema de biodigestores. En estas instalaciones se realizó un proyecto el cual tuvo como propósito generar energía eléctrica a partir de biogás, la investigación fue llevada a cabo por el hoy maestro en ciencias Luis Antonio Vázquez Valencia.

En su investigación Vázquez Valencia realizó el diseño e instalación de un sistema de biodigestores para la generación de biogás y abono a partir de desechos orgánicos. Dentro del marco de su proyecto también realizó el diseño, construcción e implementación de un sistema de purificación para el biogás generado por los biodigestores. Este sistema de purificación, conto con 3 filtros en los que destaco el filtro secundario, ya que dicho filtro tenía como objetivo reducir la mayor cantidad de CO_2 presente en el biogás y con esto lograr una mejora en la eficiencia al momento de realizar la combustión [7].

En dicha investigación, no se profundizó en cuanto a la purificación del biogás, ya que el estudio se centró en la generación de biogás con fines de transformarlo en energía eléctrica.

Actualmente, dos de los tres filtros ya no se encuentran en operación y únicamente se cuenta con un filtro para la reducción de ácido sulfhídrico presente en el biogás. A pesar de todo, el trabajo de Valencia ha resultado un paso muy importante para el laboratorio de bioenergía del 3IER, debido a que no se tenía en operación ningún sistema para llevar a cabo la purificación de biogás, recientemente se retomó el filtro de H_2S para su operación y actualmente se encuentra operando.

1.2.7. Generación de biogás en el laboratorio de bioenergía, con biodigestores DM1

En 2015, se realizaron trabajos de generación de biogás a partir de estiércol de bovino en el laboratorio de bioenergía del 3IER, esto con la ayuda de los biodigestores DM1. La materia prima se obtuvo de las granjas de la facultad de veterinaria de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), y transportada a las instalaciones del laboratorio de bioenergía. El biodigestor con capacidad de 1100 litros de volumen, de los cuales aproximadamente 900 litros son ocupados por la mezcla de materia orgánica. Para llevar a cabo el proceso fueron necesarios 360 kg de estiércol y 540 litros de agua, con una relación de 1:1.5 [4].

Es importante mencionar que, Velez [4], realizó modificaciones al diseño original de los biodigestores, invirtiendo su geometría 180 grados y con esto logró una vista completamente diferente al biodigestor DM1. Esta modificación ayudó a combatir ciertas fugas que presentaba el diseño original.

En este proyecto, Velez Landa llevo a cabo la generación de biogás, la determinación de los componentes y de las características así como el almacenamiento, mas no enfocó ningún estudio en su trabajo sobre determinar y mejorar la eficiencia de dicho gas. Únicamente utilizó un filtro para la remoción de H_2S de la composición del biogás y no uno para la disminución de CO_2 . Cabe mencionar que el filtro que se utilizó para este proyecto fue el mismo que Luis Antonio Vázquez Valencia desarrolló e instaló al sistema de biodigestores DM1 para su proyecto de generación de biogás.

1.2.8. Principales metodos de purificación de biogás a gran escala

Existen una distintos tipos de métodos para la remoción de sustancias no benéficas en el biogás, como son el CO_2 y el H_2S presentes en el biogás.

Las impurezas que contiene el biogás, pueden eliminarse por distintos métodos y uno de ellos es la utilización de agua, con esto se consigue eliminar gran parte del

CO_2 , esto además resulta ser un proceso de bajo costo y altos beneficios, debido a que al interaccionar el biogás con el agua en contra corriente, esta última remueve significativamente las impurezas previamente mencionadas y el agua puede ser recirculada muchas veces. Uno de los inconvenientes que presenta este método, es que a gran escala la bomba para recircular el agua tendrá un alto consumo energético.

La purificación del gas también conlleva a la eliminación de H_2S que es de suma importancia, el ácido sulfhídrico al reaccionar con agua se convierte en ácido sulfúrico altamente corrosivo si llegase a pasar por un motor. Para disminuir el contenido de este compuesto, se pueden emplear tratamientos físico-químicos de acondicionamiento o un sistema consistente en la adición de sales de hierro. Dentro de los tratamientos, los procesos redox son especialmente útiles en la eliminación del sulfhídrico. El empleo de disoluciones de sulfato férrico como oxidante es adecuado. El H_2S puede ser absorbido con ayuda de agua y también de otros agentes como el $NaOH$ (hidróxido de sodio) que son de muy buena eficiencia. Todos los procesos para la remoción de H_2S presentan esta última característica y resultan ser económicamente convenientes, esto sin comprometer al trabajo final que es la remoción del ácido, ciertos procesos llegan a remover hasta el 99.99% del H_2S presentes en el biogás [8].

1.3. Problemática.

Existen algunas impurezas presentes en el biogás, mismas que representan una dificultad para los diversos procesos y/o trabajos que se realicen con este biocombustible.

Compuestos como el H_2S , que afectan tanto a las instalaciones de trabajo como a las actividades y/o procesos en los que el biogás sea requerido, debido a que es altamente corrosivo, así como los altos contenidos de CO_2 presentes en dicho gas, resultan ser grandes inconvenientes al momento de combustionar, a diferencia del CH_4 , otro componente de gran porcentaje en este combustible, que es esencial para realizar dicho fenómeno (combustión).

De esta manera, se contempla la realización de un sistema que reduzca en gran porcentaje las cantidades del CO_2 en el biogás generado y conseguir así un gas con altas cantidades de CH_4 lo que representa un aumento en el poder calorífico y por tanto una mejor eficiencia de combustión.

1.4. Objetivos e hipótesis

1.4.1. Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un filtro que elimine el CO_2 presente en la composición del biogás generado en los biodigestores DM1.

1.4.2. Objetivos Particulares

- **Desarrollar un filtro, teniendo en cuenta sus parámetros definidos como son las medidas, para tener una visualización realista del dispositivo, esto con la ayuda de un software (CAD).**
 - Definir las medidas y las unidades con las que se pretende realizar el diseño.
 - Definir los componentes a utilizar para el funcionamiento del filtro.
 - Definir los materiales con los que se pretende realizar el filtro.
 - Llevar a cabo la construcción de manera física del diseño CAD obtenido.
- **Intalar el filtro construido al sistema de biodigestores DM1 del laboratorio de bioenergía del 3IER.**
 - Instalar el filtro como componente del sistema de los biodigestores.
 - Evaluar el biogás obtenido después de hacerlo circular por el filtro.
 - Comparar al biogás purificado.
- **Realizar comparaciones de los resultados obtenidos.**
 - Variar el porcentaje de la solución alcalina que reaccionará al interior del filtro.
 - Representar en tablas y graficas los resultados obtenidos de las evaluaciones.
 - Analizar los resultados graficados y definir que muestra resultado más eficiente.

1.4.3. Hipotesis

Realizar un filtro para la reducción de CO_2 presente en el biogás que se genera en los biodigestores del laboratorio de bioenergía del 3IER, permitirá obtener un gas libre de componentes no benéficos para la combustión. Con esto se logrará eliminar en gran porcentaje al CO_2 de del biogás generado y dejar como elemento principal en la composición al CH_4 , debido a que como se ha mencionado previamente el CH_4 si es un gas de combustión contrario al CO_2 que por su parte, impide que este fenómeno se realice de manera óptima.

1.5. Justificación

La generación de biogás, actualmente tiene un panorama muy amplio dado que no requiere de una tecnología tan costosa en comparación a otras fuentes de generación de energía, por ello es de suma importancia mejorar la calidad de dicho gas y con esto lograr una mejora en la combustión. La solución a esto es un sistema de purificación de alto rendimiento y bajo costo, debido a que como se sabe en la mayoría de las ocasiones el biogás es generado en zonas de bajos recursos económicos.

1.6. Conclusiones

Como se mencionó en la investigación la tecnología de la utilización de desechos orgánicos como materia prima para la generación de energía no es nada novedoso, y en la actualidad esta tecnología esta creciendo por las constantes inovaciones a los sistemas así como la investigación en busca de nuevos metodos para alcanzar cada vez más un óptimo desarrollo.

Por otra parte, aún queda mucho por hacer debido a que el biogás generado contiene una gran cantidad de impurezas que no benefician en nada a la actividad final que es la combustión por lo que el objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema de purificación que elimine la mayor cantidad de impurezas que presenta el biogás y con esto lograr aumentar su poder calorífico.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Para la Física, la energía es la capacidad potencial que tienen los cuerpos para producir trabajo o calor, y se manifiesta mediante un cambio [9]. En la actualidad podemos clasificar a las fuentes de generación de energía, en dos tipos; las no renovables y las renovables.

Las Fuentes de energía no renovables son aquellas que se encuentran de forma limitada en el planeta y cuya velocidad de consumo es mayor que la de su regeneración, también las más avanzadas en cuanto a tecnología de extracción o producción se refiere, pero suelen causar un gran impacto medioambiental. Dentro de las energías no renovables podemos encontrar los combustibles fósiles, que son el petróleo, el carbón y el gas natural, siendo los dos primeros los que suministran el mayor porcentaje de la energía primaria consumida en el mundo. Por otra parte, el gas natural puede encontrarse en yacimientos de carbón o petróleo, dado que representa un menor porcentaje en cuanto a suministro de la energía consumida [10].

Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; se renuevan continuamente, a diferencia de los combustibles fósiles, que se contemplan en determinadas cantidades, agotables en un plazo casi definido. Las principales formas de energías renovables que existen son: la bioenergía, hidráulica, eólica, solar, geotérmica y las energías marinas. Las energías renovables provienen, de forma directa o indirecta, de la energía del Sol [11].

2.1. Clasificación de las energías renovables

Como se mencionó anteriormente las energías renovables son las que para su regeneración ocupan de tiempo mucho menor comparado con los combustibles fósiles, dichas energías se pueden clasificar según sea su método de trabajo. En la clasificación de las energías renovables se encuentran: la energía eólica, solar, mareomotriz, hidráulica, geotérmica, y bioenergía.

2.2. Biomasa

La bioenergía, también llamada biomasa, es la materia orgánica contenida en residuos de origen animal o vegetal (incluyendo desechos orgánicos) que puede ser capturada y almacenada como fuente de energía química para su utilización en distintos sectores. La biomasa a su vez se clasifica en algunos puntos según sea su método de trabajo e implementación. La forma de transformar la biomasa en energía depende fundamentalmente, del tipo de biomasa que se esté tratando y del destino que se quiera dar a esta energía. El sector bioenergético está basado en tres modos de usar la energía: para calefacción, generación eléctrica y producción de biocombustibles [12].

2.3. Biogás

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno. El biogás puede encontrarse en los pantanos, por los gases presentes en dicho ambiente, también en lugares en donde previamente hayan existido ciertos minerales que reaccionan con el ambiente dando paso a la generación de biogás. Existen muchas variantes de

gas natural dependiendo de su lugar de origen y se distinguen en su composición química, en su razón de elementos químicos y por ende en sus propiedades [13].

Como se mencionó anteriormente el biogás puede generarse de manera voluntaria en ciertos dispositivos llamados biodigestores.

2.4. Biodigestores

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar, este puede ser excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etcétera, en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos [14].

Los materiales que se abonan al biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás.

2.5. Tipos de biodigestores

Hay muchos tipos de plantas de biogás, pero los mas comunes, son dos, el flotante y el domo fijo, los cuales serán descritos a continuación. La baja aceptación de muchos de estos biodigestores ha sido principalmente debida a los altos costos, la dificultad de instalación y problemas en la construcción de las partes y repuestos [13].

2.5.1. Biodigestor de domo flotante o Indú

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

ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo de hormigón. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que sube y se cae en una guía central. La presión del gas disponible normalmente varía entre 4 a 8 cm. de columna de agua. El reactor se alimenta continuamente a través de una tubería de entrada como se muestra en la figura 2.1 [13].

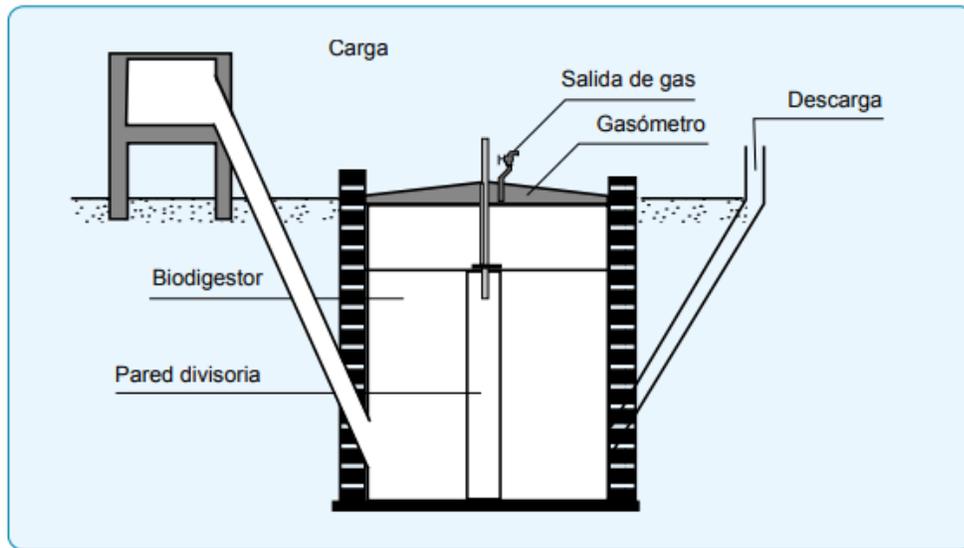


Figura 2.1: Esquema de un biodigestor de domo flotante [15].

2.5.2. Biodigestor tipo Chino

Consiste en una firme cámara de gas construida de ladrillos, piedra u hormigón. La tapa y la base son semiesféricas y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas para hacerlo firme, tal y como lo muestra la figura 2.2. Hay un tapón de inspección en la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo con presiones entre 1 y 1.5 m de columna de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante altas y es la razón para la forma semiesférica. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor [13], por lo que no es muy común encontrar este tipo de tecnologías.

En la actualidad, más de cinco millones de biodigestores de este tipo se han construido en China y han estado funcionando correctamente pero, la tecnología no ha sido popular fuera de ese país [13].

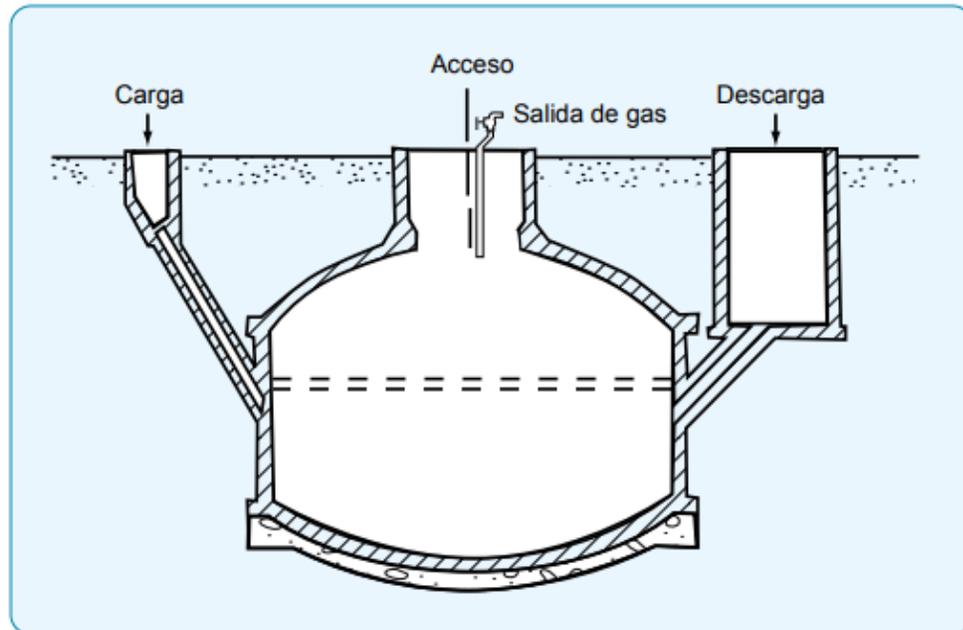


Figura 2.2: Esquema de un biodigestor tipo Chino [15].

2.5.3. Biodigestor batch (discontinuo o de regimen estacionario)

Esta tecnología, consiste en una batería de tanques o depositos herméticos (digestores) con una salida de gas conectada con un gasometro flotante, donde se almacena el biogás [15].

La alimentación o carga del digestor con la materia prima, sólida, seca, se realiza por lotes (discontinuamente) y la carga de los residuos estabilizados se efectúa una vez que ha finalizado la producción de biogás como muestra la figura 2.3.

Este sistema discontinuo es aplicable en situaciones particulares, como sería la de materias primas que presentan problemas de manejo en un sistema semi continuo y

continuo, o materiales difíciles de digerir metanogénicamente o cuando las materias primas a procesar, están disponibles en forma intermitente [15].

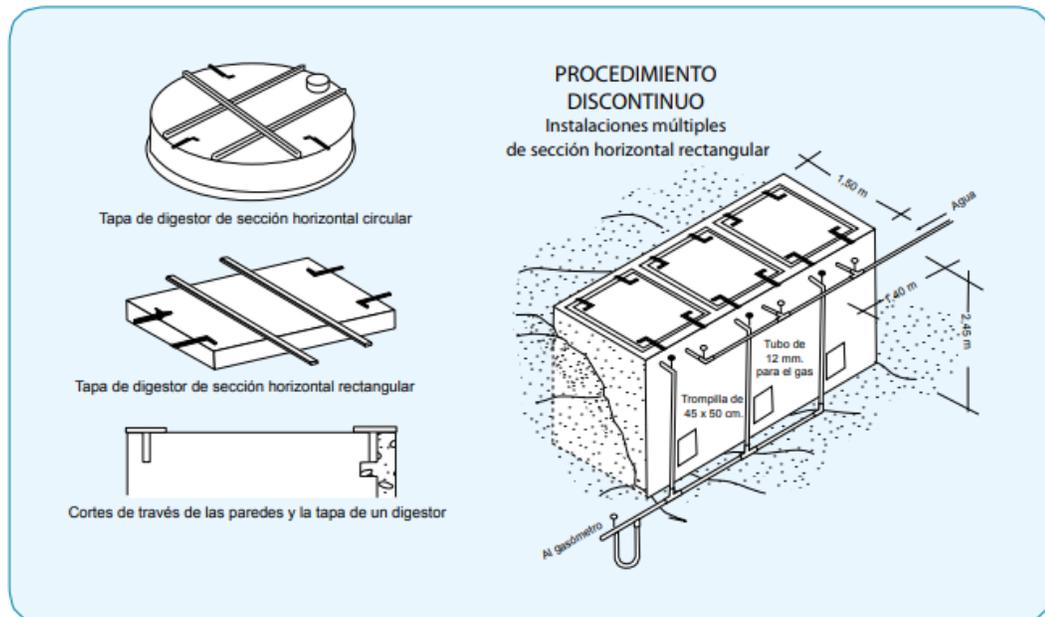


Figura 2.3: Esquema de un biodigestor tipo batch [15].

2.6. Generación

La generación de biogás se ve implicada por distintos factores que intervienen en el tiempo de la misma, temperatura, acidez, etc. Para iniciar este proceso, el sustrato debe tener un rango de temperatura mínima entre 4 a 5 °C, y no sobre pasar la máxima que es de 70 ° C aproximadamente. Generalmente se toman en cuenta los rangos de temperatura en base al tipo de bacterias. La tabla 2.1 muestra algunas de las características de los tipos de bacterias.

De acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes los tiempos de retención de líquidos y sólidos pueden variar.

Bacterias	Rango de temperatura	Sensibilidad
Psicofilicas	menos de 20	2 °C/hora
Mesofilicas	entre 20 y 40	1 °C/hora
Termofilicas	mas de 40	0.5 °C/hora

Cuadro 2.1: Caracteristicas de algunas bacterias [16].

2.6.1. Reacciones bioquímicas en la generación

Durante la digestión anaerobica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas. Como se ha mencionado anteriormente los porcentajes de CH_4 y CO_2 que son los principales componentes del biogás varían dependiendo de ciertos factores. La ecuación 2.1 muestra la reacción química que ocurre en el proceso de generación.



2.6.2. Tiempo de retención

El tiempo de retención esta intimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en tiempos de retención requeridos y consecuentemente seran menores los volumenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de materia [2]. La tabla 2.2 muestra los tiempos de retención recomendados para los diferentes tipos de materias.

Materia prima	Tiempo de retención hidráulica
Estiercol vacuno	20 a 30 días
Estiercol porcino	15 a 25 días
Estiercol aviar	20 a 40 días

Cuadro 2.2: Tiempos de retención de los tipos de materia [2].

Los tiempos de retención, son un punto muy importante dentro del proceso de generación de biogás, es por ello que es preciso establecer y definir previamente los

tiempos. El tiempo de retención también puede ser calculado con la ecuación 2.2 [4].

$$HRT(d) = \frac{VOL_{digestor}}{VOL_{entrada}} \quad (2.2)$$

Donde:

$VOL_{digestor}$ = Volumen total del biodigestor (m^3).

$VOL_{entrada}$ = Entrada diaria total (m^3).

2.7. Características del biogás

Como se ha mencionado previamente, el biogás es un combustible compuesto principalmente por CO_2 y CH_4 , siendo este ultimo el elemento indispensable para llevar a cabo la combustión, esto significa que cuando mas presencia haya de CH_4 en la composición del biogás, éste tendra una mayor eficiencia de combustión (poder calorífico). El valor calorífico superior alto es la energía generada cuando 1 Nm^3 de biogás se quema y el vapor de agua formado dentro de la combustión se condensa [2].

El número de metano describe la resistencia del gas a golpeo cuando es usado en un motor de combustión. El metano tiene por definición un número de metano de 100 y el H_2 un número de metano de 0. El CO_2 aumenta el número del metano porque es un gas no combustible con una alta resistencia de golpeo. Una mejora en la calidad del biogás, por tanto, tiene un número de metano superior a 100 [17].

El biogás contiene una variedad de compuestos de azufre, sobre todo sulfuros, aunque los rastros de disulfuros y de tioles están también presentes. Especialmente el azufre oxidado (sulfato y sulfito) que es corrosivo con la presencia de H_2O . El H_2S por sí mismo es reactivo con la mayoría de los metales y la reactividad se aumenta por la concentración y la presión, por la presencia de H_2O y una temperatura elevada [17].

Todas las plantas de biogás se deben equipar de una cierta clase de filtro para reducir la cantidad de elementos de impureza, los procesos que se requiera, en este caso reducir la cantidad de CO_2 presentes en el biogás.

La tabla 2.3 muestra algunas características con elementos que comúnmente conforman al biogás y una comparación del mismo con otros tipos de gases que dan paso a la combustión.

2.7.1. Composición del biogás

El biogás, se compone en un gran porcentaje de gas metano de 55 a 65 %, dióxido de carbono de 30 a 40 % y en un menor porcentaje ácido sulfhídrico y otros elementos como el hidrógeno 0.03 %. Dichos componentes son los que intervienen y hacen que se lleve a cabo el fenómeno de la combustión de este gas [16].

El elemento más importante para la combustión dentro de los componentes del biogás es el metano (CH_4), debido a su alto poder calorífico, aunque este elemento comúnmente es el que más presencia en porcentaje tiene dentro de los componentes, los demás elementos presentes también tienen un papel en la combustión.

La tabla 2.4, menciona las características más importantes de los principales elementos que componen al biogás.

2.7.2. Ventajas en el uso del biogás

El uso de este biocombustible llega a representar un gran aporte ecológico y económico por ciertas características que presenta como se pueden apreciar en el siguiente listado.

- Residuos de la materia orgánica que genera la producción del biogás pueden ser utilizados en el sector agrícola, ya que este componente genera beneficios al

Parametro	Gas de rellenos sanitarios	Biogás	Gas natural del mar del norte	Gas natural de Alemania
Poder calorífico MJ/kg	12.3	20.2	47	38
Densidad kg/Nm ³	1.3	1.2	0.84	0.8
CH ₄ % (variación)	40 (30-65)	63 (53-70)	87 (-)	81 (-)
Hidrocarburos % vol	0	0	12	3.5
Hidrógeno % vol	0-3	0	0	
Monóxido de carbono % vol	0	0	0	0
CO ₂ % vol (variación)	40 (15-50)	47 (30-50)	1.2 (-)	1 (-)
Nitrógeno % vol (variación)	15 (5-40)	0.2 (-)	0.3 (-)	14 (-)
Oxígeno % vol (variación)	1 (0-5)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
Sulfuro de hidrógeno (ppm)	menor de 100 (0-500)	menor de 1000 (0-104)	1.5 (1-2)	
Amoniaco (ppm)	5	mayor de 100	0	
Total de cloro (Mg/Nm ³)	20-200	0-5	0	

Cuadro 2.3: Composición del biogás y gas natural [17].

Características	CH_4	CO_2	Otros
Porcentaje volumen	55 - 65	30 - 40	3
Valor calórico MJ/m^3	35.8	-	22
Valor calórico $kcal/m^3$	8600	-	5258
Porcentaje de ignición por el aire	5 - 15	-	-
Temperatura de ignición en $^{\circ}C$	650 - 750	-	-
Presión crítica en mpa	4.7	7.5	8.9
Densidad relativa	0.55	2.3	1.2
Inflamabilidad en porcentaje vol aire	5 - 15	-	-

Cuadro 2.4: Especificaciones del biogás [16].

suelo aumentando la capacidad de retener humedad y la capacidad de infiltración del agua.

- Depuración ambiental y ecológica, por lo que ayuda a la no contaminación y calentamiento global.
- Los costos por la instalación del sistema son muy accesibles.
- La materia prima es existente en cualquier lugar.

2.8. Medición de CO_2

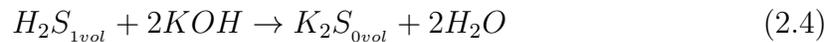
Como se ha venido mencionando, los componentes principales del biogás son el CH_4 y el CO_2 su porcentaje varía dependiendo de diversos factores como el tipo de materia, tiempo de retención, etcétera.

La medición se lleva a cabo poniendo en contacto una muestra de un volumen conocido, por lo general 100 ml, con una solución de hidróxido, en este caso hidróxido de potasio (KOH). El dióxido de carbono reacciona con el hidróxido formando

carbonato de potasio, como se muestra en la ecuación 2.3 [16].



En la reacción, el dióxido de carbono desaparece de la fase gaseosa, y el carbonato de potasio formado se queda en la fase líquida; además, la pérdida de volumen del gas es igual al contenido de dióxido de carbono. Adicionalmente, sulfuro de hidrógeno presente en el gas se combina también con el hidróxido de potasio pero el volumen de sulfuro de hidrógeno es normalmente tan pequeño que su efecto puede ser ignorado como se muestra en la ecuación 2.4 [16].



Se usa el hidróxido de potasio (KOH) en lugar del hidróxido de sodio $NaOH$ para absorber el dióxido de carbono debido a la mayor solubilidad del carbonato de potasio. Si se usa el hidróxido de sodio, el carbonato de sodio tiende a precipitar. Una pequeña cantidad suele flotar y obstruye los conductos capilares [16].

2.8.1. H_2S Presente en el biogás

La cantidad de H_2S presentes en los gases de escape depende principalmente del proceso utilizado para la obtención del biogás y del tipo de sustrato involucrado, si no existe un paso de desulfurización, la concentración de H_2S puede exceder el 0.2, cuando el sustrato fermentado es viscoso el contenido de H_2S es menor que en caso de un sustrato líquido [13].

El biogás como ya se ha visto es una mezcla de gases en la que existen concentraciones menores del 1% de H_2S , el cual a pesar de encontrarse en una concentración relativamente insignificante puede causar efectos nocivos tanto en la salud, en el ambiente como en las diferentes aplicaciones en los que se utilice el biogás [4].

Un objetivo primordial es mantener el contenido de H_2S a los niveles más bajos posibles, porque si llegan a contactar la mayoría de los componentes sufren daños irreversibles debido al alto potencial de corrosión del H_2S , usualmente el biogás es desulfurizado aún mientras permanece en el reactor. Aunque de no ser así, es recomendable contar con un sistema que realice este proceso una vez que el gas este fuera del contenedor [13].

A través de un proceso de pre-desulfurización se puede ayudar a mantener un nivel inferior a 70 mg/m^3 cuando se utilizan co-sustratos o por debajo de 310 mg/m^3 en planta que utilizan excretas líquidas para la fermentación. A pesar de los esfuerzos, el H_2S siempre está presente en niveles altos [13].

2.8.2. Presencia de N_2 y O_2 en el biogás

El nitrógeno y oxígeno presentes en el biogás se encuentran normalmente en proporción 4:1 y usualmente se incorporan en las etapas de ventilación que tienen como objetivo eliminar el ácido sulfhídrico presente en el reactor, estos gases pueden entrar también normalmente en pequeñas cantidades si el sistema de tuberías no está completamente hermético [13].

2.9. Purificación de biogás

Las razones para purificar el biogás son principalmente la necesidad de satisfacer los requisitos de las aplicaciones que se le den (motores, calderas, pilas de combustible, vehículos, etc); para aumentar el valor calorífico y/o estandarizar la calidad del biogás [18].

La purificación del biogás es de crucial importancia para garantizar los mejores rendimientos de los procesos de explotación de biogás y para reducir el impacto de las emisiones gaseosas [19].

Naturalmente, los tratamientos de purificación afectan los costos de producción y

consecuentemente al precio final de la energía generada. Los métodos de depuración del biogás pueden clasificarse según diversos criterios: en función de la tecnología utilizada o bien según el contaminante a eliminar [19].

La eliminación del CO_2 aumenta el valor calorífico del biogás y lleva a una calidad consistente, similar al gas natural. Al usar técnicas de remoción del CO_2 , es importante mantener bajas pérdidas de metano por razones económicas y ambientales puesto que el CH_4 es un gas de efecto invernadero 21 veces más fuerte que el CO_2 [18].

En los procesos de absorción el CO_2 y el H_2S son simultáneamente removidos debido a la alta polaridad del CO_2 y H_2S y a la no polaridad del CH_4 . El agua es el solvente más común para la purificación del biogás comprimido (4 a 7 bar). El diseño de un sistema de purificación con agua depende de la solubilidad del CO_2 , pues esta es regida por la presión, la temperatura y el pH según se muestra en la tabla 2.5 cuando la presión aumenta, la solubilidad del CO_2 en agua aumenta pero disminuye cuando se incrementa la temperatura.

Presión (Atm)	Solubilidad, en kg de CO_2 por kg de agua en $^{\circ}C$			
	0 $^{\circ}$	10 $^{\circ}$	20 $^{\circ}$	30 $^{\circ}$
1	0.4 kg	0.25 kg	0.15 kg	0.1 kg
20	3.15 kg	2.15 kg	1.3 kg	0.9 kg
50	7.7 kg	6.95 kg	6 kg	4.8 kg

Cuadro 2.5: Solubilidad aproximada de CO_2 en agua [16].

Después de la purificación a presión, el CO_2 y el H_2S se envían inmediatamente a un tanque, donde se reduce la presión y la temperatura se aumenta. El H_2S , que se envía al aire puede crear un problema de contaminación. Algunos de los sulfuros acumulados en el agua pueden causar problemas de corrosión en la tubería, por lo tanto, es recomendable separar el H_2S por la introducción de O_2 en el sistema.

2.9.1. Encapsulado de gases

Dentro de las propuestas de captura, también aparecen las reacciones del CO_2 con sales de aminoácidos y potasio, tales como la glicina y la taurina en soluciones acuosas, debido a que su naturaleza iónica les da propiedades de baja volatilidad, alta tensión superficial y alta resistencia a la degradación oxidativa [5].

Otra propuesta corresponde a la captura de CO_2 , empleando como sistemas de carbonatación el óxido de calcio (CaO) y el hidróxido de calcio ($CaOH_2$) por separado. Se determinó que con el óxido la tasa de carbonatación está asociada a un modelo de cinética que incluye la reacción química intrínseca, seguida por la difusión dentro de la partícula; en el caso de hidróxido, el proceso de carbonatación está menos impedido por la difusión catalizada por la formación de agua, y su tasa de captura se ajusta a un modelo de cinética química controlada en la interfaz sólida no cubierta por el $CaCO_3$ [5].

Con lo anterior se determinó el método para capturar y posteriormente utilizar los gases de combustión, el proceso se realiza con soluciones alcalinas que pueden ser KOH o $NaOH$ disueltos en determinado porcentaje de agua, estos reaccionan al hacer contacto con los gases generados en la combustión, formando con estas carbonato de calcio ($CaCO_3$) [5].

2.10. Remoción de H_2S

Uno de los componentes presentes en el biogás es el H_2S , y su presencia representa un riesgo importante, ya que es altamente corrosivo y si se pone en contacto con los componentes del sistema de biodigestión estos podrían sufrir daños irreversibles.

Varias técnicas de eliminación de H_2S se llevan a cabo en física, química, o principios biológicos. Métodos físicos como separación de membrana, lavado con agua, y los procesos de carbón activo son rápidos y efectivos, pero no son económicos para el reemplazo frecuente de medios que se requiere, cuando lidiar con la eliminación de carga de H_2S es alta. Los métodos químicos requieren la adición de productos

químicos (como $NaOH$ o sales de hierro), que tienen un alto costo económico, insalubres y producen desechos. Además, algunos procesos de regeneración química son peligrosos (por ejemplo, grandes cantidades de calor producido durante la regeneración de óxido de hierro) [20].

2.10.1. Utilización de óxido de hierro

El H_2S puede ser removido del biogás al ponerlo en contacto con óxido ferrico (Fe_2O_3), dicho óxido reacciona con el H_2S , para formar sulfuro de hierro, un compuesto no gaseoso, por tanto, no podrá seguir el flujo con el biogás [21], tal como lo indica la ecuación 2.5.



El biogás pasa a través del óxido de hierro para remover el H_2S , el cual al reaccionar con éste forma sulfuro de hierro. Cuando los pellets se cubren completamente con sulfuro son regenerados. Este es un método simple, aunque en la regeneración se libera mucho calor. Además, el método es sensible a biogás con altos contenidos de agua. Este tratamiento fue muy usado en el gas de coquería, donde además se ha utilizado como material adsorbente las astillas de madera impregnadas con óxido férrico. Este tratamiento tiene una eficiencia de limpieza superior al 99.98 % [8].

Para un biodigestor de 1100 litros de capacidad, la cantidad conveniente es de 4 kg de Fe_2O_3 , teniendo en cuenta este valor se puede definir la medida así como la forma para realizar el dispositivo en donde se vaya a depositar [7].

La efectividad de este proceso tiene un porcentaje de 99.9 %, si se respetan los valores definidos. Posteriormente el biogás puede ser almacenado o combustionado, dado que no cuenta con los agentes corrosivos del H_2S [5].

2.10.2. Carbón activado

El H_2S también puede ser adsorbido en carbón activado. El azufre contenido en el carbón puede ser reemplazado por otro limpio, o bien puede ser regenerado. El nombre de carbón activo se aplica a una serie de materiales carbonosos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que presenten un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna. Estos materiales pueden adsorber una gran variedad de compuestos, tanto en fase gaseosa como en solución [22].

En la adsorción se ponen en contacto un fluido con un sólido (adsorbente), y uno o más de los componentes del fluido son transferidos y fijados a la superficie del adsorbente, de forma que esos componentes se pueden separar del resto [22].

Debido a su afinidad relativamente baja para remover H_2S , la utilización de Ca para la eliminación de H_2S es limitada. Cuando la superficie es muy ácida, la disociación de H_2S se suprime lo que resulta en una muy pequeña concentración de iones sulfuro de hidrógeno y por lo tanto en la formación de azufre altamente disperso [8]. Cuando la superficie es menos ácida el grado de disociación es superior y la creación de las especies de azufre elemental polimericos resistentes a la oxidación adicional es más favorable. Un pequeño aumento en el pH, en el rango ácido, aumenta 15 veces la capacidad de avance sulfuro de hidrógeno acompañados por un tercio de disminución del rendimiento de los óxidos de azufre [8].

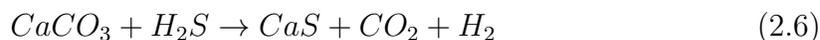
Prácticamente, cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activo, es decir, puede ser un precursor. Se produce, principalmente, a partir de madera, cáscaras de coco y de frutos secos, turba, lignito y carbón [22].

En los últimos años, los altos costes de operación asociados al uso de carbón activo han promovido la búsqueda de adsorbentes alternativos de bajo coste utilizando materiales naturales (madera, turba, carbón, lignito, etc.), así como residuos industriales, agrícolas, domésticos o subproductos, tales como escorias, lodos, cenizas volantes, cenizas volantes o bagazo de lodo rojo [22].

2.10.3. Eliminación de H_2S con tecnologías húmedas

Otra forma de remover el H_2S en el biogás es utilizando sustratos líquidos. Una de las opciones es el uso de agua, pues el H_2S presenta una gran capacidad de disolución. Para esto, se utilizan equipos llamados lavador de gases, la cual hace pasar la corriente de biogás contra una corriente de agua en sentido contrario [21].

Dentro de las técnicas de lavado de gases se emplean sustancias líquidas, uno de estos elementos es el carbonato de calcio disuelto en agua, que resulta muy eficiente para llevar a cabo el proceso, que se realiza del mismo modo que el anterior, solo que en esta ocasión se utiliza la sustancia previamente mencionada en lugar del agua [21]. La reacción química que se genera con este proceso es la siguiente 2.6.



Lo anterior significa que por cada mol de H_2S , que se quiera alterar, se requiere de 1 mol de $CaCO_3$. En otras palabras y luego de una serie de cálculos, por cada m^3 de biogás, que contenga 1000 ppmv (en volumen) de H_2S , se necesitan 4.5 g de $CaCO_3$ puro [21].

2.10.4. Utilización de bio-tecnologías

Existen métodos biológicos o de biofiltración, que han sido probados a escala de laboratorio y piloto. El tratamiento biológico o purificación biológica en términos generales es un proceso en el cual los gases contaminados son tratados al hacerlos entrar en contacto con un medio biológicamente activo.

Los procesos químicos para remover H_2S son caros debido a los altos requerimientos químicos y a los costos de energía y de disposición final. Por esta razón los métodos de tratamiento biológico para remover el H_2S del biogás se han investigado como una alternativa a los tratamiento químicos. Estos métodos, utilizan la capacidad metabólica de algunos microorganismos que degradan sustancias contaminantes. El uso de microorganismos en la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, se basa en la oxidación microbiológica de H_2S a compuestos de azufre de fácil

eliminación, como azufre elemental S o sulfatos SO_2 , fijando CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro. Las bacterias seleccionadas en los procesos para convertir H_2S a S deben tener las siguientes características: capacidad viable de convertir H_2S a S , mínima entrada de nutrientes, y fácil separación de S de la biomasa [8].

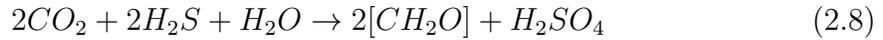
Estos métodos, utilizan la capacidad metabólica de algunos microorganismos que degradan sustancias contaminantes. El uso de microorganismos en la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás, se basa en la oxidación microbiológica de H_2S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental S o sulfatos SO_4^{-2} , fijando CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro [21].

Las bacterias fototróficas y quimiótroficas son microorganismos adecuados para la biooxidación de sulfuro de hidrógeno. Los reactores fototróficos de película fija son interesantes para la eliminación de H_2S a partir de biogás debido a su capacidad para funcionar durante largos periodos de tiempo sin necesidad de una etapa de separación de la biomasa y debido a su capacidad para operar bajo cargas más altas y variables. Sin embargo, una fuente de luz es una de las principales limitaciones de este proceso [21].

Los microorganismos descritos anteriormente, necesitan de un soporte donde se puedan llevar a cabo los procesos y vías metabólicas. Para ello, existen sistemas que permiten que los microorganismos seleccionados, que se encuentren inmovilizados o en suspensión, mineralicen los compuestos a tratar. Los sistemas más utilizados son biofiltros, biofiltros percoladores y los biolavadores [8].

Dependiendo de la cepa responsable, se podría convertir sulfuros a azufre o alternativamente a sulfato, como se indica en las ecuaciones siguientes 2.7 y 2.8.





Existe una variedad de bacterias que oxidan el sulfuro de hidrógeno y, por lo tanto, pueden ser utilizadas como potenciales candidatos para la tecnología de desulfuración del gas [21].

Cada tecnología de las mencionadas anteriormente tiene ventajas e inconvenientes, y algunas se mencionan en la tabla 2.6.

2.11. Remoción de CO_2

La eliminación del CO_2 aumenta el valor calorífico del biogás y lleva a una calidad consistente del mismo, por lo que es muy importante incorporar técnicas de eliminación de este elemento de la composición final del biocombustible. A continuación se muestran algunos de los métodos o técnicas de remoción de CO_2 .

2.11.1. Absorción con agua

Los procesos fisicoquímicos de adsorción, son métodos poco complejos y requieren poca infraestructura, además de resultar con una alta eficiencia. Un método fácil y económico utiliza agua presurizada como adsorbente en contra corriente. La base del proceso de limpieza con agua es aumentar la presión de limpieza del biogás crudo con el agua presurizada. Esto remueve una significativa proporción de los contaminantes ácidos del gas incluyendo el dióxido de carbono que puede ser liberado del agua de lavado en una torre de arrastre con vapor o aire [8]. El agua regenerada resultante puede ser recirculada y utilizada muchas veces. En caso de llevarse a cabo de manera correcta, este proceso presenta una eficiencia de 97 % [21].

Lo que ocurre a nivel de reacción es que el CO_2 al ser soluble en agua, se asocia a estas moléculas para formar ácido carbónico como lo describe la ecuación 2.9

Metodo	Fisico	Ventaja	Inconveniente
químico			
Adsorción			
Carbón activo		Proceso simple	Proceso caro a grandes caudales a desulfurar
		Alta eficiencia	Consumo elevado de carbón activo
		Regenerable con calor o vapor	Algunos carbones impregnados al gastarse, se consideran peligrosos
		Ciclo de vida amplio	
Óxidos de hierro (SulfaTreat, esponjas de hierro)		Alta eficiencia de eliminación	Trata bajos caudales
		Proceso sencillo	Proceso caro por su alto consumo en adsorbente (solo viable para pequeñas instalaciones)
		Elimina H_2S y mercaptanos	Puede generar residuos peligrosos
		Regeneración aunque sólo 2-3 ciclos	
Adsorción con soluciones			
Solventes físicos		Altas tasas de eliminación de H_2S	Complejidad de la instalación
		Regeneración en continuo	Coste económico elevado (instalación, operación) costes de gestión de residuos
Sales de hierro, quelatos de hierro		Altas tasas de eliminación de H_2S	Complejidad tecnica en la operación
		Apto para elevados caudales y concentraciones	Gran inversión de capital
		Regeneración en continuo	Coste de reactivo y gestión de reutilización de residuos
Métodos Biológicos			
Biofiltros y biolavadores		Bajos costes de inversión y operación	Necesario tratamientos adicionales de eliminación de H_2S
		No es necesario un aporte de energía o es mínimo	O_2/N_2 en el biogás, peor calidad
		No requiere compuestos químicos	Cultivo de bacterias

Cuadro 2.6: Principales ventajas e inconvenientes de las tecnologías de eliminación de H_2S [22].



Se establece que la solubilidad del CO_2 en el agua es de 1.7 g CO_2 /kg de H_2O (a 1 atm y 20 °C). A pesar de que se requieren mayores cantidades de agua ya que el CO_2 es menos soluble en ella que el H_2S , la absorción física del CO_2 permite la recirculación del agua ya que puede ser removido fácilmente con tan solo reducir la presión [21].

2.11.2. Absorción con solventes físicos

Para los procesos de absorción físicos, se utiliza un compuesto no reactivo que absorba físicamente los compuestos indeseados del biogás. El absorbente es luego regenerado con calor o con despresurización. El solvente más utilizado en estos procesos es el Dimetil eter de polietilenglycol (DEPG), comercialmente conocido como Genosorb 1753 (proceso Selexol) [8]. Selexol es el nombre comercial para una eliminación de gases ácidos, este disolvente, puede separar gases como el H_2S y CO_2 a una alta presión [23].

Trabajos realizados en una planta en Laholm (Suecia) han demostrado que el DEGP puede llegar a remover diversas impurezas presentes en el biogás como hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos clorados, mercaptanos, etc. y obtener un producto con una alta eficiencia energética [8].

2.11.3. Absorción química

La absorción química implica la formación de enlaces químicos reversibles entre el soluto y el solvente. La regeneración del solvente comprende la ruptura de esos enlaces y la correspondiente entrada, relativamente alta, de energía. Los solventes químicos generalmente emplean soluciones acuosas de aminas o soluciones acuosas de sales alcalinas (hidróxido de sodio, potasio y calcio) [8].

Para realizar la absorción química, generalmente se utiliza una columna de absorción similar a la que se emplea en la absorción física, por la que el biogás debe pasar a contracorriente a la solución química que así logre entrar en contacto con el compuesto absorbente y generar la reacción necesaria para que el contaminante se asocie a la solución [21], como lo muestra la figura 2.4.

En términos generales, la tecnología consiste en un absorbedor, en el que se absorbe el CO_2 presente en el biogás, y un lavador o stripper en el que se libera el CO_2 de la solución de amina. La presión de funcionamiento del absorbedor es de 1 a 2 bar mientras que la presión del stripper es ligeramente superior a la presión del absorbedor, por lo general de 1.5 a 3 bar. Con esta tecnología se consigue metano de pureza superior a la absorción con agua (por encima de 99.5%), debido a que el metano no reacciona con la amina [8].

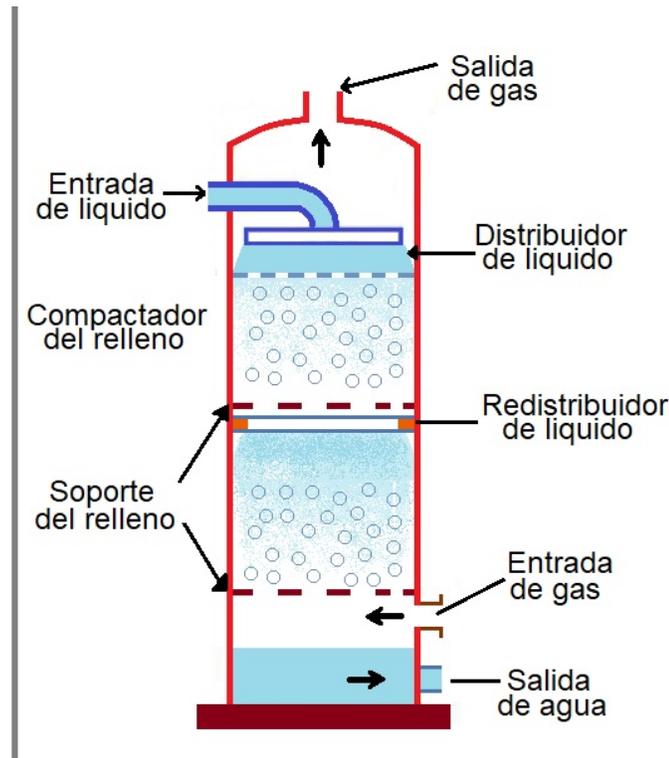


Figura 2.4: Esquema de una columna de absorción a contracorriente [8].

2.12. Análisis y sistemas de medición de gases

Se denomina gas al estado de agregación de la materia en el que las sustancias no tienen forma ni volumen propio, adoptando el de los recipientes que las contienen. Las moléculas que constituyen un gas casi no son atraídas unas por otras, por lo que se mueven en el vacío a gran velocidad y muy separadas unas de otras [24].

Un Análisis de gas, es un estudio realizado con el fin de conocer sus elementos, características y datos más relevantes que lleguen a ser requeridos de alguna manera. Cabe mencionar también, que un correcto análisis de las proporciones de los gases puede dar lugar a diagnósticos muy importantes en cuanto a las cualidades de este se refiera, la importancia de los métodos o sistemas de medición resulta de la necesidad de determinar qué elementos intervienen en la composición de algún gas en específico.

En la actualidad existen ya diversos métodos con los que se puede saber con exactitud el compuesto de un gas, en el siguiente apartado se mencionan algunos de ellos así como sus características más importantes. Hay que mencionar, además que cada uno de los distintos métodos o sistemas están diseñados para ser operados cada uno en situaciones o labores particulares en dependencia de sus características.

2.12.1. Cromatografía

La cromatografía es un método físico de separación en el cual los componentes son distribuidos entre dos fases, una de las cuales es estacionaria mientras la otra se mueve en una dirección definida. Los componentes son desagrupados por sus diferentes tasas de migración según la Union Internacional de Química Pura y Aplicada conocida por sus siglas en inglés (IUPAC). La cromatografía puede ser clasificada por su utilidad y en base al material que se utilice como eluyente para separar los solutos. De acuerdo a su utilidad la cromatografía se clasifica en: analítica, utilizada para determinar los químicos presentes en una mezcla y en que concentración; y preparativa, utilizada para purificar grandes cantidades de químicos [25].

Para realizar una separación mediante cromatografía de gases, se inyecta una pequeña cantidad de la muestra a separar en una corriente de un gas inerte a elevada temperatura; esta corriente de gas, atraviesa una columna cromatográfica que separa los componentes de la mezcla por medio de un mecanismo de partición (cromatografía de gas líquido), de adsorción (cromatografía gas sólido) o, en muchos casos, por medio de una mezcla de ambos. Los componentes separados, emergerán de la columna a intervalos discretos y pasarán a través de algún sistema de detección adecuado, o bien serán dirigidos hacia un dispositivo de recogida de muestras [26].

Con respecto a lo antes mencionado, la figura 2.5 muestra el esquema de un cromatógrafo de gases, de igual manera se mencionan los elementos más importantes de este.

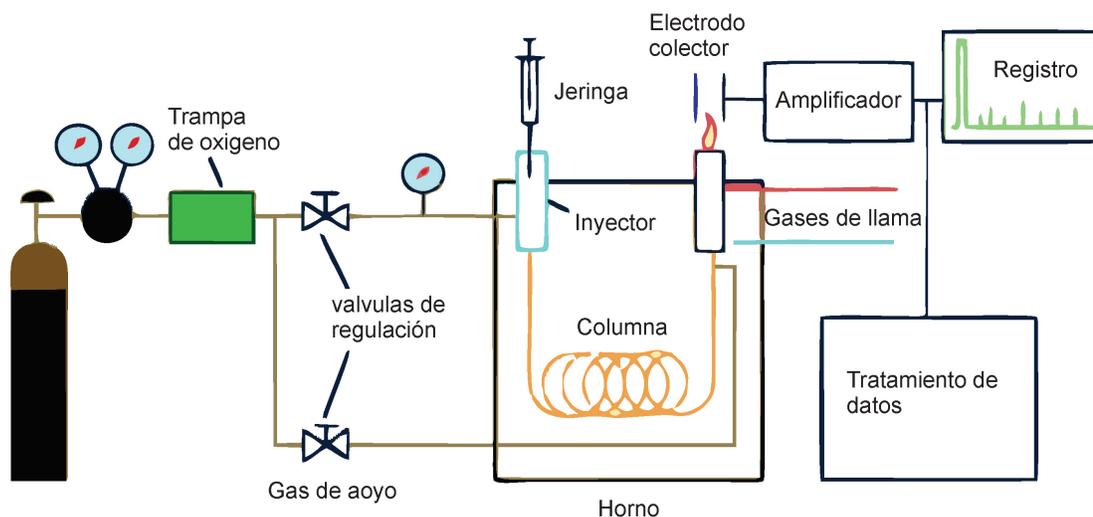


Figura 2.5: Esquema de un cromatógrafo de gases [26].

Los gases portadores utilizados en cromatografía no afectan, en principio, a la separación ya que no tienen ninguna influencia sobre los procesos de sorción-desorción o de partición que se producen en la columna [26].

2.12.2. Multitec 540

En la generación de biogás es muy importante el control del proceso mediante la medición de los gases generados, este control no solo permite multiplicar los beneficios de la explotación, sino también evitar grandes pérdidas. Uno de los equipos de medición de gases más utilizados, primordialmente en la industria de los biocombustibles es el Multitec 540, un dispositivo portátil de medición de gases en plantas de biogás y rellenos sanitarios principalmente [27].

El Multitec, permite analizar los compuestos más importantes del biogás de manera cómoda y sencilla, dispone de sensores para la medición de: metano, oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y también permite la medición de caudal y temperatura [27].



Figura 2.6: Multitec 540 [28].

Todas las mediciones se muestran, simultáneamente, en su pantalla de gran tamaño como se aprecia en la figura 2.6. A su vez todos los datos medidos se almacenan en su memoria, en diferentes protocolos, y se pueden transferir a alguna PC por me-

dio del conector USB [28]. Los sensores y sus respectivos rangos pueden apreciarse en la tabla 2.7, en donde se muestra el esquema de los datos que presenta el dispositivo.

Tipo de gas	Rango de medición	Tipo de sensor
Metano	0,0 – 100 %Vol.	Sensor infrarrojo
Dióxido de carbono	0 – 100 %Vol.	Sensor infrarrojo
Oxígeno	0,0 – 25 %Vol.	Sensor electroquímico
Sulfuro de hidrógeno	0 – 2000 ppm	Sensor electroquímico
Monóxido de carbono	0 – 500 ppm	Sensor electroquímico

Cuadro 2.7: Rangos y tipos de sensores del multitec 540 [28].

2.12.3. Landtec GEM-5000

Este equipo, está diseñado específicamente para uso en vertederos para monitorear los sistemas de extracción de gases de relleno sanitario (LFG), las antorchas y los sistemas de control de migración. No es necesario llevar más de un instrumento al sitio, se puede usar para monitorear sondas de migración sub-superficiales y para medir la composición, la presión y el flujo de gas en los sistemas de extracción [29].

Este equipo, toma muestras de dichos gases y analiza el contenido de metano, dióxido de carbono y oxígeno con opciones para análisis adicionales, proporciona también datos de presión, temperatura y densidad de los gases que analiza [30].

El usuario puede configurar comentarios y preguntas para registrar información en el sitio y en cada muestra, asegura una recopilación de datos consistente para un mejor análisis, esto con ayuda de sus botones y menús altamente prácticos como lo muestra la figura 2.7. La experiencia del usuario simplificada reduce los tiempos operativos, lo que representa una característica sumamente positiva [29].



Figura 2.7: GEM 5000 [30].

Este instrumento, también se puede utilizar en el modo de operación GA5000 si es necesario. El operador puede cambiar el analizador entre un monitor de extracción de gas (un analizador de gas GEM5000) o un analizador de gases de vertedero (un analizador de gases GA5000) [30].

Capítulo 3

Metodología

En el siguiente capítulo se especifica la metodología que será empleada para el desarrollo del presente proyecto, se especificarán los pasos y métodos necesarios para llevar a cabo el desarrollo (diseño y construcción) y evaluación de un sistema de remoción de ciertas impurezas presentes en la composición del biogás, como se mencionó previamente en el capítulo 1.

Se mencionarán a detalle las tres etapas del trabajo (desarrollo, instalación y evaluación). La primera, inicia con una investigación previa, de donde se obtienen datos importantes y necesarios para definir el dispositivo a utilizar, posteriormente llevar a cabo su desarrollo con ayuda de diseño asistido por computadora (Software CAD), lo que sirve en gran medida para la construcción del equipo. Una vez desarrollado el sistema, continúa la segunda parte; en la que este se instala a un sistema de generación de biogás (biodigestores), el cual será previamente definido para la puesta en marcha del sistema de eliminación de impurezas. La tercer y última fase consta de realizar evaluaciones para recabar datos que posteriormente serán analizados y comparados para brindar valores y así determinar el rendimiento del dispositivo desarrollado.

3.1. Desarrollo del filtro de remoción de CO_2

Previo a definir el diseño del dispositivo, se realizó una investigación detallada para definir las características del dispositivo que se pretende desarrollar, tales como (geometría, dimensiones, y principios de funcionamiento). Se revisaron bibliografías en las que se ha trabajado en la remoción o encapsulado de impurezas en ciertos gases.

3.1.1. Diseño

El diseño asistido por computadora (CAD) es una herramienta de gran ayuda para realizar la construcción de cualquier dispositivo, debido a que ofrece una visualización gráfica e interactiva, lo que permite ejecutar modificaciones en el modelo y observar inmediatamente los cambios producidos en el modelado.

Previo a realizar el diseño, hay que considerar las condiciones y características con las que cuenta nuestro sistema de generación, tales como; dimensiones, presión y condiciones ambientales. Esto con el fin de determinar datos para la elaboración del dispositivo. En esta parte es importante considerar el monitoreo de la presión como se indica en refanexos, debido a que esto servirá de gran ayuda al momento de determinar características importantes del sistema a elaborar, tales como las dimensiones de este.

Se considerará la presión que se muestre en los monitoreos realizados al biodigestor como se indica en la sección de anexos, y con esto fijar las dimensiones del sistema, debido que es muy importante para determinar las cantidades de los elementos que serán contenidos al interior del filtro.

3.1.2. Selección de materiales

Debido a las condiciones en las que se encuentra el sistema de generación de biogás, estas exigen al dispositivo soportar las condiciones ambientales del lugar; como, el sol, viento, tránsito de personas, vegetación, etcétera. Se optará por usar

un material que brinde una alta resistencia a las características antes mencionadas, se considerarán también las afectaciones que provoca el biogás a ciertos materiales debido a sus componentes altamente corrosivos como el H_2S .

Hay que mencionar, además que el material que se habrá de seleccionar para la construcción del equipo, debe contar con características como la conducción de fluidos, fácil manejo (corte, sellado, perforado, pegado), además de ser de un costo económico relativamente estable debido que esto podrá facilitar su adquisición en el mercado.

Otro aspecto que deberá presentar el material a seleccionar, es de no generar ningún tipo de residuos que puedan contaminar de manera directa o indirecta al elemento a contener y así mantener al biogás libre de agentes externos.

3.2. Construcción e instalación

3.2.1. Construcción

Con el diseño realizado y los materiales definidos, se procederá primeramente a la construcción del dispositivo tomando como base el modelado CAD. Posteriormente y una vez se hayan terminado todas las labores de construcción, se procederá a la instalación del equipo con el sistema de generación de biogás.

Como se mencionó previamente, el biogás cuenta con cierto porcentaje de H_2S , un gas altamente corrosivo, por ende para este sistema se buscarán materiales y elementos que no sean metálicos para cuidar el tiempo de vida útil del equipo.

Con el material y las medidas una vez definidas, se procederá a la realización de los cortes, la selección de los elementos y demás componentes del sistema, se realizará también un proceso de limpieza a todos los materiales verificando de igual manera que se encuentren en óptimas condiciones para los trabajos en los que se requieran. Los elementos externos que de alguna manera complementen al dispositivo de purifi-

cación, deberán ser del mismo material, o similar a este, esto con el fin de facilitar los trabajos (ensamble y cortes), además de evitar un mal desempeño de cada uno de ellos.

Seguidamente de la definición de materiales, se procederá a la construcción del dispositivo, tomando como actividad principal los cortes del material a la medida considerada, en caso de que este no cuente con una geometría cilíndrica se procederá a realizar modificaciones hasta conseguir dicha forma o lo más similar a ella. Los cortes serán realizados con suma delicadeza con el fin de no exceder las dimensiones planteadas, de igual manera los trabajos en los que se necesiten realizar alguna modificación a cualquiera de los componentes, serán hechos con las mismas condiciones cuidando de no dañarlos.

Una vez culminadas las actividades de corte, se procederá al armado del sistema uniendo todos sus componentes, siempre con la ayuda del diseño previamente realizado. Posteriormente se harán verificaciones y algunas pruebas con el fin de determinar que el dispositivo cuente con grietas, fisuras, o algún desperfecto que pueda llegar a representar un problema tanto para el sistema de purificación como para el sistema de generación.

Todas las actividades realizadas para la construcción del sistema serán ejecutadas en el taller de materiales y prototipos del Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (3IER), debido a que cuenta con las herramientas que se lleguen a necesitar, del mismo modo el lugar de trabajo esta especialmente diseñada para efectuar este tipo de actividades por lo que se podrá trabajar sin complicaciones.

3.2.2. Instalación del filtro de purificación de CO_2 al sistema de generación de biogás

Para el acoplamiento del dispositivo al sistema de generación, serán necesarios algunos elementos que brindaran el soporte y la garantía que el equipo realice un funcionamiento adecuado.

Una vez construido el equipo, se procederá a la instalación con el sistema de generación de biogás para su puesta en marcha. Como se mencionó anteriormente se analizarán cuidadosamente los elementos que se requieran en esta etapa, cuidando que cualquier componente que se llegase a necesitar cumpla con las condiciones previamente mencionadas.

Se analizará el lugar, con el fin de determinar un área lo suficientemente segura para el sistema de generación como para el de purificación, esta deberá contar con espacios suficientes para la ubicación del filtro como para los elementos que lleguen a ser requeridos.

Por otra parte, en caso de no encontrar un espacio que brinde las condiciones antes mencionadas, se procederá a la modificación de un área previamente determinado. Las modificaciones serán realizadas buscando conseguir las condiciones que el sistema de purificación requiera para su correcta instalación.

Posteriormente, se realizaran las conexiones del equipo con las del sistema de generación, procurando ejecutar esta acción con sumo cuidado, de manera que no se contemplen fugas del biocombustible por alguna de las nuevas uniones. En caso de que las medidas de los componentes del filtro no sean las mismas con las de la salida del biodigestor, se realizará un acoplamiento con piezas que permitan estas uniones.

Todas las actividades de conexiones de los sistemas, serán realizadas en el área de bioenergía, particularmente en el laboratorio de evaluación de biodigestores pertenecientes al 3IER.

3.3. Evaluaciones con el filtro de remoción de CO_2

Las evaluaciones sirven para indicar el grado de rendimiento de algún método/trabajo, en este caso particularmente las evaluaciones reflejarán el desempeño del dispositivo a elaborar.

Una vez culminado el proceso de montaje e instalación del filtro de remoción, se procederá a la evaluación del funcionamiento del equipo. Las evaluaciones serán realizadas en el lugar que resulte más conveniente tanto como para el sistema de generación de biogás como para el/los métodos que llegue a ser requeridos para el cumplimiento de dicha actividad. Se realizará una comparación de los métodos/sistemas con los que pueda ser analizado al biogás, tomando en cuenta las condiciones en las que pueda ser realizada esta actividad. Considerando lo antes mencionado, se tomará como opción principal para llevar a cabo las mediciones de los componentes del biogás, el método que presente mejores características.

La evaluación contará con dos etapas principales:

- Preparación de la mezcla.
- Análisis del gas.

3.3.1. Elaboración de la mezcla

Dentro de la planeación de las actividades para la construcción del dispositivo, la elaboración de la mezcla es una de las más importantes y la primera en realizar una vez el equipo esté terminado.

Para la primera etapa se necesitarán de algunos elementos que puedan facilitar las labores necesarias, a continuación se mencionan.

- Balanza.
- Probeta graduada.
- Espátula.
- Recipiente para muestra
- Recipiente para la mezcla.
- Hidróxido de potasio (KOH).

- Embudo.
- Agua destilada.
- Gafas protectoras.
- Bata de laboratorio.
- Guantes de látex.
- Cubre bocas.

Una vez definidos los materiales necesarios para las actividades de elaboración de la mezcla, se procederá a ejecutar dicha acción, primeramente se realizarán las revisiones a las bibliografías que sean tomadas como base para llevar a cabo el modelo del sistema que se pretende realizar, esto con el fin de determinar ciertas características que serán de gran utilidad para el desempeño del equipo.

Para la determinación del principio de funcionamiento de un sistema removedor de CO_2 en el biogás, se partirá de un sistema utilizado por L. Valencia [7], tomando en consideración otros métodos de eliminación de impurezas como lo menciona B. Morero [8]. Con las condiciones mencionadas previamente se logrará definir el principio de funcionamiento del dispositivo, y con base en las actividades realizadas por A. Prada [5], se analizarán los distintos elementos con los que se podrá llevar a cabo el encapsulado de gases, particularmente el CO_2 . Así mismo, a partir de las bibliografías mencionadas, se determinarán las cantidades de cada uno de los elementos necesarios para la elaboración de la mezcla que se pretende.

En la tabla 3.1 se enlistan algunos elementos con los que pudiera elaborarse la mezcla que será contenida al interior del sistema de remoción de impurezas.

ELEMENTO	FORMULA	MASA MOLAR
Hidroxido de sodio	$NaOH$	39.997 g/mol
Hidroxido de calcio	CaO	74.093 g/mol
Hidroxido de Potasio	KOH	56.1056 g/mol
Agua	H_2O	18.01528 g/mol

Cuadro 3.1: Elementos para el proceso de remoción de impurezas y su masa molar.

Una vez determinada la sustancia, se procederá a la preparación de la mezcla tomando como referencia la molaridad del trabajo realizado por A. Prada [5] para definir la que será utilizada en el proyecto, se realizará el proceso de pesado de los elementos cuidando siempre de no exceder ni contener las cantidades definidas, puesto que la mezcla puede estar compuesta por uno o más sustancias, se realizará también el mismo proceso (medición) para todos los elementos que sean necesarios. Se podrá hacer uso de la ecuación 5.3, con el fin de determinar la cantidad de ciertas sustancias necesarias para la mezcla, dicha ecuación se detalla en la sección de anexos.

Posteriormente se realizará el depósito de la mezcla elaborada al interior del sistema de remoción para la puesta en marcha de este. Las actividades realizadas en este proceso deberán hacerse con suma precisión y cuidando siempre de contar con elementos de seguridad personal, debido a que algunos de los elementos mencionados anteriormente pueden llegar a ser altamente nocivos para la salud en caso de entrar en contacto directo con ellos.

Una vez sea realizado el depósito de la mezcla al interior del filtro, se verificará que los elementos de conexión con el sistema de generación no presenten ningún tipo de anomalías. Posteriormente y con todos los elementos listos se podrá realizar la puesta en marcha del sistema.

Las actividades de preparación de la mezcla serán realizadas en los laboratorios de materiales del 3IER, debido a que brinda los elementos, materiales y condiciones necesarias para llevar a cabo este tipo de labores.

3.3.2. Análisis del gas

Una vez la sustancia se encuentre depositada en el filtro, se procederá a hacer fluir al biogás proveniente del sistema de generación al interior del dispositivo de eliminación de CO_2 , esto para que el biogás generado en los biodigestores entre en contacto con la mezcla y se efectúe el proceso buscado.

Posteriormente se realizarán los análisis de composición de biogás, en dos tiempos; antes y después del sistema de purificación. Dicha acción corresponderá a determinar la cantidad de impurezas que logrará remover el dispositivo, en comparación con la muestra de biogás directamente del biodigestor.

Como se ha mencionado anteriormente, los análisis de gases pueden realizarse por distintos métodos, como se indica en el capítulo 2; tanto con ayuda de equipos especiales o por análisis de laboratorios, se realizara la selección del método de análisis del biogás tomando en cuenta ciertos criterios como: accesibilidad del proceso, tiempo de espera de resultados, eficiencia del método, etcétera. El método seleccionado deberá brindar con exactitud los elementos presentes en la composición del biogás, esto sin alterar las condiciones del biocombustible, una característica importante a considerar es que cualquiera que sea el método a elegir debe soportar los elementos del biogás que llegan a ser altamente corrosivos como lo es el H_2S particularmente, esto sin sufrir algún tipo de daño o alteración, puesto a que si el equipo/proceso comienza a presentar algún tipo de falla, los datos presentados después de cada análisis podran estar alterados, por lo que la precisión del método podrá disminuir; además de que pueda afectar en su periodo de vida útil.

Un punto muy importante a considerar es que, en caso de que el equipo/método que sea seleccionado para el análisis de gases no pueda obtener el biogás de manera directa, ya sea del sistema de generación o de purificación, serán necesarios acoplar elementos que permitan una conexión directa entre los sistemas y el analizador, esto con el fin de contar con biogás libre de agentes externos que pudieran llegar a estar presentes en el aire y esto presente alteraciones a los resultados de los análisis.

Los análisis como se indicó anteriormente, serán realizados en tres ocasiones para cada momento de la medición, es decir tres veces antes del sistema de purificación y tres más después de dicho sistema. Esto con el fin de que los datos presentados no presenten una alta variación en sus magnitudes.

Los datos obtenidos en las mediciones serán registrados con el fin de realizar comparaciones de cada uno de ellos posteriormente. La tabla 3.2 muestra un modelo base de cómo serán ordenados los valores de los distintos análisis.

HORA - FECHA		
ELEMENTO	CANTIDAD	PRESION REL
CH_4	(%)	H_2O
CO_2	(%)	
O_2	(%)	
H_2	(ppm)	
H_2S	(ppm)	
Bal	(%)	

Cuadro 3.2: Esquema de datos.

Posterior a las mediciones y comparaciones del análisis del biogás antes y después del filtro, se procederá a realizar la misma operación variando la molaridad de la sustancia utilizada, esto con el fin de contar con distintos elementos con los que se pudieran realizar los análisis de una manera más completa. Dichas variaciones partirán como base, de la molaridad utilizada por A. Prada [5] y su variación dependerá varios factores, principalmente los del dispositivo.

Al término de cada variación se repetirá el proceso de análisis de gas tanto antes como después del sistema de remoción de impurezas, esto como se mencionó anteriormente.

Las actividades realizadas en el proceso de análisis de biogás serán realizadas en un lugar que cuente con las herramientas y equipos necesarios para determinar los componentes del biocombustible, esto debido a que la instrumentación necesaria para llevar a cabo esta operación es muy delicada y relativamente difícil de conseguir.

Capítulo 4

Resultados y conclusión

En este capítulo, se mencionarán los resultados obtenidos de las distintas etapas de trabajo que fueron necesarias para la elaboración del sistema de purificación de biogás. Se detallarán las actividades realizadas en las tres fases principales (diseño, construcción/instalación y evaluación). A continuación se menciona brevemente cada una de ellas, y posteriormente se profundiza a lo largo de este apartado.

- En el diseño se muestran los datos y características previamente mencionadas en la metodología, de igual manera se presenta el modelo obtenido con ayuda del diseño asistido por computadora (CAD).
- En la construcción se presentan los materiales, componentes y herramientas que fueron necesarios para desarrollar dicha actividad. De igual manera se presenta el dispositivo desarrollado, así como su instalación al sistema de generación de biogás.
- Para la parte de evaluación, se muestran los resultados obtenidos por las actividades realizadas siguiendo al margen la metodología previamente mencionada 3 en el capítulo anterior, se presentan los valores así como las gráficas comparativas de estos. Con dichos datos se determina el funcionamiento del dispositivo desarrollado.

Todas las actividades mencionadas, fueron realizadas en el orden mencionado

anteriormente y procurando siempre mantener la estructura citada en el capítulo de metodología 3.

4.1. Diseño

El diseño fue seleccionado a partir del análisis realizado a distintas bibliografías, partiendo de un principio de funcionamiento base, se realizaron adecuaciones en dependencia de las condiciones de los distintos sistemas con los que cuenta el área en que se labora. Se analizó el fundamentalmente el principio de funcionamiento del sistema realizado en la literatura de B. Morero [8], en donde muestra un sistema altamente práctico. Así mismo se realizaron una serie de análisis a otras literaturas, en las que, ya sea por el trabajo similar o por un principio de funcionamiento efectivo se tomaron en consideración, tal es el caso del sistema desarrollado por L. Vásquez [7], que junto con el mecanismo mencionado previamente, fueron dos de las principales guías para determinar el diseño.

Las condiciones del sistema de generación, juegan un papel determinante en el diseño del dispositivo a desarrollar debido a que de ellos dependen los principales elementos para llevar a cabo el modelo. A causa de esto, recabar datos del sistema de generación es una actividad indispensable para un óptimo modelado, se analizaron las literaturas en la que se menciona al sistema de generación, las presiones que manejó L. Vélez [4], así como los problemas comúnmente presentados por el biodigestor fueron de suma utilidad, puesto que de ellos dependen las características de diseño, de igual manera se necesitaron los datos de monitoreo de presión, mismos que se mencionan a detalle en el apartado de anexos.

Previo a realizar el modelado 3D con el sistema CAD, se necesitó de un bosquejo con las características necesarias del dispositivo a desarrollar, mismas que fueron recabadas de las distintas bibliografías analizadas. En la figura 4.1 se muestra la primera parte del diseño, con las medidas y componentes de este en una visualización 2D, de igual manera hace una introducción de manera gráfica al principio de funcionamiento del equipo. Lo anterior, se realizó con el fin de facilitar las labores de

diseño en el modelado 3D, puesto que partir de un modelo en el que se mencionan las medidas así como los componentes del sistema evita en gran medida errores de trabajo.

De igual manera, para determinar las dimensiones del modelo 2D realizado fue necesario una serie de análisis a bibliografías con el fin de realizar ciertos cálculos, esto con el fin de determinar características y condiciones de diseño, dando como resultado; la geometría y medidas descritas en la figura 4.1. Los cálculos necesarios para la elaboración de este elemento se mencionan a detalle en la sección de anexos.

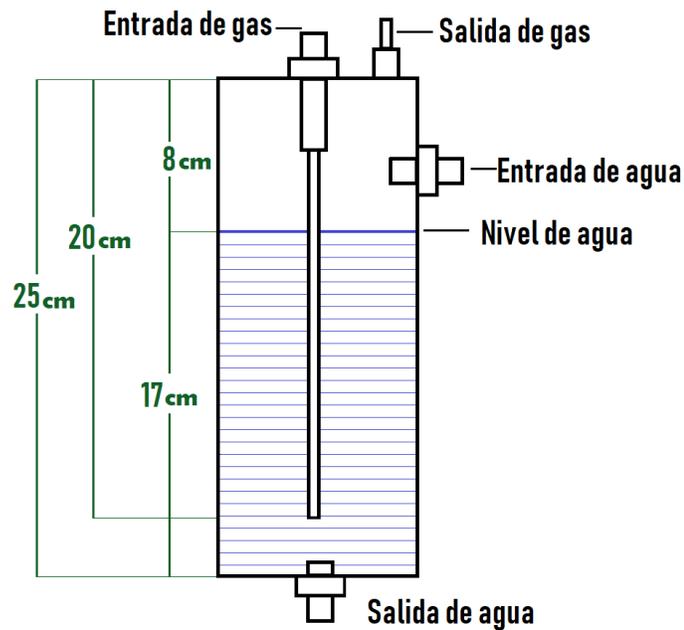


Figura 4.1: Diseño 2D del filtro de remoción de CO_2 .

4.1.1. Modelado 3D con software CAD

Para llevar a cabo esta actividad, se necesitó de un software especializado en diseño en tres dimensiones, esto con el fin de obtener un panorama mas amplio en la visualización del dispositivo a desarrollar. Con ayuda de las literaturas mencionadas anteriormente y del bosquejo previamente realizado, se realizó primeramente el principio de funcionamiento del dispositivo, y con ello definir posteriormente su geometría. Con ayuda del sistema 2D previamente realizado, se procedió al desarrollo del modelo en tres dimensiones del dispositivo, tomando en cuenta como se muestra en la figura 4.1, el dispositivo contendrá en su interior una mezcla líquida que estará en contacto con el biogás generado, por tanto, dicha mezcla debe ser contenida sin permitir algún tipo de filtración o fuga.

El diseño consta de un cilindro completamente hermético, con aperturas en cada uno de los extremos, mismas a las que se fijan llaves que se acoplan a las conexiones del sistema de generación. Para mantener la geometría cilíndrica, en los extremos se colocan tapas con diámetros de 5 cm, sobre los cuales se trabaja perforando y acoplando las válvulas y aperturas necesarias para las distintas conexiones. En el extremo superior, cuenta con dos aperturas para las distintas operaciones del sistema, estas son para la entrada y salida de gas respectivamente y tienen un diámetro de 0.75 cm, este diámetro permite distribuir los ductos del gas en la tapa de una manera suficientemente practica como se muestra en la figura 4.2. Para las labores en las que se requiera operación y manejo de gases puntualmente biogás a bajas presiones, se recomienda la utilización de ductos y conexiones pequeñas como lo menciona B. Morero [8], esto último fue uno de los fundamentos que se consideró para realizar el diseño de la manera antes descrita.

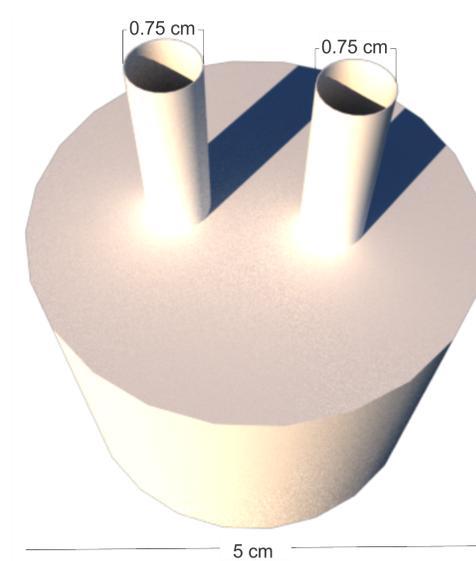


Figura 4.2: Modelado 3D de la tapa superior del sistema.

Al interior, la entrada de biogás está conducida por una tubería de igual diámetro, que lleva al combustible hasta tres cuartas partes de profundidad del sistema como se muestra en la figura 4.3, esto para su contacto directo con la mezcla purificadora al interior, permitiendo únicamente la salida de biogás libre de impurezas en la parte superior, esto impide que el biogás de entrada y de salida estén en contacto directo, lo que representa algo sumamente benéfico.

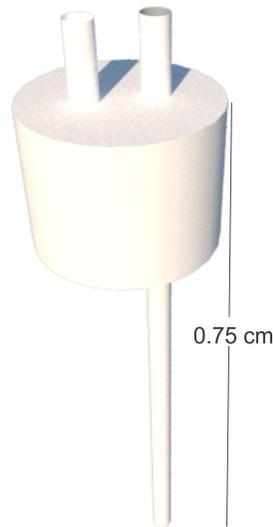


Figura 4.3: Vista lateral 3D de la tapa superior.

Las tapas, tienen un diámetro ligeramente superior al cuerpo del filtro y además son concéntricas a este, esto con el fin de funcionar a modo de anillo y no presentar problemas de ensamble. Esta función se realiza cuidando que la tapa se mantenga rígida para las distintas labores a las que sea sometida, es decir debe embonar con suma precisión para que los elementos estén conectados de manera correcta y no presenten fallas de operación. Como se mencionó anteriormente, en la tapa superior cuenta con dos aperturas, siendo una de estas a entrada de biogás, dicha apertura tiene un diámetro de 0.75 cm y una longitud de 17 cm permitiendo acceder al biogás de manera directa hasta tres cuartas partes de profundidad del sistema en la que se encuentra depositada una mezcla líquida que se encarga de la purificación del biocombustible al entrar en contacto con dicha mezcla, esta característica se muestra en la figura 4.3. Por otra parte, la segunda apertura presenta el mismo diámetro y tiene la capacidad de conducir al biogás previamente purificado a la salida del sistema para su utilización en distintas actividades.

En la parte inferior será necesaria de igual manera una tapa que permita mantener al cuerpo del filtro hermético, funcionando de manera similar al principio descrito anteriormente. Esto se menciona detalladamente a continuación. De igual manera,

en esta sección del filtro es necesario una tapa que permita mantener hermético al sistema. Utilizando el mismo principio que la tapa parte superior, en esta sección las medidas son prácticamente las mismas, siendo la tapa concéntrica y de un diámetro ligeramente superior a la del cuerpo del filtro, como se mencionó con anterioridad, esto para que no presente problemas de ensamblaje posteriores. Cuenta además con solamente una apertura con un diámetro de 2.5 cm que esta acoplada a una válvula que regula la salida de la mezcla líquida, y se cierra o abre según sea el estado de trabajo.

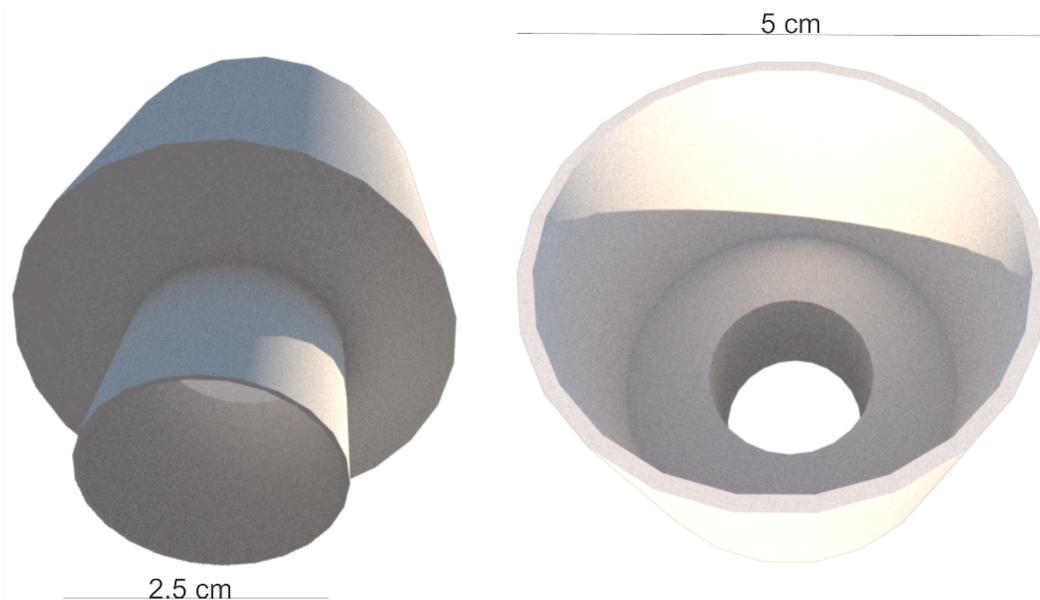


Figura 4.4: Vista 3D de la tapa inferior.

Como se ha mencionado, el cuerpo del sistema de eliminación de CO_2 es de geometría cilíndrica al igual que las tapas, el diámetro de este es de un espesor menor al de los componentes mencionados previamente, por lo que al realizar las labores de ensamblaje en el software las tapas abrazan al cuerpo del cuerpo del sistema, presentando con esto al modelo en 3D. Esta sección del sistema tiene un diámetro de 5 cm, con una longitud de 25 cm y un espesor de 0.35 cm. A una longitud de 18 cm se encuentra una apertura con un diámetro de 2.5 cm, que sirve para la inyección de fluidos líquidos al sistema como se muestra en la figura 4.5, al igual que en los elementos descritos anteriormente, este tendrá acoplado una válvula reguladora.

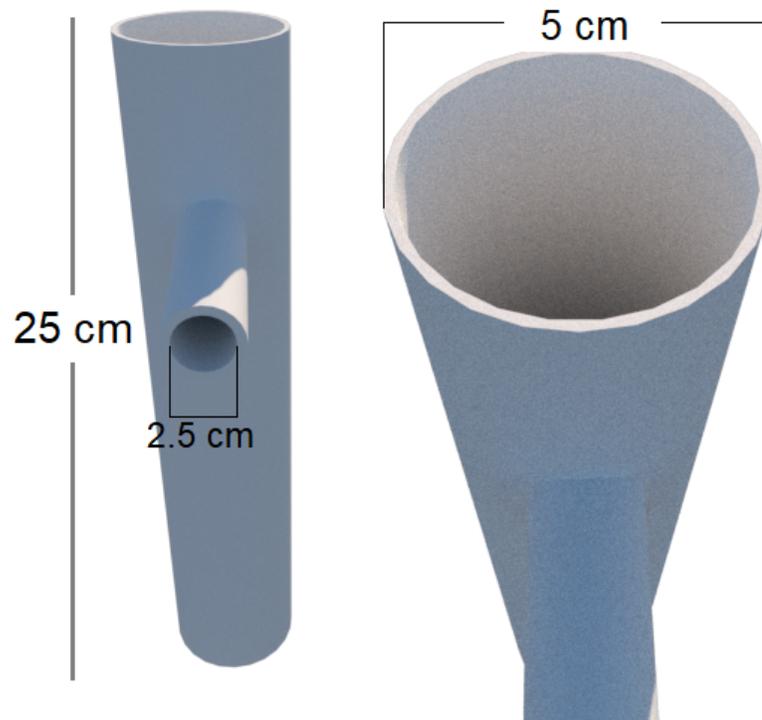


Figura 4.5: Modelado 3D del cuerpo del filtro o parte central.

Una vez presentados los componentes del sistema a detalle, se realiza la unión de cada uno de ellos para tener como resultado al modelado 3D del sistema completo, la figura 4.6 muestra un alineamiento de los componentes previo al ensamblado permitiendo ver a parte de los elementos internos y la figura 4.7 preseta al modelo final del sistema desarrollado en el software CAD vista desde el exterior.

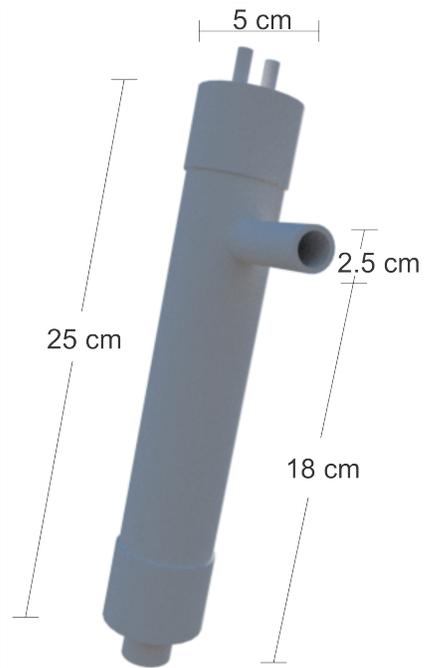


Figura 4.6: Alineación de los componentes previo al ensamblado.

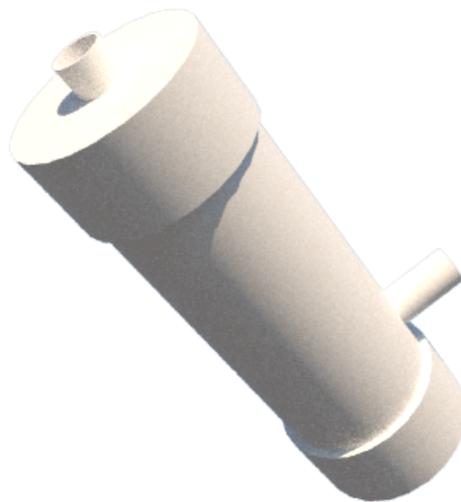


Figura 4.7: Visualización 3D terminada del filtro de remocion.

4.1.2. Selección de materiales

Para la selección de los materiales, fueron necesarios los análisis a las bibliografías mencionadas en el capítulo de fundamentos teóricos, como se explicó también en metodología, se buscó un material que soporte las condiciones ambientales del lugar (Clima, tránsito de personas, vegetación, etc).

Además de las condiciones mencionadas anteriormente, el material elegido debía presentar una rigidez estable para soportar los estados de operación del sistema. Se determinó la utilización de policloruro de vinilo (PVC), debido a las características que presenta, siendo un material altamente práctico para las labores de corte, conexiones, ensamblajes, etc.

De igual manera, el PVC cuenta con las condiciones para soportar temperaturas con rangos que varían entre -17 a 60 grados, abarcando las temperaturas normalmente registradas en la zona que tienen variaciones desde los 17 a 40 grados. Como lo menciona L. Vásquez [7] la utilización de material PVC como componente en sistemas de manejo de biogás resulta altamente eficiente en cuanto a costos y rendimiento, debido a que es un material altamente resistente a los componentes de dicho biocombustible tal y como lo menciona también L. Vélez [4].

Uno de los elementos importantes a considerar es que este material, comúnmente se presente comercialmente de forma cilíndrica como lo muestra la figura 4.8, lo que represento un benéfico para las labores realizadas.



Figura 4.8: Modelo comunmente presentado de tubos PVC.

De igual manera, las labores de corte y ensamblado con este material facilitan todas las operaciones del trabajo, puesto a que permite el fácil manejo en cuanto a modificaciones se refiera (corte, perforación, ensamble, unión, etc). Esto representa una reducción en los tiempos de operación para llevar a cabo el desarrollo del sistema.

4.2. Construcción e Instalación del sistema de purificación

4.2.1. Construcción

La construcción del sistema tomó como base, la metodología planteada previamente para su uso como guía en esta etapa del proyecto. Esta fase estuvo dividida en tres partes fundamentales (corte, perforación y unión de componentes) que se mencionan a detalle a lo largo de esta sección.

Para las labores de corte, es necesario seguir las indicaciones citadas en la metodología, además de respetar todas y cada una de las medidas presentadas en los modelados previos. Primeramente se realizó un corte a una tubería de PVC de 5 cm de diámetro por 6 m de largo, acondicionando esta a una longitud de 25 cm (cuerpo del filtro) como lo muestra la figura 4.9. Dicho corte fue realizado con una segueta de mano y con ayuda de la prensa mecánica de banco (herramientas que pertenecen al taller de prototipos del 3IER). Derivado del corte, el material presento algunos grumos por lo que fue necesario limar dichas asperezas para tener una superficie sólida y nivelada.



Figura 4.9: Tubería PVC adecuada a longitud de 25 cm.

Una vez terminado el corte y listo el cuerpo del sistema, se procedió a la unión de las tapas, mismas que se consiguieron el conjunto con la tubería PVC, dichos elementos presentaron un diámetro de 5 cm concéntrico al tubo, lo que ayudó para su unión de manera inmediata y reduciendo las complicaciones en las actividades.

Con estas actividades realizadas, se consiguió la geometría y una de las principales condiciones del sistema (hermético), lo que a continuación se presenta, son actividades que complementan a las anteriores para conseguir el modelo terminado del filtro de purificación.

Como se mencionó anteriormente, se necesitaron de diversas actividades para conseguir lo que el modelado 3D presenta. Una de estas acciones es las perforación al cuerpo del modelo hasta ahora obtenido.

Para el desarrollo de dicha actividad fue necesaria la utilización de brocas metálicas que pudieran realizar el trabajo sin complicaciones y de manera eficiente, manteniendo al material (PVC) fuera de riesgos externos (grietas, fisuras, quemaduras, entre otros.), éstas tienen diámetros de 2.5 y 0.75 cm y se muestran en la figura 4.10.



Figura 4.10: Brocas utilizadas para las perforaciones.

Las perforaciones, primeramente fueron realizadas a cada una de las tapas tal como lo indica la sección de metodología y como se muestra en la figura 4.12, iniciando con la parte superior, en la que se necesitaron de dos aperturas (entrada y salida de gas) como se indicó anteriormente.

En la tapa superior, las perforaciones fueron realizadas con ayuda de un taladro de mano a la que se acoplo una broca con diámetro de 0.75 cm y colocando fijamente la tapa a la prensa de banco como se muestra en la figura 4.11, se procedió a realizar dicha perforación. Las aperturas fueron realizadas a una distancia de 6 cm una de la otra con el fin de dejar el espacio suficiente entre ellas.



Figura 4.11: Colocación de tapas sobre prensa de banco previo a su perforación.



Figura 4.12: Perforación a las tapas.

Por otra parte, para la tapa inferior fue necesaria de una sola perforación como se menciona en la sección anterior, dicha apertura (salida de mezcla líquida) fue realizada de igual manera con ayuda de un taladro de mano, con la diferencia que la broca que se acopló al taladro tiene un diámetro de 2.5 cm, se repitió el procedimiento anterior; manteniendo fija la tapa con la prensa de banco se procedió entonces a realizar la actividad.



Figura 4.13: Perforaciones realizadas a las tapas (superior e inferior)

De igual manera, una vez realizadas las perforaciones a cada una de las tapas se procede a realizar una última perforación al cuerpo del filtro apreciada en la figura 4.14, esto para definir la entrada de líquido, como se mencionó en la sección de metodología, dicha perforación se ubica a una altura de 18 cm superando la columna de agua depositada al interior del sistema. Dicha apertura tiene un diámetro de 2.5 cm igual que la salida de mezcla líquida mencionada anteriormente, cabe mencionar que las perforaciones en las que involucre mezcla líquida presentan un diámetro superior a las de manejo de gases (2.5 y 0.75 cm respectivamente).



Figura 4.14: Perforación al cuerpo del filtro.

Por otra parte, una vez terminadas las actividades de perforación tanto para las tapas como para el cuerpo del filtro, se procedió a la adecuación de los componentes del sistema. Dichas modificaciones refieren a dejar listas cada una de las aperturas con el fin de acoplar los componentes de válvulas reguladoras.

Esta actividad comprende, a realizar un proceso de machueo a modo de dejar a la apertura con bordes en los cuales otros de igual tamaño pero con sentido contrario encajen de manera exacta y se ajusten hasta conseguir un cierre completo del sistema.

Esta acción se realiza con las perforaciones una vez listas, se utiliza un machuelo metálico con la medida a la que se requiera, en este caso se necesitó de dos machuelos, uno para las aperturas de biogás tanto de entrada como de salida y otro para las de la mezcla líquida, los diámetros de dichos machuelos fueron de 0.75 y 2.5 cm respectivamente.

Este proceso se realizó con llaves inglesa (conocida comunmente perica) a las cuales va sujeta el machuelo, y manteniendo fija la pieza en turno (tapas o cuerpo del filtro) sobre la prensa de banco, se realiza lentamente un proceso de desvaste en la superficie sobre la que se trabaja y una vez el machuelo metálico haya traspasado completamente el espesor de la superficie, puede considerarse terminado dicho proceso.

Posteriormente y con todas las aperturas perfectamente elaboradas y adecuadas, se realizó el acoplamiento de conectores metálicos que unen a la superficie de las tapas y/o el sistema con las válvulas necesarias, como se muestra en la figura 4.15, los conectores fueron seleccionados tomando en consideración su diámetro, siendo este similar a la de las llaves reguladoras, mismas que, como se explicó con anterioridad, sirven para regular los momentos de trabajo del sistema respecto a lo que en su momento se requiera (abierto o cerrado).



Figura 4.15: Adecuación de válvulas conectoras a la tapa de entrada.

Las válvulas ubicadas en la tapa superior, son de material metálico (Bronce) ideal para las labores de manejo de gases como lo menciona B. Morero [8], tienen un diámetro de 0.75 cm y una de ellas (entrada de gas) está adecuada internamente para hacer conducir al biogás hasta una profundidad de 17 cm para su contacto con la mezcla, como se aprecia en la figura 4.16.

Por otra parte la válvula de salida de gas tiene el mismo diámetro, con la diferencia que posteriormente se adecúa con otro componente para conseguir el diámetro de las conexiones del sistema de generación, teniendo estos una medida ligeramente superior a las del filtro de purificación.



Figura 4.16: Adecuación interna del sistema conductor de biogás.

Así mismo, para las aperturas en las que fue necesario el trabajo con las mezclas líquidas (entrada y salida), se necesitó de un machuelo de 2.5 cm (mismo diámetro que la apertura), se repitió de igual manera el proceso de machuelo, actividad que fue realizada en el taller de prototipos del 3IER. Una vez adecuadas las aperturas, se realizaron las conexiones de las válvulas correspondientes, siendo necesaria la utilización del mismo material que el filtro de purificación (PVC). Estas llaves tienen un diámetro de 2.5 cm y regulan la entrada y salida de la mezcla líquida contenida al interior del sistema.

Una vez terminadas las labores de adaptación de las distintas válvulas necesarias para la puesta en marcha del dispositivo de purificación, se realizó la unión o ensamble de cada uno de los componentes.

Es decir, a cada una de las tapas se le agregó cemento PVC para unir cada una de ellas con el cuerpo del filtro de una mejor manera, el cemento sirvió para realizar una unión mas eficiente entre los componentes mencionados previamente.

Es importante mencionar que a las válvulas de bronce ubicadas en la superficie de la tapa superior, se les acoplo un elemento para que pudiera realizarse su unión con el sistema, este elemento fue recubierto con cinta teflón para prevenir algún tipo de fuga y mantener un mejor agarre al material. De igual manera, a las válvulas PVC también se les realizó este proceso, cabe mencionar que a la válvula de entrada del sistema se le acoplo un codo PVC a 90 ° de mismo diámetro a la llave, esto debido a que la entrada se encuentra por una parte lateral del equipo y con ayuda del codo la entrada queda de manera horizontal.

Una vez terminadas las labores de ensamble y unión de los componentes del filtro de purificación, se procedió a realizar una verificación general del equipo, esto con el fin de corroborar de no contar con alguna fisura, grieta o desperfecto que pudiera llegar a representar un peligro mayor en las distintas actividades posteriores.

Posteriormente, y una vez que la verificación determinó que el dispositivo no contó con algún desperfecto, se presentó al equipo obtenido como se muestra en la figura 4.17 mismo que está listo para su conexión con el sistema de generación de biogás para su puesta en marcha.



Figura 4.17: Filtro de purificación con componentes conectados.

4.2.2. Instalación

Para la instalación del dispositivo con el sistema de generación de biogás (biodigestor DM1), fueron necesarias algunas condiciones, tal como se mencionó en la sección de metodología. Cabe mencionar, que para llevar a cabo dichas actividades se tomó en cuenta en todo momento las indicaciones mencionadas en el capítulo anterior.

De igual manera, se analizaron las condiciones en las que se encontraba el área de operación del sistema de generación de biogás. La ubicación del área para la instalación del filtro de purificación, se determinó tomando en consideración algunos puntos de las investigaciones realizadas por L. Vélez [4] y L. Vásquez [7], debido a que mencionan algunas características de este modelo de sistemas. Derivado de las dimensiones con las que cuenta el sistema de generación (diámetro de 1.07 m) y la cubierta de concreto térmico de 14 cm de espesor, el filtro no pudo ser instalado continuamente con el biodigestor, por lo que se optó por ubicar al sistema de purificación a una distancia de 0.40 m después de la salida de gas del sistema de generación y 36 cm después de la cubierta de concreto. Dicha ubicación no contaba con superficies en las que se pudiera realizar la instalación del filtro de purificación, por lo que se optó por realizar una base en la que el filtro pudiera mantenerse fijo y óptimas condiciones para llevar a cabo sus funciones.

Dicha base, se realizó con materiales que pudieran brindar una buena rigidez para conseguir su nulo movimiento por las diferentes circunstancias en las que pudiera llegar a encontrarse el área de trabajo. El material utilizado para llevar a cabo esta actividad fue; madera, por su fácil obtención y su manejabilidad para el desarrollo, misma que fue obtenida del laboratorio de biodigestores del 3IER, la figura 4.18 muestra dichas piezas. Este sistema fue realizado en el taller de prototipos, y se utilizaron herramientas con las que contaba dicho lugar, se realizaron cortes a la madera para dejar 4 partes de una misma longitud (65 cm) que funcionaron como las patas del sistema, de igual manera fueron necesarias 6 piezas de una misma longitud (30 cm), que fueron los soportes internos de las patas, mismos que sirven para mantener rígida a la base y evitar riesgos de caídas al filtro de purificación.

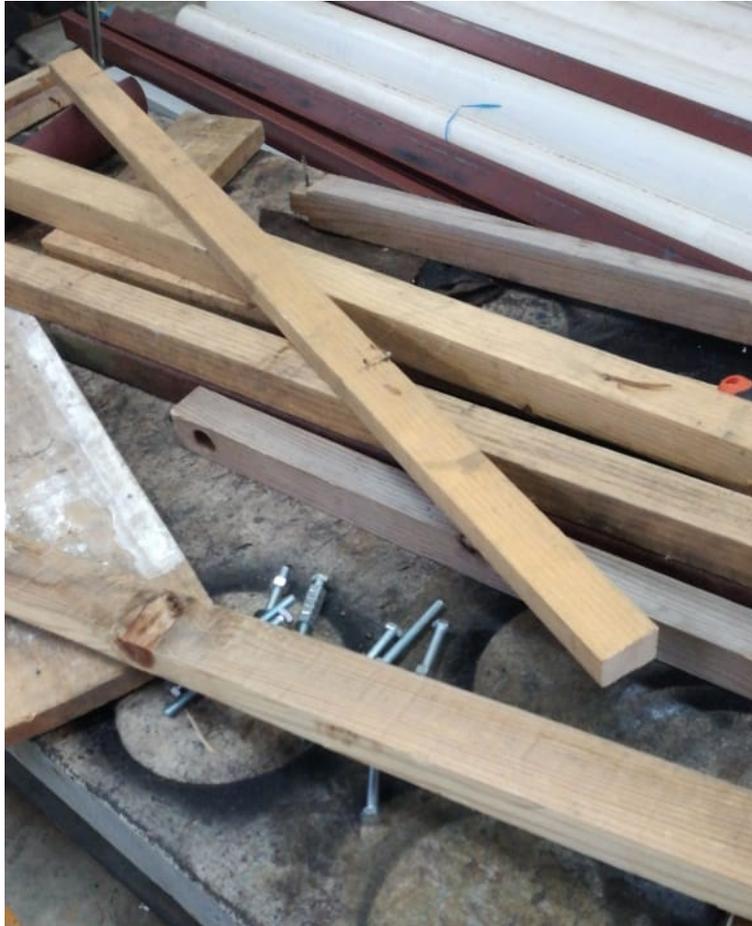


Figura 4.18: Madera utilizada para la estructura del filtro.

Dichos elementos, fueron primeramente perforados con un taladro de mano acoplado una broca con diámetro de 0.75 cm y posteriormente colocando taquetes y tuercas para ajustar hasta conseguir la estabilidad considerada al sistema como se aprecia en la figura 4.19, se optó por la utilización de taquetes, debido a que otros elementos como pijas y/o clavos afectaban considerablemente la madera.



Figura 4.19: Materiales utilizados para la elaboración de la estructura del filtro

Una vez lista la base, se procedió a su colocación en la ubicación previamente seleccionada, las patas de la base fueron enterradas a una profundidad de 25 cm, por lo que esta quedo con una altura final de 40 cm, a continuación se montó el filtro sobre el sistema para realizar las conexiones necesarias con el biodigestor.

Por otra parte, para realizar las conexiones previamente mencionadas entre el filtro de purificación y el sistema de generación, fueron necesarios elementos que facilitaron dicha actividad. Para las uniones entre las aperturas de biogás, fueron necesarias tuercas con dos diámetros distintos, es decir, un diámetro similar a las conexiones de biogás con el filtro (0.75 cm) y uno con las medidas de las uniones de biogás a la salida del biodigestor (1.25 cm), como lo muestra la figura 4.20. La utilización de esta tuerca se determinó con el fin de evitar pérdidas de gas por conducción, debido a que brinda una garantía de flujo bastante alta, manteniendo un nulo contacto entre el biogás transportado y el ambiente.



Figura 4.20: Tuerca reductora de cobre utilizadas en las uniones de conexión.

Posteriormente, se realizaron conexiones para la salida de biogás del filtro con el sistema de conducción para su aplicación en fines distintos. Para dichas uniones nuevamente fue necesaria una tuerca similar a la utilizada en la sección anterior, debido a que los componentes de conexión del biodigestor tanto como la de las conexiones en el sistema de conducción son de las mismas características (material, diámetro), de igual manera se acoplaron los diámetros similares correspondientes, es decir, la salida del filtro se unió con el diámetro de la tuerca de 0.75 cm y por su parte las conexiones de conducción con el diámetro de la tuerca de 1.25 cm, ajustados exactamente con ayuda de una llave tipo inglesa.

Posterior a realizar estas actividades, se realizó nuevamente una inspección general en la que se verificó la ausencia de fugas en cada una de las uniones, una vez que se determinó que las uniones no presentaron fugas se consideró como terminada, la etapa de instalación.

4.3. Evaluaciones

Una vez terminadas las labores de conexión y verificados que los componentes se encuentren instalados de manera correcta, se procedió a realizar las evaluaciones necesarias al sistema realizado.

De igual manera que en las actividades anteriores, en esta parte se tomó como guía la metodología descrita en el capítulo anterior con el fin de cumplir todas y cada una de los puntos previamente citados. Tal y como se indicó anteriormente, esta sección se dividió en dos etapas principales; la elaboración de la mezcla y los análisis al biogás.

4.3.1. Elaboración de la mezcla

Todas las actividades que comprenden a la elaboración de la mezcla fueron realizadas en el laboratorio de síntesis y caracterización de materiales perteneciente al 3IER de la UNICACH, tal y como se mencionó anteriormente. Para el desarrollo de esta actividad, fueron necesarios algunos materiales y elementos que se describen a lo largo de este apartado.

La primera actividad y una de las principales en esta etapa, fue la selección del elemento a utilizar para llevar a cabo la purificación del biogás. Los análisis a las bibliografías consultadas arrojaron algunas sustancias y/o elementos con los que de algún modo se puede realizar este proceso, investigaciones como las de B. Morero [8] en Chile, en las que se trabajó con biogás a gran escala.. De igual manera fueron muy importantes trabajos como los de L. Merino [9] en los que menciona algunas condiciones no muy comunes presentadas por biodigestores y trabajos en operación de biogás.

Así mismo, unas de las investigaciones más importantes para esta etapa, fueron las presentadas por A. Prada [5] y F. Aguado [16], en las que se mencionan experimentos y trabajos desarrollados con mezcla de gases y biogás principalmente. Con el principio de funcionamiento definido, tal y como se mencionó en el apartado anterior,

se procedió a determinar el elemento para llevar a cabo la mezcla, misma que será depositada al interior del sistema de purificación.

Tomando como base, a los trabajos presentados por A. Prada [5], como se mencionó en el apartado de metodología 3.3.1, se contemplaron distintos elementos con los que se puede llevar a cabo la reacción deseada (remoción de CO_2 del biogás). Los elementos considerados más importantes, se muestran en la tabla 3.1 del mismo apartado, así como algunas características de estos.

Siguiendo al margen el protocolo de actividades presentados en 3.3.1, se optó por realizar una primera mezcla a modo de prueba, contemplando los elementos presentados en la tabla 3.1. Se optó por la utilización de hidróxido de potasio (KOH) como soluto de la mezcla y agua destilada como solvente. Esto, debido a que realizan la misma función que otros elementos como el hidróxido de calcio (CaO) y presenta además un costo económico menor. Otro punto importante para la elección del KOH y agua destilada como elementos principales de la mezcla.

La primera mezcla se realizó, contemplando las cantidades presentadas en la investigación de A. Prada [5], con los datos mencionados en dicha investigación, se realizaron ecuaciones para determinar primeramente la cantidad de KOH para la mezcla. Dicha ecuación 5.3, se menciona en la sección de anexos 5.2.

Así pues, la ecuación 5.3 arrojó como resultado 5 g como la indicada para realizar la primera mezcla. Dicha mezcla tuvo una molaridad de 0.178 M, como se menciona en la tabla refmolaridades, este dato se logro aplicando la ecuación 5.4 en la sección de anexos 5.2. Cabe mencionar que todas las mezclas se realizaron con el mismo volumen de solvente (0.5 l), variando únicamente las cantidades de KOH .

A partir de haberse determinado las cantidades de la primera mezcla, se procedió a realizar las mismas actividades para todas las mezclas necesarias.

Para la segunda mezcla, se definió realizar un aumento (10 g) a la cantidad de

soluto de la mezcla, para observar posteriormente los cambios en las características del biogás por medio de los análisis. Esto quiere decir que para la segunda mezcla se utilizaron 15 g de KOH , definido esto, se procedió a la aplicación de las ecuaciones previamente mencionadas. La ecuación 5.4 determino que la molaridad para esta mezcla fue de 0.535 M, misma que se registró en la tabla 4.1.

De igual manera, para tercera mezcla se realizó un aumento de (10 g) a la masa de soluto en relación a la mezcla elaborada previamente, esto quiere decir que para esta mezcla se tuvo una masa total de 25 g de KOH y dicha mezcla presentó una molaridad de 0.891 M, que se registró en la tabla 4.1, dato que se obtuvo tras aplicar las ecuaciones mencionadas anteriormente.

Se realizó una cuarta mezcla, de igual manera que en las anteriores variando las cantidades del soluto (10 g), teniendo un total de 35 g y la misma cantidad de agua (0.5 l). Dicha mezcla presento una molaridad de 1.25 M, dato que se muestra en la tabla 4.1 con los resultados previamente mencionados.

Mezcla	CANTIDAD KOH (g)	CANTIDAD AGUA (ml)	MOLARIDAD (M)
A	5	500	0.356
B	15	500	0.535
C	25	500	0.891
D	35	500	1.247

Cuadro 4.1: Registro de mezclas y molaridades.

4.3.2. Análisis al biogás

Como se indicó en la sección de metodología 3.3.2, una vez la mezcla haya sido realizada y depositada en el filtro de purificación, se procedió a la puesta en marcha de dicho sistema y seguidamente los análisis al biogás inducido con el fin de apreciar el rendimiento del equipo con cada una de las muestras preparadas.

Para esta actividad, primeramente fue necesario la selección del sistema de medición de gases que se utilizó, dicho sistema fue el LANDTEC GEM-5000, que se menciona en la sección de fundamentos teóricos 2.12.3, esto debido a las condiciones y características que presenta; como el fácil manejo y traslado para su operación en distintas zonas aun no existiendo toma de energía eléctrica en estas, la versatilidad y la rapidez con la que presenta los resultados. Estas características en conjunto con las condiciones del área del sistema de generación de biogás determinaron la selección de este equipo como el necesario para la realización de los análisis requeridos al biogás.

Los análisis se realizaron contemplando las indicaciones mencionadas en la sección de metodología, acoplando las conexiones del equipo (Landtec GEM-5000), con las de los sistemas (de generación y de purificación de biogás), para la conexión con el sistema de generación fueron necesarias dos mangueras de distintos diámetros que permitieron un flujo de biogás de manera aislada con el ambiente, esto con el fin de cuidar la eficiencia de los análisis y de lograr una conexión segura entre ambos sistemas. En el caso del filtro, únicamente fue necesaria una pequeña pipeta que se acopló de manera exacta a la conexión del sistema de purificación con el de análisis de biogás como se muestra en la figura 4.21.



Figura 4.21: Equipo Landtec GEM-5000 utilizado para los análisis de biogás.

Así mismo, siguiendo las indicaciones mencionadas en el capítulo anterior, se realizaron mediciones al biogás antes y después del filtro de purificación, cada medición se realizó en tres ocasiones, es decir, se tomaron tres muestras de biogás antes de ser inducido al sistema de eliminación de impurezas, y de esta se tomó un valor promedio, dicha acción se realizó con el fin de comprobar que las mediciones no presenten altas variaciones en sus valores. De igual manera, se tomaron muestras al biogás después de su inducción al filtro, repitiendo el proceso anterior, se analizó en tres ocasiones al biocombustible y de dichos análisis se tomó un valor promedio.

Cabe mencionar, que el procedimiento de análisis previamente mencionado fue aplicado a todas las mediciones realizadas al biogás, con las diferentes variaciones tanto a la mezcla como a la molaridad de esta descritas con anterioridad. Esto quiere decir, que para cada una de las variaciones a la mezcla, se realizaron las tres registros antes y después del filtro y se determinó el valor promedio.

El primer análisis se realizó con un una mezcla de 5 g de KOH y 500 ml de agua destilada, con una molaridad de 0.356 M, como lo indicó la tabla 4.1. Se ejecutaron los tres análisis de manera consecutiva para obtener un valor promedio como se mencionó con anterioridad, antes y después del filtro de purificación y los valores obtenidos de dicho análisis se presentan en la tabla 4.2 que se divide en tres columnas; elemento, cantidad antes y después del sistema de purificación (SP).

Componente (Cantidad)	ANTES SP	DESPUES SP
CH_4 (%)	48.633	54.333
CO_2 (%)	51.4	45.233
O_2 (%)	0.2	0.2
H_2 (ppm)	18	17
H_2S (ppm)	270	16
Bal (%)	0	0.133
Pesion Relativa (H_2O)	2.99	-0.323

Cuadro 4.2: Datos de la primera evaluación con 5 g de KOH .

Los primeros análisis realizados, mostraron una ligera disminución en el porcentaje de CO_2 como componente del biogás pasando de un 51 % que indicaba inicialmente a la salida del biodigestor a un 45 % después de su inducción al filtro de purificación, del mismo modo en la tabla 4.2 se muestra un aumento en la cantidad de CH_4 presente, mostrando una variación de 48 a 54 %. Con esto, se comprobó que la mezcla entre agua destilada y KOH efectuó un proceso de remoción de CO_2 del biogás

generado en los biodigestores DM1.

Por otra parte, el segundo análisis fue realizado de igual manera contemplando las indicaciones mencionadas en la sección de metodología, mismo que comenta una variación a la mezcla de purificación así como a su molaridad, tal y como lo menciona la tabla 4.1. Esta mezcla se realizó con la misma cantidad de agua (500 ml) pero variando la cantidad de soluto (KOH) a 15 gramos, dicha mezcla presento una molaridad de 0.535 M y los resultados del análisis se presentan en la tabla 4.3.

Componente (Cantidad)	ANTES SP	DESPUES SP
CH_4 (%)	46.4	60.4
CO_2 (%)	53.367	38.533
O_2 (%)	0.233	0.233
H_2 (ppm)	21	18.667
H_2S (ppm)	126.667	18
Bal (%)	0	0.800
Pesion Relativa (H_2O)	1.237	-0.697

Cuadro 4.3: Datos de la segunda evaluación con 15 g de KOH .

Después de dicho análisis, se puede apreciar una disminución en el porcentaje de CO_2 de una manera aún más marcada que en la evaluación anterior, de igual manera las cantidades de CH_4 como componente del biocombustible aumentaron considerablemente pasando de un 46 a un 60% tal como lo indica la tabla 4.3.

Así pues, continuando con la ejecución de las actividades descritas en el capítulo anterior, se realizó una tercera mezcla, nuevamente variando la cantidad del soluto tal y como se hizo en el apartado anterior, la variación nuevamente fue de 10 g mismos que se mencionaron también en la tabla 4.1 la cual también indica que dicha mezcla presento una molaridad de 0.891 M, los datos obtenidos de la tercera evaluación se muestran a continuación en la tabla 4.4.

Componente (Cantidad)	ANTES DSP	DESPUES DSP
CH_4 (%)	46.4	70.1
CO_2 (%)	53.367	29.5
O_2 (%)	0.233	0.333
H_2 (ppm)	21	20.333
H_2S (ppm)	126.667	24
Bal (%)	0	0.067
Pesion Relativa (H_2O)	1.237	-2.32

Cuadro 4.4: Datos de la tercera evaluación con 25 g de KOH .

Como se aprecia en la tabla 4.4, nuevamente se presentó una variación en el porcentaje de los elementos presentes en el biogás, siendo este el rango más notorio entre las evaluaciones, el CH_4 presento un cambio de 46 a 70 %, 10 % más que en la evaluación anterior, mientras que el CO_2 presento una disminución de 53 a 29 %, más de un 10 % que en la anterior evaluación en la que registró un porcentaje de 38 %.

De la misma manera que en los análisis anteriores, para esta actividad se tomó siempre en consideración las indicaciones presentadas en la metodología descrita anteriormente, se realizó un aumento de 10 g en la cantidad de la masa del soluto (KOH) y se obtuvo con esto un peso final de 35 g para la tercera mezcla, manteniendo la misma cantidad de agua (500 ml).

Dicha mezcla presentó una molaridad de 1.247 M, cantidad que se expone en la tabla 4.1, los resultados obtenidos del análisis realizado se presentan a continuación en la tabla 4.5.

Componente (Cantidad)	ANTES DSP	DESPUES DSP
CH_4 (%)	46.567	72.867
CO_2 (%)	53.167	26.867
O_2 (%)	0.267	0.167
H_2 (ppm)	19.667	20.333
H_2S (ppm)	127.667	21.000
Bal (%)	0	0.1
Pesion Relativa (H_2O)	0.983	-2.207

Cuadro 4.5: Datos de la cuarta evaluación con 35 g de KOH .

En la tabla 4.5, se puede apreciar que en los análisis realizados a la última mezcla de purificación se presentó nuevamente una variación en la cantidad de los elementos presentes en el biogás, y aunque en esta última evaluación los valores no presentaron un cambio altamente considerable como en la tabla 4.3 y 4.4, si existió una ligera alteración. En la tabla 4.5 se aprecia que el CH_4 presentó un aumento de 46 a 72 %, es decir solo un 2 % más que en la anterior evaluación registrada con la masa de 25 g de KOH , mientras que el CO_2 presentó una disminución de 53 a 26 %, presentando una disminución de 3 %

Agrupando los datos de manera ordenada, se logró presentar en graficas el comportamiento de los elementos principales en la composición del biogás generado, antes y después de su interacción con el filtro de purificación.

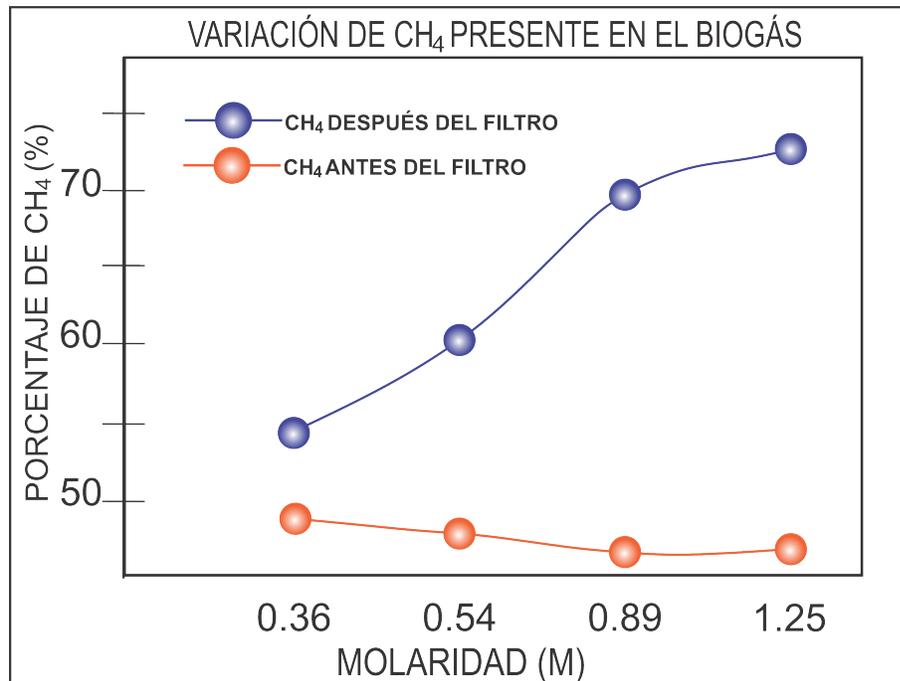


Figura 4.22: Variación del porcentaje de CH_4 @ molaridad de la mezcla.

En la figura 4.22, se muestra la variación que presentó el CH_4 durante las evaluaciones registradas con el equipo Landtec GEM-5000. Dichas evaluaciones se fueron realizadas como se mencionó previamente después de haber variado las concentraciones del soluto de la mezcla.

Se puede apreciar un aumento en el porcentaje de CH_4 como elemento componente del biogás, registrando en la primera evaluación; un 48.6% antes de la inducción del gas al filtro y un 54.3% del total del biogás después del sistema de purificación, consiguiendo así pasar de un gas con un poder calorífico inicial de 6.75 kWh/kg a 7.54 kWh/kg posterior al sistema, esto se logró con una mezcla de 5 g de KOH , 500 ml de agua y una molaridad de 0.356 M.

En la segunda evaluación y como se indica en la figura 4.22 el CH_4 presentó una variación nuevamente, pasando de un 47.7% antes del filtro a un 60.4% después de ser inducido a dicho sistema de purificación, consiguiendo así un aumento de 1.77 kWh/kg (6.62 kWh/kg inicial-7.39 kWh/kg final), esto representó un aumento de 6% con respecto a la primera evaluación, y se logró con un total de 15 g de KOH en la misma cantidad de agua (500 ml) y con una molaridad de 0.535 M.

De igual manera, en la tercera evaluación se muestra un aumento en el porcentaje de CH_4 presente en el biogás, pasando de un 46.4 a la salida del biodigestor con un poder calorífico de 6.44 kWh/kg, a un 70.1% después de su inducción a el filtro de purificación consiguiendo un biogás con poder calorífico de 9.37 kWh/kg, nuevamente con una variación en la masa del soluto (KOH) a 25 g en la misma cantidad de agua y con una molaridad de 0.891 M.

Así mismo, en la cuarta evaluación se registra una variación en el porcentaje total de CH_4 , de un 46.5 a un 72.8% con un aumento de 6.45 a 10.11 kWh/kg respectivamente, variando únicamente en 2% con respecto a la evaluación anterior, esto con una mezcla de 35 g de KOH , la misma cantidad de agua y con una molaridad de 1.25 M.

Con los datos mostrados anteriormente, se un aumento en las cantidades de CH_4 presentes en el biogás generado, desde un porcentaje inicial de 46.4% a uno final con 72.8%, lo que represento un aumento de 3.67 kWh/kg en el poder calorífico, pasando de 6.44 a 10.11 kWh/kg respectivamente.

De igual manera, se agruparon los datos de manera ordenada de los demás elementos presentes en la composición del biogás, para representarlos en una figura, en la que se pueda apreciar de manera clara el comportamiento de dicho elemento con el paso de las evaluaciones.

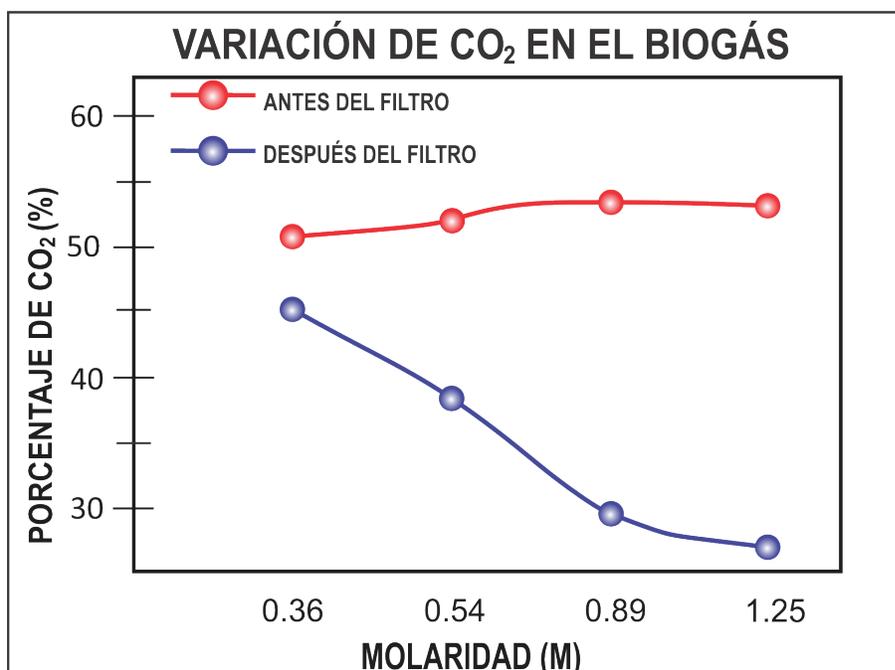


Figura 4.23: Variación del porcentaje de CO_2 @ molaridad de la mezcla.

La grafica de la figura 4.23 muestra la variación del CO_2 presente en el biogás, después de cada una de las evaluaciones, como se mencionó anteriormente. Se aprecia que al paso de las evaluaciones, los análisis realizados al biogás antes del filtro presentan un comportamiento casi constante, es decir una casi nula variación en la cantidad de sus porcentajes, pasando de; (51.4 – 52.1 – 53.4 – 53.2), con respecto al número de variaciones realizadas, presentando un promedio de 52.5%.

Por otra parte, también se aprecia la notoria disminución del CO_2 antes y después de ser inducido al filtro de purificación, así como su descenso en porcentaje como componente del biogás con respecto al número de mediciones. En el primer análisis y con la mezcla realizada con 5 g de KOH , se registró un 41.2% de CO_2 ,

disminuyendo con la segunda mezcla de 15 g de soluto a un 38.5 %, para la tercera mezcla (25 g KOH) la disminución fue aún más notoria, en la que se registró un 29.5 %, mientras que en la última mezcla (35 g KOH) la disminución no fue tan considerable como la anterior, debido a que se registró un 26.9 %.

Lo anterior representó un buen rendimiento del sistema de eliminación de CO_2 , puesto que como lo indican las figuras 4.22 y 4.23, se logró aumentar el porcentaje de CH_4 y disminuir el de CO_2 respectivamente. Pasando con el metano de un 48.6 a un 72.9 %, es decir se registró un aumento de 24.3 % en el total de CH_4 presente en el biogás.

Mientras que, por otra parte el CO_2 presentó una notoria disminución, pasando de un 51.4 a un 26.9 % en el total presente en el biogás, esto representó una disminución de un 24.5 % de CO_2 .

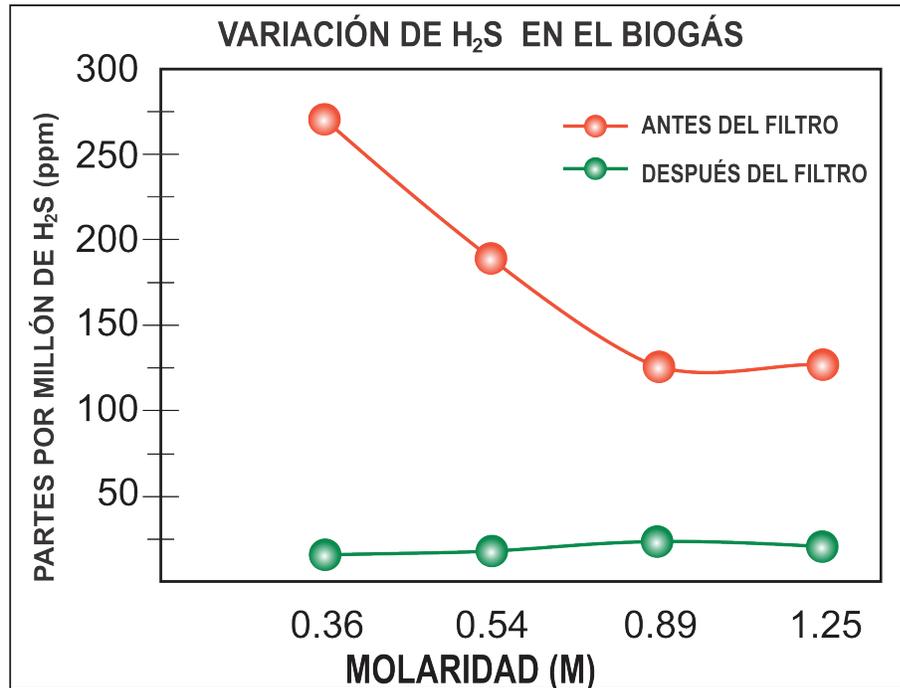


Figura 4.24: Variación del porcentaje de H_2S @ molaridad de la mezcla.

En la gráfica de la figura 4.24 se aprecia el comportamiento del H_2S durante el proceso de análisis de biogás, al igual que en las gráficas mencionadas previamente con los elementos (CH_4 Y CO_2) respectivamente, en esta se aprecia una variación.

Se aprecia, una disminución en la cantidad total de H_2S como componente del biogás antes y después del sistema de purificación. De este modo, las cantidades varían, inicialmente pasando de 270 a 16 ppm en la primera medición realizada con la mezcla con molaridad de 0.36 M, de igual manera se muestra en el siguiente análisis realizado con mezcla a molaridad de 0.54 M una descenso en la cantidad de H_2S pasado de 156 a 18 ppm.

De igual manera, las últimas dos evaluaciones presentaron comportamientos similares en el descenso de las cantidades de H_2S , pasando en la tercera de 126 a 24 ppm con una mezcla a molaridad de 0.89 M, y en el último análisis realizado se apreció una variación de paso de 127 a 21 ppm con mezcla a molaridad de 1.25 M.

La grafica muestra una reducción de H_2S como componente del biogás y presenta al inicio un descenso de 254 ppm tras pasar por el sistema de purificación, siendo este el margen más alto obtenido, debido a que la presencia de H_2S en el biogás a la salida del biodigestor (sin purificar) presento un descenso considerable (126 ppm), no obstante el sistema de remoción, logró mantener las cantidades de H_2S establemente bajas en cantidades que no superaron las 25 ppm.

Cabe mencionar que en esta etapa se encontró instalado un sistema con virutas de hierro previamente tratadas que dan estabilidad a la remoción de H_2S , y que funcionan en conexión al sistema de eliminación de CO_2 .

4.3.3. Conclusión

Como inicialmente se menciona, el principal objetivo de este proyecto de investigación es realizar un sistema que permita reducir las cantidades de CO_2 presentes en el biogás que se genera en los biodigestores DM1 del laboratorio de bioenergía del ZIER.

En dicha investigación, se mencionaron todos los detalles, procesos, y métodos que fueron necesarios para la construcción del sistema. Mismo que posterior a su elaboración y constante monitoreo, presentó un buen desempeño, consiguiendo la reducción de hasta un 30 % en las cantidades de CO_2 presentes, acción que por consiguiente aumentó el porcentaje de CH_4 , hasta un 24.3 %. De este modo, se consiguió un aumento en el poder calorífico de dicho biocombustible como se menciono anteriormente.

De igual manera, el sistema desarrollado presentó también reducciones en las cantidades de H_2S . Debido a que, en trabajos de monitoreo realizados anteriormente a este compuesto se había conseguido la eliminación de altas cantidades de H_2S , actividad que fue realizada con la instalación de un filtro con virutas de hierro en su interior, así como lo menciona L. Vázquez [7]. Las mediciones realizadas al biogás posterior a su inducción al filtro de H_2S , presentaron una disminución de 88 % de este elemento, dato que fue mejorado con la instalación del filtro de eliminación de CO_2 , consiguiendo una disminución de 95 % en cantidades de H_2S .

Con este dato, se puede determinar que el filtro desarrollado no solamente elimina cantidades de CO_2 , sino también cantidades de H_2S y que en conexión con el filtro de virutas, se consigue una eliminación casi completa de este compuesto.

Por otra parte, con las evaluaciones realizadas se consiguieron graficar el comportamiento de los elementos presentes en el biogás, como se indicó anteriormente se realizaron pruebas con distintas molaridades en la mezcla utilizada, con esto se pudo determinar que la mezcla **C** presentó mejores resultados, debido a que la muestra **D** no mostró una alta variación en los elementos principales, presentando en caso de

CO_2 una disminución de 2.6% y para CH_4 un aumento de 2.8% con respecto a la mezcla anterior, todo esto al margen de un aumento de 10 g en la cantidad de soluto de la mezcla.

Por tanto, se determinó que la mezcla **C** es la que presenta mejores resultados en cuanto a la cantidad de componentes necesarios para su elaboración como los datos que presenta en cuanto a desempeño.

4.3.4. Trabajos a futuro

Los resultados obtenidos con el proyecto de investigación desarrollado, representaron un avance en las investigaciones en el área de bioenergía del 3IER, puesto que no había registro de algún trabajo similar. De este modo, se consiguió la realización de los objetivos planteados inicialmente y se traza una nueva línea de investigación para esta área de la UNICACH.

Así pues, continuando con las investigaciones relacionadas a la purificación de biogás, se consideran nuevas estrategias para llevar a cabo dicha actividad. Métodos como; la utilización de micro algas y el uso de carbón activado, como agentes reMOVEDORES de impurezas presentes en el biogás, son los temas principales para continuar con la línea de investigación mencionada. De este modo, el área de bioenergía del 3IER podrá contar con investigaciones diversas en cuanto la purificación de biogás se refiera, debido a que hasta el momento ninguna de las tecnologías mencionadas previamente ha sido instalada al sistema de biodigestores DM1.

Por otra parte, también se contempla la creación de un área de compresión y almacenamiento de biogás, mismo que representará un logro importante en las investigaciones realizadas por los estudiantes e investigadores del 3IER, y que facilitará las actividades que se realizan. Dicha área, podría servir como herramienta de suma importancia al sistema de evaluación de estufas ecológicas, en donde ya se emplean métodos de combinación de leña y biogás para la combustión y su utilización en fines distintos (cocción de alimentos, calentamiento de hogares, secado de productos, entre otros).

De este modo, la creación y puesta en marcha del laboratorio mencionado permitirá la estandarización de compresión y almacenamiento del biogás, acción que se facilita con los datos obtenidos por este proyecto de investigación y con los realizados por L. Vázquez [7] y L. Velez [4].

Capítulo 5

Anexos

En el siguiente apartado, se mencionan algunos procesos del proyecto de investigación que no fueron detallados durante los capítulos anteriores pero que de algún modo su presencia es de suma importancia. De igual manera, los temas que a continuación se exponen fueron mencionados en uno o más títulos mencionados previamente.

5.1. Ecuación para el dimensionado del filtro

Derivado de las presiones presentadas a la salida del sistema de generación de biogás (biodigestor), y a los malos desempeños de los equipos utilizados anteriormente, mismos que fueron ocasionados por no tener una consideración previa de dicha presión, se optó por realizar un monitoreo de las presiones presentadas por el biodigestor considerando también los trabajos realizados por L. Vélez [4] y por L. Vásquez [7] en los que contemplan labores de análisis de presión a la salida del sistema.

Se desarrolló una ecuación con el fin de definir las medidas óptimas para el dispositivo. Se consideró a la presión más baja registrada durante todo el periodo de tiempo monitoreado, esto con el fin de que el equipo pueda desempeñarse aun con las presiones más bajas. Dicha presión fue de 0.3 psi y es utilizada como elemento importante en la siguiente formula. Debido que se optó por dejar un margen entre la presión más baja registrada y la necesaria, utilizo una presión de 0.25 psi o su equivalencia 1723 pascal, teniendo este dato se realizo la siguiente ecuación.

$$h = \frac{P}{\rho * g} \quad (5.1)$$

Donde:

h = Altura buscada.

P = Presión (en pascal).

ρ = Densidad.

g = Gravedad.

Dicha ecuación da como resultado 17.5 cm, que se considera como la altura ideal para que el filtro pueda operar sin compicar las labores del sistema de generación. Esto quiere decir que aún con la presión más baja a la salida del biodigestor, el filtro podrá desempeñar sus funciones.

Considerando que 17.5 cm es el 70 % del filtro, se aplicó la formula ref for para determinar la cantidad en centímetros del 30 % restante

$$100 \% = \frac{(100) * (17,5)}{70} \quad (5.2)$$

Donde:

100 % = Altura total del dispositivo.

100 = Porcentaje buscado.

17,5 = Altura en cm del 70 %.

70 = Porcentaje de la altura total buscada.

La ecuación 5.2 dio como resultado 25 cm, que se consideró como la altura total del dispositivo, y tomando en consideración que ya se conocía el diámetro del mismo, se contempló entonces como listos todas las dimensiones del sistema.

5.2. Ecuación de cantidad de hidroxido

$$x(rel) = \frac{70 \%_{Captotal} * 100_{gr}}{10_{lts}} \quad (5.3)$$

Donde:

$x(rel)$ = Cantidad de hidróxido en gramos necesaria.

$70 \%_{Captotal}$ = 70 % del volumen total del filtro.

100_{gr} = Cantidad en gramos que se utilizan en la ecuación de la bibliografía.

10_{lts} = Cantidad en litros de agua que se utiliza en la ecuación de la bibliografía.

5.2.1. Ecuación para determinar molaridad

Para determinar la molaridad de las diferentes mezclas utilizadas, fue indispensable la siguiente formula.

$$M = \frac{\eta_{soluto}}{V} \quad (5.4)$$

Donde:

M = Molaridad.

η_{soluto} = Número de moles del soluto.

V = Volumen en litros de la solución.

En caso de no contar con el dato de numero de moles del soluto, se aplica entonces la siguiente formula.

$$N = \frac{masa}{MM} \quad (5.5)$$

N = Numero de moles.

$masa$ = Cantidad en gramos.

MM = Masa molar.

Bibliografía

- [1] Jimenez Lira. and Gabriela Katherine. Análisis de la eficiencia de la combustión de biogás en un quemador boliviano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 3:94—102, 2016.
- [2] Enrique Ávila Soler. *Biogás: Opción real de seguridad para México*. Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [3] Secretaría de Energía. *Perspectiva de energías renovables*, July 2016.
- [4] Laura Velez Landa. *Evaluación de parametros de de operación de un biodigestor rigido modelo DM1*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2015.
- [5] Abelardo Prada Matiz. and Carroll E. Corts Castillo. Experiencias en la captura de los gases de combustión de la cascarilla de arroz con soluciones alcalinas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15:16—30, 2011.
- [6] María T. Varnero., Margarita Carú., Karina Galleguillos., and Patricio Achondo. Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 23:31—40, 2012.
- [7] Luis Antonio Vazquez Valencia. *Sistema integral de generación de energía eléctrica por medio de biogas*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2016.
- [8] Betzabet Morero. *Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias*. Universidad Nacional del Litoral, 2014.
- [9] Luis Merino. *Las Energías Renovables*, July 2012.

-
- [10] Tipos de energía. www.tiposdeenergia.info/fuentes-de-energia/, 03 de Marzo de 2018.
- [11] Julieta C. Schallenberg Rodríguez. *Energías renovables y eficiencia energética*. Instituto Tecnológico de Canarias, 2008.
- [12] Empresa Provisional de Energía Córdoba. www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf, 04 de Marzo de 2018.
- [13] Juan Andrés Pérez Medel. *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros*. Universidad de Chile, 2010.
- [14] Feria de las ciencias UNAM. *BIODIGESTOR: Alternativa Energética.*, March 2014.
- [15] Ministerio de energía de Chile. *Manual de biogás.*, March 2011.
- [16] Francisco Urieta Aguado. *Diseño y construcción de su sistema ORSAT modificado para el análisis de biogás*. Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [17] Ptolomeo UNAM. www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/732/A7.pdf?sequence=7, 22 de Diciembre de 2017.
- [18] Alejandro Bautista Buhigas. *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*. Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politecnica Superior, 2010.
- [19] Llanea Herminio. *Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás.*, March 2010.
- [20] Wei-Chih Lin., Yu-Pei Chen., and Ching-Ping Tseng. Pilot-scale chemical-biological system for efficient h_2s removal from biogas. *Bioresource Technology*, 135:283—291, 2013.
- [21] Wilmer Ernesto Linares Rivera. *Fundamentos teóricos y propuesta de un proceso para la práctica del envasado de biogás libre de CO_2 y CH_2S en El Salvador*. Universidad de El Salvador, 2017.

-
- [22] Paloma González Aguilera. *Estudio de la adsorción de sulfuro de hidrógeno usando lodos secos de depuradora con aplicación al biogás de vertedero. Evaluación experimental, modelado y simulación*. Universidad de Sevilla, 2016.
- [23] Mario Daza B. *Procso Selexol.*, March 2014.
- [24] Equipos y Laboratorio de Colombia. www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=2794, 28 de Febrero de 2019.
- [25] Laura Patricia Olguín Pérez. and Héctor M. Rodríguez Magadán. *Cromatografía de gases*. Universidad Nacional Autonoma de México, 2004.
- [26] Museo Nacional de Las Ciencias Naturales. www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf, 28 de Febrero de 2019.
- [27] Docplayer. www.docplayer.es/77628101-Equipo-de-medicion-en-linea-de-gases-en-plantas-de-biogas-y-rellenos-sanitarios.html, 5 de Marzo de 2019.
- [28] SEWERIN. Tecnologías para la detección de fugas. *Multitec 540.*, September 2012.
- [29] Diamond Scientific. www.viasensor.info/landtec-gem5000-p-424.html, 5 de Marzo de 2019.
- [30] LANDTEC. *GEM5000 Gas Analyzer Operating Manual.*, September 2015.