

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
Sede: “Carlos Rafael Rodríguez”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**UNIVERSIDAD
DE CIENFUEGOS**
CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ

Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Mecánico.

**Título: Diseño de un filtro para la Eliminación del Sulfuro de
Hidrógeno en el Biogás.**

Autor: Yadier Echevarría Román.

Tutor: MSc. Conrado Manuel Ramírez Cutiño.

**2023
Año 65 de la Revolución**

Cienfuegos 2023
DECLARACIÓN DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
INGENIERÍA

Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Nombre y Apellidos. Firma.
Vice-Decano.

Firma del Tutor.

Nombre y Apellidos. Firma.
Sistema de Documentación y Proyecto.

Pensamiento:

Nuestros primeros esfuerzos son puramente instintivos, de una imaginación vívida e indisciplinada.

Nikola Tesla.

Agradecimientos:

En primer lugar les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades.

Le agradezco muy profundamente a mi tutor por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos, los llevaré grabados para siempre en la memoria en mi futuro profesional.

Son muchos los docentes que han sido parte de mi camino universitario, y a todos ellos les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Sin ustedes los conceptos serían solo palabras.

Agradecerles a todos mis compañeros los cuales muchos de ellos se han convertido en mis amigos, cómplices y hermanos. Gracias por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas.

Por último agradecer a la universidad que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener mi tan ansiado título. Agradezco a cada directivo por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no estarían las bases ni las condiciones para aprender conocimientos

Dedicatoria:

A Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta.

A mis padres, por todo su amor y por motivarme a seguir hacia adelante.

A mi familia, por ser el apoyo incondicional en todos estos años de vida.

A mi novia y mis suegros, por estar a mi lado en estos tiempos tan difíciles.

A mis compañeros de grupo, por el aliento constante.

A todos ellos, les dedico este trabajo y todo el esfuerzo empeñado.

Resumen:

En el presente trabajo se brinda una metodología de diseño basada en el método de absorción con materiales secos (método seco), para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H_2S) presente en el biogás hasta reducirlo a niveles seguros de acuerdo a las normativas internacionales. Partiendo de la escasa, incorrecta o ninguna aplicación de métodos de filtrado en los biodigestores existentes en la provincia de Cienfuegos y el país en general y atendiendo a los efectos negativos de este gas en particular, se hace necesario conocer cuáles son las alternativas disponibles para solucionar el problema, la importancia de la eliminación de H_2S para la introducción a gran escala del biogás, algunos criterios técnicos para el cálculo y diseño del filtro de biogás, los materiales a utilizar y los procesos tecnológicos para su obtención, como la producción de óxido de hierro, óxido férrico u óxido de hierro 3 (Fe_2O_3) a partir de la viruta, manteniendo un grado de sencillez en el diseño para ser fácilmente comprensible y aplicable por cualquier persona o industria con el potencial de explotar correctamente el valioso portador energético que constituye el biogás.

Palabras claves: sulfuro de hidrógeno, biogás, biodigestor.

Summary:

This work provides a design methodology based on the absorption method with dry materials (dry method), to eliminate hydrogen sulfide (H_2S) present in biogas until it is reduced to safe levels according to international regulations. Starting from the scarce, incorrect or no application of filtering methods in the existing biodigesters in the province of Cienfuegos and the country in general and taking into account the negative effects of this gas in particular, it is necessary to know what alternatives are available to solve the problem, the importance of H_2S elimination for the large-scale introduction of biogas, some technical criteria for the calculation and design of the biogas filter, the materials to be used and the technological processes to obtain it, such as the production of carbon oxide. iron, ferric oxide or iron 3 oxide (Fe_2O_3) from the chip, maintaining a degree of simplicity in the design to be easily understandable and applicable by any person or industry with the potential to correctly exploit the valuable energy carrier that constitutes the biogas.

Keywords: hydrogen sulfide, biogas, biodigester.

Sumario

Introducción	1
Capítulo I - Estado actual y tendencias en el uso del biogás.	3
1.1- Definición de biogás.	3
1.2- Composición y características del biogás.	3
Cantidad de Metano.....	4
1.3- Generalidades del proceso de digestión anaeróbica.	5
1.4- Etapas de la producción de biogás.	6
1.5 - Factores que Afectan a la Digestión Anaerobia.	9
1.5.1- Relación C/N (balance de nutrientes)	9
1.5.2- Efecto del pH.....	10
1.5.3- Efecto de la Temperatura.....	10
1.6- Biodigestores; Partes de un Biodigestor Anaeróbico:	11
1.6.1- Sistema de Entrada de la Materia (Sistema de Carga):.....	11
1.6.2- Cámara de Digestión:	11
1.6.3- Cámara de Gas o Gasómetro:	12
1.6.4- Sistema de salida del efluente (sistema de descarga):.....	12
1.6.5- Sistema de eliminación de agua del biogás:.....	12
1.6.6- Sistema de control de presión:.....	12
1.6.7- Válvula de seguridad:	12
1.6.8- Sistema de salida de gas:	13
1.6.9- Sistema de purificación o filtración del biogás:.....	13
1.7- Tipos de Digestores. Clasificación.	13
1.7.1- Los Biodigestores Domésticos	13
1.7.2- Los Biodigestores de Tipo Comunitario	14
1.7.3- Los Biodigestores Industriales	14
1.8- Digestores Convencionales:	15
1.8.1- Digestores de Baja Velocidad (Hindú, Horizontal y Chino).	15
1.8.2- Digestores de Alta Velocidad (CSTR):.....	18
1.9- Digestores de Alta Carga:	18
1.10- Alternativas de procesos de digestión.....	18
1.11- Otras Clasificaciones.	20
1.11.1- Digestores Discontinuos.	20
1.11.2- Digestores Continuos.	20
1.11.3- Digestores de Mezcla Total.	20
1.11.4- Digestores de "Contacto" o "Reciclado de Lodos".	20
1.12- Sistemas Anaerobios Avanzados.	20
1.13- El biogás en el contexto internacional.	22
1.14- Biodigestores en el Contexto Cubano.	24
1.15 - Mantenimiento.	27
1.16 - Necesidad de Filtrar el Biogás:	28
1.17- Características del H ₂ S.	28
1.18- La corrosión causada por H ₂ S	31
Conclusiones parciales del primer capítulo.....	31
Capitulo II: Base teórica del proceso de purificación del biogás.	33
2.1- Procesos de Absorción.....	35
2.2- Procesos de Adsorción en una Superficie Sólida.	36
2.2.1- Óxido de Hierro.....	37

2.2.2- Carbón Activado.	37
2.3- Separación por Membranas.	37
2.4- Procesos de Oxidación Seca.	39
2.5- Proceso de Separación Biológico.	39
2.6- Utilización del Material de Cal Sodada para Absorber el CO ₂	41
2.7- Uso de Polvo de Óxido Ferroso y Aglutinante para Crear Pastillas Absorbentes. ...	41
Conclusiones Parciales del Capítulo II.	42
Capítulo III - Diseño de un filtro para la eliminación del H₂S en el biogás.	44
3.9- Cálculo y Diseño del Filtro de Biogás.	44
3.9.1- Cálculo de la Masa de Fe ₂ O ₃ Necesaria para 365 Días de Operación a Partir del Volumen de Biogás Producido.	44
3.9.2- Cálculo de la Masa de Fe ₂ O ₃ Necesaria para 365 Días de Operación a Partir de Presiones de Trabajo y Masas Molares.	46
3.9.3 - Comprobación de Resultados.	48
Aplicando el metodo 3.9.1 a los datos del metodo 3.9.2.	48
3.10- Cálculos de la Torre del Filtro de Biogás.	49
3.11- Proceso de Transformación de la Viruta en Fe ₂ O ₃	50
3.12- Descripción del Filtro.	54
3.13- Proceso de Filtración:	54
3.14- Materiales de los que se Puede Fabricar el Filtro.	55
3.14.1- Filtro hecho de Plástico PVC.	55
3.14.2- Filtro hecho de Acero Inoxidable.	55
3.15- Tecnología de Fabricación del Filtro.	55
3.15.1- Conformar la Sección Media.	57
3.15.2 - Conformar la Sección Inferior.	59
3.15.3 – Conformar la Sección Superior.	60
3.15.4 - Montaje del Filtro.	62
3.15.5 – Puesta en Funcionamiento.	63
3.16- Predeterminación del Costo de Fabricación del Filtro.	63
3.17 – Características Técnicas Esperadas para el filtro.	65
Conclusiones parciales del Capítulo III:	65
Conclusiones generales:	66
Recomendaciones:	67
Referencias bibliográficas:	68
Anexos:	70
Tabla 11.	70
Figuras	72
Figura 16.	72
Figura 17.	74
Figura 18.	75
Figura 19.	77

Introducción

El deterioro del medio natural es, en buena parte, una consecuencia derivada de la acción desmesurada y descontrolada de los sistemas económicos y productivos vigentes a lo largo del presente siglo. Es evidente que la relación existente entre la degradación del medio ambiente y el modelo de desarrollo territorial y económico dominante, en muchos aspectos, se han manifestado claramente insostenibles. En este sentido, los poderes públicos han de garantizar, y la sociedad en su conjunto ha de reclamar, una acción medio ambiental integradora y globalizadora que tenga en cuenta y coordine todas las políticas y actividades públicas. A partir de aquí, se podrá avanzar en la estrategia necesaria para alcanzar, conjuntamente con el equilibrio económico y social, la sustentabilidad de este mundo de todos.

Por otro lado la demanda de energía aumenta día a día en todo el mundo, las energías fósiles (Petróleo, carbón, etc.) con las se tratan de cubrir esta demanda se agotan y no se renuevan, es necesario un nuevo enfoque. En Cuba la introducción y desarrollo de fuentes renovables de energía es un aspecto importante de la política energética que se ha trazado. Esto ha volcado el interés de la comunidad científica en general a las posibilidades que brinda la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos. El desarrollo global y la difusión de los digestores de biogás inició en la década de 1970, y hoy en día existen probablemente más de 30 millones de plantas de biogás en todo el mundo, la mayoría de ellas pequeños sistemas en áreas rurales. Las plantas de biogás, como tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos, se han ido extendiendo a diversos sectores productivos del país, especialmente en el sector campesino; sin embargo, las malas prácticas y la ausencia de filtros para tratar el biogás correctamente o la implementación de técnicas incorrectas e incluso de elaboración puramente empíricas y sin respaldo científico, han desencadenado una serie de contratiempos en el uso de esta tecnología. Dado a que en el biogás se encuentran presentes gases no deseados como el H_2S , con un efecto corrosivo, tóxico y contaminante, y planteándose la necesidad de su eliminación mediante el filtrado, surge el problema científico del presente trabajo.

Problema de investigación

¿Cómo eliminar el (H_2S) presente en el biogás hasta reducirlo a niveles seguros mediante la aplicación de un método de filtrado?

Hipótesis

El diseño de un filtro basado en el método de adsorción con materiales secos contribuirá a la eliminación del (H_2S) presente en el biogás.

Objetivo General

Proponer el diseño de un filtro para la eliminación del H_2S en el biogás.

Objetivos Específicos

1. Evaluar el estado actual y tendencias en el uso del biogás.
2. Realizar una búsqueda bibliográfica acerca del proceso de purificación del biogás.
3. Diseñar un filtro para la eliminación del H_2S en el biogás.

Capítulo I - Estado actual y tendencias en el uso del biogás.

1.1- Definición de biogás.

El biogás es un 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 (esto es, en un ambiente anaeróbico). Este gas se ha venido llamando gas de los pantanos. El biogás se obtiene de desperdicios orgánicos, puesto que en ellos se produce una biodegradación de residuos vegetales semejante a la descrita.

La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo útil de tratar residuos biodegradables, ya que produce un combustible valioso, además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico.

El resultado es una mezcla constituida por metano, dióxido de carbono, pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y H_2S . El biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 mega julios por metro cúbico (MJ/m^3). (Ortega, 2013).

Este gas, adecuadamente depurado, se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas, y también para producir calor en hornos, estufas, secadores, calderas, calefacción u otros sistemas debidamente adaptados.

1.2- Composición y características del biogás.

La composición química del biogás depende primordialmente de dos factores: los materiales empleados en la digestión y la tecnología utilizada para el proceso. Teniendo eso en cuenta, el biogás puede contener entre 50 - 60% de metano, 30 - 40% de dióxido de carbono y < 5% trazas de otros gases como hidrógeno H_2 (0 – 3 %), nitrógeno N_2 (0 – 3 %) y H_2S (0.1 – 0.5 %). (considerados impurezas). (Becerra, 2017)

Entre sus características el biogás posee un poder calorífico entre 5000 – 6000 Kcal/ m^3 , su equivalente en combustible es de 0,6 - 0,65 L de petróleo por metro cúbico de biogás. Temperatura de ignición de 650 a 750°C. Presión crítica de 74 a 88 atmósferas. Temperatura crítica de -82,5°C. Densidad de 1,2 kg/ m^3 . Masa molar de 16,043 g/mol. (Becerra, 2017).

La energía térmica del biogás es de 5000 – 6000 Kcal/ m^3 . La alta densidad de los gases como CO_2 y H_2S existentes en el biogás produce corrosión por lo que el biogás debe ser filtrado antes de su uso. (Becerra, 2017). En el biogás, el metano (CH_4) es el gas principal, su formación en el biogás convierte a este en un combustible de alta calidad. La energía térmica principal del biogás nace de la combustión del metano, los demás gases son impurezas, estas impurezas afectan las características

y calidad del biogás, particularmente el CO₂ y el H₂S.

Tabla 1.

Componentes del biogás.

Porcentaje (%) de acuerdo al volumen	Tipo de gas
50-60	Metano (CH ₄)
30-40	CO ₂
0- 0,1	CO
0,5-3	Nitrógeno (N ₂)
1-3	Hidrógeno (H ₂)
0-1	Oxígeno (O ₂)
0,1-0,5	(H ₂ S),NH ₃ ,C _n H ₂
0,1- 0,2	Vapor de Agua

Fuente: (Tutacano, 2017).

En la siguiente tabla, se reportan los rendimientos de las materias orgánicas más usadas en nuestro país como materias primas en el proceso de Digestión Anaeróbica.

Tabla 2.

Rendimientos promedios de los sustratos más utilizados en nuestro país como materia prima en los procesos de digestión anaeróbica para la producción de Biogás.

Sustratos	Productividad (m ³ Biogás / kg sustrato)	Cantidad de Metano (%)	Tiempo de Retención (días)
Excreta bovina	0.23 – 0.20	58	30
Excreta avícola	0.46 – 0.54	60	30 – 35
Excreta de cerdo	0.69 – 0.76	60	30 – 35
Hojas forrajeras	0.10 – 0.50	55	50
Cachaza	0.30 – 0.35	64	25 - 30
Vinaza de destilería	0.50 – 0.80	68	3 - 4

Residual de torula	0.45 – 0.70	65	3 - 4
--------------------	-------------	----	-------

Fuente: (García B, 1985).

Una planta de biogás suministra energía y abono, mejora las condiciones higiénicas y protege al medio ambiente. Pero solo si está bien diseñada y construida, y se ubican en aquellos lugares, donde como tecnología pueda llegar a formar una parte integrante del conjunto de vida de la empresa, granja o comunidad donde se aplique.

Aunque la generalización de esta tecnología, nunca superará el 5% de las necesidades energéticas de un país, si constituye una solución 100% efectiva para empresas, granjas agropecuarias, escuelas, comedores obreros y pequeñas comunidades rurales. Pero para ello, hay que cumplir con la disciplina tecnológica requerida para lograr el éxito de su implantación.

Obras de Biogás de gran escala están desarrollándose fuertemente en los países europeos para procesar desperdicios a nivel concentrado, los modelos ejemplares tienen formas de cilindros y otras formas especiales con volumen de desintegración de miles de metros cúbicos para procesar desperdicios de criaderos, de industria alimentaria, de procesamiento frutal, y láctea. El biogás se utiliza como material en la producción de electricidad, contribución de energía termal (para cocinar y calentar). Las obras modernas, montadas y utilizadas en grandes granjas oscilan en más de 2000 obras.

La descomposición anaeróbica se aplica ampliamente en el mundo. Los medios anaeróbicos grandes y concentrados (pertenecientes a las granjas criadoras y las empresas de procesamiento alimentario), que descomponen una gran cantidad de desperdicios de animales, de origen vegetal, y los provenientes de mataderos, de la industria de procesamiento alimentario, fangos de alcantarillas y desechos orgánicos, han estado funcionando de manera estable, trayendo así una gran eficiencia socio – económica y medio ambiental.

En el presente material pretendemos ofrecer un conjunto de conocimientos básicos que sirva de herramienta teórica a obreros, especialistas y directivos para enfrentar correctamente la aplicación de la tecnología de la digestión anaeróbica, para producir biogás.

1.3- Generalidades del proceso de digestión anaeróbica.

La digestión anaerobia puede definirse como una secuencia de procesos metabólicos que promueve la degradación de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno molecular. Las principales condiciones para que se lleve a cabo son: Ambiente carente de oxígeno (anóxico) y potenciales reductores muy altos (alrededor de -340 Mv).

Figura 1.

Tipos de respiración anaerobia en reactores

Anóxico

Fuente: (Ruiz, 2002).

Es un proceso biológico altamente complejo, desde el punto de vista microbiológico. Se trata de un fenómeno natural, enmarcado en el ciclo anaeróbico del carbono, en el cual es posible, en ausencia total de oxígeno, transformar las sustancias orgánicas en biomasa y compuestos inorgánicos en su mayoría volátiles. Como resultado se obtiene un gas combustible (biogás) y un residuo líquido o sólido que puede ser utilizado como abono orgánico.

Es ampliamente utilizado para producir energía y purificar (estabilización) residuales que contienen una alta concentración de materiales orgánicos biodegradables, ejemplo: residuales albañales domésticos, estiércol y puede extenderse a residuales de fuerza elevada provenientes de varias industrias. La digestión anaerobia de materiales orgánicos a metano es efectuada por la acción combinada de una amplia variedad de bacterias. Seis procesos o reacciones pueden ser observados aquí:

- 1) Hidrólisis de los polímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos).
- 2) Fermentación de Aminoácidos y azúcares.
- 3) Oxidación anaerobia de largas cadenas de ácidos grasos.
- 4) Oxidación anaerobia de ácidos grasos volátiles a acetato.
- 5) Formación de metano a partir del acetato.
- 6) Formación de metano a partir del hidrógeno y el dióxido de carbono.

1.4- Etapas de la producción de biogás.

El proceso de producción de biogás mediante digestión anaeróbica de la materia orgánica se divide en cuatro etapas. Así lo han demostrado estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta la actualidad. (Ortega, 2013).

➤ Etapa I: Hidrólisis.

Por lo general las bacterias son no hábiles o impotentes para tomar partículas de material orgánico, y por lo tanto estos contaminantes orgánicos deben ser licuados o solubilizados a polímeros o monómeros de bajo peso molecular los cuales pueden atravesar las barreras celulares para poder ser metabolizados. (Ortega, 2013).

Esta licuefacción ocurre a través de la acción de las exo- enzimas de las bacterias hidrolíticas. De acuerdo al tipo de acción de las exo- enzimas de las bacterias hidrolíticas aisladas de digestores

anaerobios, así como de poblaciones del rumen, estas bacterias pueden ser clasificadas en lipolíticas, proteolíticas y bacterias celulíticas. Se estima que una población de 10^8 a 10^9 bacterias hidrolíticas por mililitros, han sido reportadas en digestores mesofílicos de lodos albañales. La velocidad de licuefacción está determinada por la composición química del sustrato, (es decir su biodegradabilidad) y la naturaleza física (tamaño y la porosidad de las partículas separadas, la accesibilidad por las enzimas así como por los factores ambientales, en particular la temperatura). (Ortega, 2013).

➤ **Etapla II: Acidogénesis.**

Los productos de la hidrólisis (ácidos grasos de cadenas largas, azúcares y alcoholes) son metabolizados intracelularmente por bacterias hidrolíticas y no hidrolíticas. Los principales productos de la acidogénesis por cultivo mezclados son acetato, propionato, butirato, H_2/CO_2 . En menor cantidad formiato, lactato, valerato, metanol, etanol, butanodiol o acetona pueden ser producidos por bacterias fermentativas. Debido a que los ácidos grasos volátiles son el mayor producto de la fermentación de estas bacterias ellas son denominadas bacterias acidificantes o acidogénicas. Entre sus características esta que son resistentes a valores de pH bajos. La formación de ácidos puede ser producida a valores de pH tan bajos como 4. (Ortega, 2013).

➤ **Etapla III: Acetogénesis.**

Las bacterias acetogénicas productores de hidrógeno son responsables o necesarias para la oxidación de los productos finales de la acidogénesis a substratos hábiles para la metanogénesis. Debido a que las reacciones de oxidación de las bacterias acetogénicas producen H_2 son termodinámicamente desfavorables a menos que la presión parcial de hidrógeno se mantenga por debajo de 10^{-3} atm. Las bacterias acetogénicas deben estar obligatoriamente acopladas a bacterias que utilicen el hidrógeno tales como las metanógenas o sulfato reductoras, de manera que entre ellas existe una asociación sintrófica. (Ortega, 2013).

➤ **Etapla IV: Metanogénesis.**

Es la etapa final de la conversión anaerobia de materiales orgánicos a metano y CO_2 y es catalizada por bacterias metanogénicas. Las metanógenas solo utilizan un número limitado de sustratos simples, tales como: acetato o compuestos que contengan un grupo metilo, formiato, metanol y CO. Estas bacterias pueden ser clasificadas en dos grupos: Las que convierten el acetato o acetoclásticas y las que utilizan el hidrógeno o hidrogenofílicas. La velocidad de crecimiento de las bacterias acetoclásticas es baja. Esta es la razón por la cual los sistemas de tratamientos anaerobios requieren un elevado tiempo de retención de la biomasa. Generalmente, 70 – 80% del metano formado a partir de los materiales orgánicos son originados a partir del acetato. El resto es mayormente derivado a

partir del H_2 y CO_2 . Las bacterias hidrogenófilas tienen una elevada velocidad de crecimiento máximo comparado con las bacterias acetoclásticas. Estas no son consideradas un grupo crítico, sin embargo la habilidad de estas bacterias de mantener la presión de hidrógeno muy baja forma las bases para las condiciones termodinámicas favorables para que proceda una esencial etapa de conversión de sustrato premetanogénesis.

Sin embargo, el proceso de degradación no es una secuencia de reacciones independientes, que está caracterizada por un complejo de interacciones mutuas entre diferentes especies microbianas. Este proceso puede ser agrupado en cuatro etapas las cuales se producen consecuentemente durante el proceso de degradación anaerobia de materiales complejos: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. (Ortega, 2013).

En esta etapa se produce el H_2S por un grupo de bacterias que transforman el dimetilsulfuro en CH_4 , CO_2 y H_2S . Esta subcategoría es llamada Metanogénesis metilotrófica. (Weber, 2012)

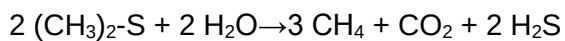
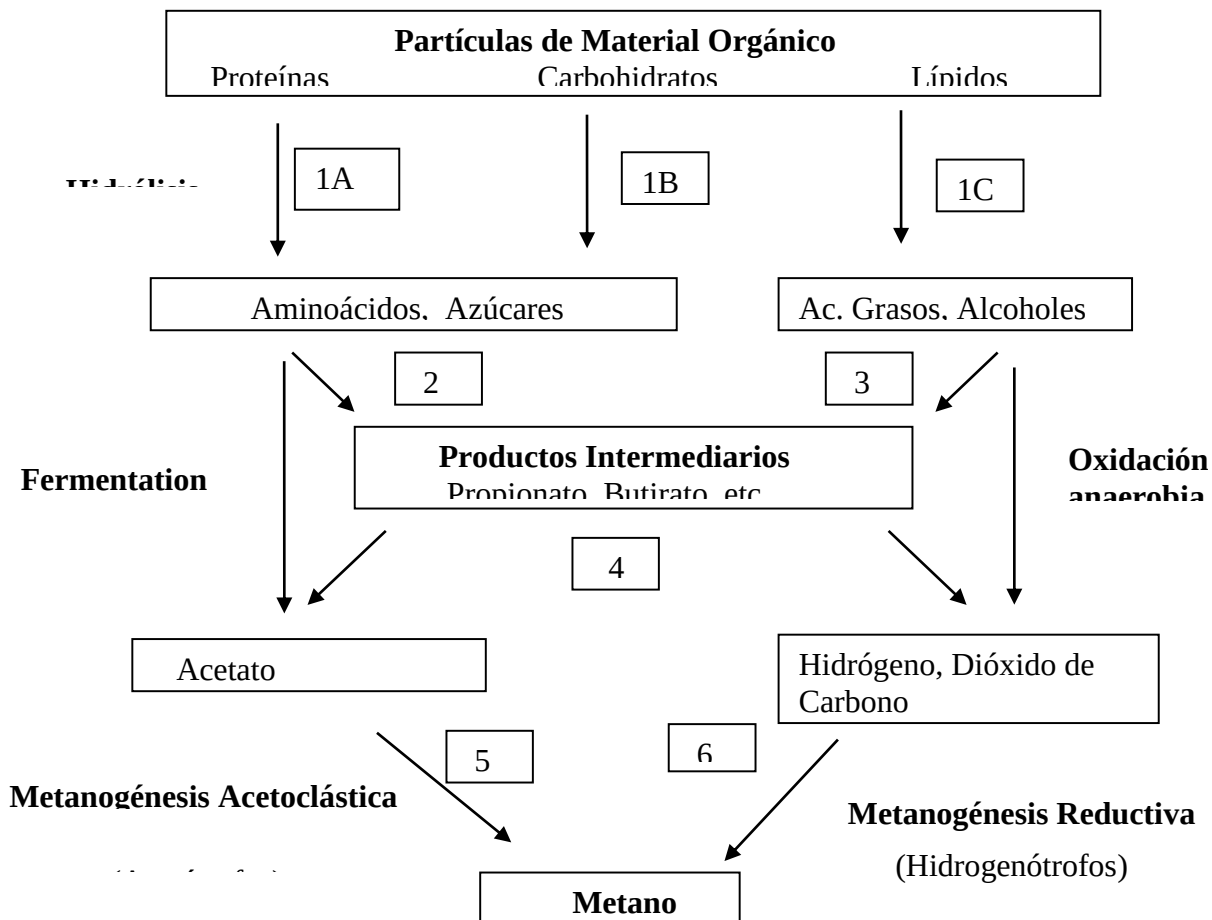


Figura 2:

Esquema del proceso de digestión anaeróbica.



Fuente: (García, 2012)

1.5 - Factores que Afectan a la Digestión Anaerobia.

Diferentes parámetros físicos y químicos siempre están presentes en los procesos anaerobios; siendo los factores principales que influyen en el proceso, los siguientes (Montalvo M. 2000):

- Composición del residual.
- Someter el proceso a cargas orgánicas y tiempos de retención hidráulica y celular compatibles con el residuo a ser digerido y con el tipo de digestor empleado.
- Temperatura: No ocurrencia de variaciones bruscas de temperatura. Se encuentra un óptimo de funcionamiento alrededor de los 35 °C.
- Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6, que se logra a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes.
- Contenido en sólidos: se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10 % de sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- Nutrientes: para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- Existencia de cantidades de nitrógeno (N) y fósforo (P) en el residuo, compatibles con la cantidad de carbono

1.5.1- Relación C/N (balance de nutrientes)

Existe una amplia diversidad de criterios acerca de cuál es la relación óptima que debe existir entre la materia orgánica a degradar (carbono) y la cantidad de los principales macronutrientes en un proceso anaerobio, dependiendo ésta en gran medida del tipo de sustancias de que esté compuesto el residuo. Como regla general, se plantea que el contenido C:N:P debe ser cercano a 100:1.75:0.25 en base a la Demanda Química de Oxígeno (DQO). En muchas ocasiones, se puede lograr un buen balance mezclando diferentes residuos. Si el nitrógeno está en exceso puede producirse mucho amoníaco lo cual puede inhibir el proceso anaerobio por encima de ciertos niveles (3 kg./m³). Sin embargo, existen algunos trabajos donde se reportan algunas concentraciones tolerantes de 4 a 9 kg/m³ de nitrógeno en procesos anaerobios (Ruiz, 2002)

Los microorganismos siempre consumen estos elementos, debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana. La relación C/N debe estar comprendida entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 20-30/1. Así como además requiere algunos minerales como nutrientes.

1.5.2- Efecto del pH

Los efectos del pH se reflejan en la actividad enzimática de los microorganismos. Las formas generales en que el pH influye en la actividad microbiana pueden resumirse en las siguientes:

- Cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas (grupos carboxilos y aminos).
- Alteración de los compuestos no enzimáticos del sistema (ionización del sustrato, desnaturalización de la estructura proteica de la enzima).

A estos efectos del pH deben adicionarse la concentración de H^+ que influye sobre las diferentes reacciones químicas, bioquímicas y biológicas que ocurren en este sistema. Se plantea en general que el valor óptimo de pH para la digestión anaerobia es 7. En la práctica se ha visto que al alejarse de este valor, la eficiencia del proceso disminuye. (Ortega, 2013).

1.5.3- Efecto de la Temperatura

Este parámetro influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él depende mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico, la composición del biogás debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura y el daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores de ésta. Se han definido dos rangos de trabajo donde puede efectuarse satisfactoriamente la anaerobiosis de aguas residuales. Ellos son los siguientes (Montalvo M. 2000):

- Mesofílico entre 20 y 45 °C.
- Termofílico entre 45 y 60 °C.

La temperatura óptima en cada uno de estos rangos es difícil de predecir, ya que depende del tipo de residual, de las condiciones ambientales, etc. No obstante, se reconocen en general como temperaturas óptimas las de 35 y 55 °C para los tratamientos mesofílicos y termofílicos, respectivamente

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura, su velocidad de reacción depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios

Tabla 3:

Temperaturas de trabajo de los organismos anaerobios:

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrofílica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: (Montalvo M. 2000)

1.6- Biodigestores; Partes de un Biodigestor Anaeróbico:

Un biodigestor es un reactor, en el cual ocurre el proceso de transformación del sustrato o materia, por acción de los microorganismos, en ausencia total de oxígeno. Al mismo se alimenta una mezcla de materia orgánica, agua y materia complementaria (si es necesario) en las proporciones requeridas, para garantizar una buena producción de biogás. (Zúñiga, 2007).

El digestor debe reunir condiciones que garanticen el funcionamiento correcto del proceso antes mencionado, tales como:

- Garantizar una correcta hermeticidad, evitando fugas de gases o líquido fermentado.
- Seguridad contra fuegos y explosiones.
- Permitir la recolección de los gases producidos.
- Permitir la agitación parcial o total del sustrato en fermentación.

Las partes esenciales de un digestor, en concordancia con las exigencias que debe cumplir para su correcta explotación son:

1.6.1- Sistema de Entrada de la Materia (Sistema de Carga):

Su función es permitir la alimentación del digestor. La misma en algunos casos está diseñada de manera tal que permite la homogenización del material de carga, donde a la vez se pueden realizar las pruebas de control de sólidos totales y pH del sustrato; de lo contrario, debe existir un tanque de mezcla donde se mezcla el material de fermentación con agua y se eliminan impurezas que pueden obstruir la planta. (Becerra, 2017).

1.6.2- Cámara de Digestión:

Esta es la parte fundamental de un sistema de digestión o fermentación, en ella tienen lugar los procesos bioquímicos para la transformación de la carga y la obtención del biogás. Pueden ser de ladrillos, hormigón, hormigón armado, plástico u otro material que brinde las condiciones requeridas de resistencia. (Zúñiga, 2007).

1.6.3- Cámara de Gas o Gasómetro:

Es la parte del sistema encargada de acumular el biogás producido durante la fermentación, por lo que debe construirse sobre todo a pruebas de fugas.

Los gasómetros pueden ser:

- De cúpula fija: El gasómetro es parte integral de la cámara de digestión y la presión se mantiene por la misma liberación del biogás durante la fermentación, con el correspondiente desplazamiento del líquido de fermentación.
- Gasómetros de depósitos flotantes: El gasómetro puede estar instalado exterior del digestor sobre un lecho de agua (se pintan de color claro) o se puede instalar directamente sobre el digestor (se pintan de azul oscuro o negro) o sea; puede ser externo o interno.
- Gasómetros de caucho o material plástico: El biogás se recoge en una bolsa plástica, tiene el inconveniente de una presión irregular, lo cual influye negativamente sobre la utilización del biogás. Este tipo de gasómetro se puede insertar directamente sobre el digestor.

1.6.4- Sistema de salida del efluente (sistema de descarga):

La función de esta es garantizar la descarga de los lodos digeridos para su posterior utilización. Debe estar por debajo del sistema de carga, para garantizar la salida del material por diferencia de presión hidráulica. (Becerra, 2017).

1.6.5- Sistema de eliminación de agua del biogás:

El biogás producido y almacenado tiende a tener un elevado contenido de vapor de agua que por condensación forma gotas que tienden a depositarse en los puntos más bajos de las tuberías de conducción de gas. Con el tiempo la cantidad de agua condensada aumenta, llegando a dificultar y en ocasiones a impedir el flujo normal de circulación del biogás. Por ello es necesario eliminar esta agua condensada de las tuberías y se logra colocando un drenaje o una trampa de agua en la parte más baja de la tubería. (Becerra, 2017).

1.6.6- Sistema de control de presión:

Permite al usuario conocer en todo momento cuál es la acumulación de gases en el interior del tanque, y liberarla en caso necesario. En los biodigestores domésticos, el sistema de control puede ser un manómetro y una válvula manual para emergencias; mientras que en los biodigestores industriales el proceso puede ser más complejo y automático, permitiendo en algunos casos vigilar y liberar la presión a distancia. (Becerra, 2017).

1.6.7- Válvula de seguridad:

Es una medida de control adicional. Permite soltar los gases de forma automática cuando el usuario

no está vigilando, y se diseña para activarse al alcanzar una presión máxima. (Becerra, 2017).

1.6.8- Sistema de salida de gas:

Consta de una válvula de control que permite regular el caudal del biogás que sale. (Becerra, 2017).

1.6.9- Sistema de purificación o filtración del biogás:

Este sistema garantiza el acondicionamiento del biogás para su uso posterior.

- Eliminación del H_2S : De los elementos del biogás, el de mayor problema para la utilización es (H_2S) por su alto poder corrosivo. La no eliminación del mismo provocará un deterioro rápido de todas las instalaciones, con las correspondientes pérdidas económicas. El filtro más sencillo que se conoce para el sulfuro de hidrógeno es a partir de limallas de hierro puestas en capas y separadas por virutas de madera. Este puede ser renovado cambiando el material filtrante o haciendo pasar aire caliente a contracorriente por el mismo.
- Eliminación del dióxido de carbono: Se realiza con el objetivo de facilitar el proceso de compresión y embotellado del biogás. El contenido de CO_2 se puede eliminar utilizando una solución de agua de cal (1.8 kg de CaO en 1000 l de agua para eliminar 560 l de CO_2). Esta solución no es factible para ser utilizada a gran escala debido al gasto excesivo de reactivos y acumulación de subproductos.

Otra vía para eliminar CO_2 , es utilizando sosa cáustica (11.5 kg en 1000 l de agua para eliminar 3200 l de dióxido de carbono). Este proceso no es rentable por el alto valor de la sosa, además de que puede provocar graves quemaduras en su manejo. Se utiliza a escala de laboratorio. Existe otro método aplicado en Brasil, el cual consiste en hacer pasar por una torre de agua fría a presión, el biogás a contracorriente, la presión de entrada del biogás es de 5 kg/cm^2 , las dimensiones de la torre empleada son 3.5 m de alto por 0.2 m de diámetro. (Becerra, 2017).

1.7- Tipos de Digestores. Clasificación.

Tipos de Biodigestores se acuerdo con las dimensiones del dispositivo, el tipo de residuos que se procesan y la cantidad de biogás que se produce, los biodigestores pueden clasificarse en doméstico, comunitario e industrial. (Becerra, 2017).

1.7.1- Los Biodigestores Domésticos

Son generalmente utilizados por una familia en su vivienda o en pequeños comercios donde se

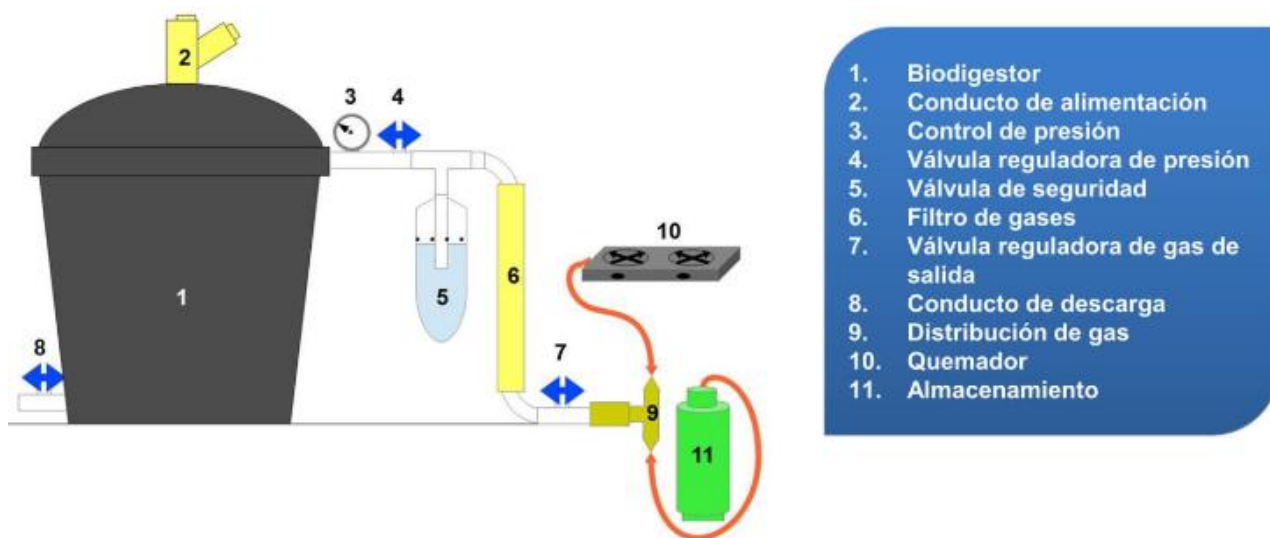
procesan alimentos. Se utilizan principalmente para cocinar, proveer de calefacción, agua caliente o iluminación. Los residuos procesados son los generados en la misma vivienda, alimentos, agrícolas, (restos de cosecha), ganaderos y estiércol animal pueden construirse o adquirirse de forma comercial, y suelen ser fáciles de utilizar, de bajo costo y con mínimos requisitos de mantenimiento. Adicionalmente, el gas puede utilizarse para iluminación (lámparas), calentar agua o proveer calefacción. Un biodigestor de menos de 16 m³ de capacidad es suficiente para abastecer las necesidades diarias de una familia rural. (Becerra, 2017).

1.7.2- Los Biodigestores de Tipo Comunitario

son utilizados por pequeñas poblaciones, instituciones educativas, hospitales, etc. En corregimientos de menor tamaño y áreas rurales es habitual que se ubiquen entre varias viviendas cercanas, las cuales generalmente combinan sus residuos para obtener una mayor eficiencia. (Becerra, 2017).

Figura 3.

Esquema básico de un biodigestor doméstico



Fuente:(Becerra, 2017).

1.7.3- Los Biodigestores Industriales

Se emplean en operaciones y procesos especializados (por ejemplo producir vapor en una caldera), como generación combinada de calor y electricidad, o combustible de transporte, entre otras aplicaciones. Dependiendo del uso, en ocasiones es necesario purificar el biogás, es decir, eliminar aquellos componentes diferentes al metano, con el fin de mejorar su rendimiento. Este tipo de mecanismos suelen encontrarse, en rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales,

industrias procesadoras de alimentos o grandes instalaciones agrícola . En algunos casos son utilizados solo como medio de reducción de gases efecto invernadero, es decir, el biogás generado se quema sin aprovechamiento energético. (Becerra, 2017).

Los residuales empleados en el proceso de fermentación anaeróbica pueden clasificarse en dependencia del tipo y la cantidad de sólidos que contengan en:

- Residuales de alta carga de sólidos sedimentables.
- Residuales de bajo contenido de sólidos sedimentables.

Atendiendo a este criterio existen diferentes tipos de digestores para transformar uno u otro tipo de residual y los mismos se dividen en dos grandes grupos: Digestores convencionales y Digestores de alta carga.

1.8- Digestores Convencionales:

Estos tipos de digestores son los que más se han desarrollado en la condiciones de Cuba. Fueron los primeros que surgieron para el tratamiento de residual agrícola fundamentalmente. Se caracterizan por tener largos tiempos de retención y velocidades bajas de transformación del sustrato, en comparación con los otros tipos de digestores.

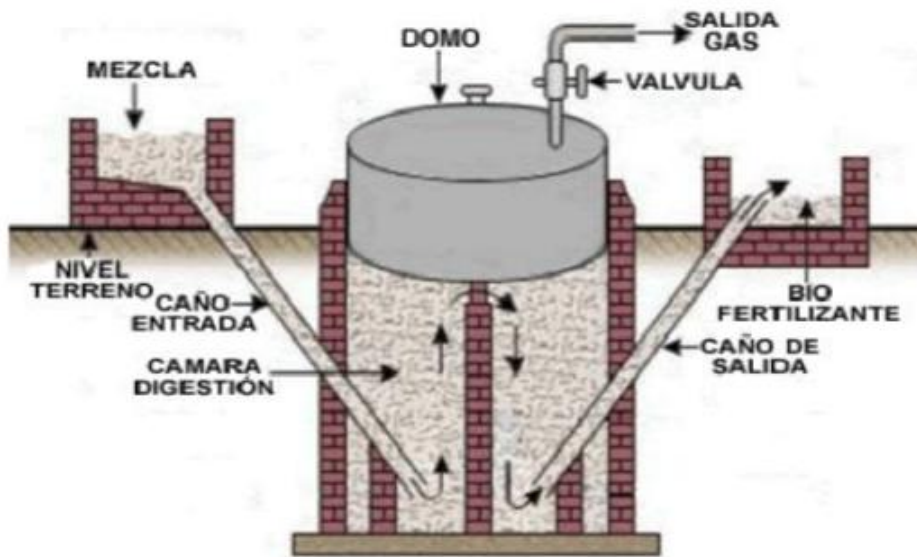
Existen dos variantes convencionales: Digestores de baja velocidad y Digestores de alta velocidad.

1.8.1- Digestores de Baja Velocidad (Hindú, Horizontal y Chino).

Son los más tradicionales, operan en el nivel mesofílico y no emplean mezclado, debido a esto su contenido se encuentra estratificado, por lo que se requieren tiempos de retención largos (30-60 días).

Figura 4.

Biodigestor tipo hindú.



Fuente: (Zúñiga, 2007)

Es uno de los modelos más utilizado en la región oriental de Cuba. Existen varios diseños en dependencia de la forma y posición del gasómetro. Por lo general, son verticales y cilíndricos, semejantes a un pozo; en su parte superior flota una campana y su diseño permite adicionar pesos sobre la misma, según la presión que se necesite. La campana suele estar fabricada en metal o fibra de vidrio, y se necesita un poste guía o unos raíles laterales para guiar su movimiento. (Zúñiga, 2007).

- Ventajas.

Operación simple y fácil de entender. El volumen de gas almacenado de gas es visible directamente. La presión del gas es constante, determinada por el peso del recipiente de gas.

- Desventajas.

Las desventajas son los altos costos de los materiales para el tambor de acero, la susceptibilidad a la corrosión de las partes de acero, por lo que la vida útil de la planta es más corta

Digestor horizontal.

Son muy utilizados en la región central de Cuba. Estos diseños son horizontales, generalmente rectangulares o cilíndricos. Pueden tener campana flotante en su interior (gasómetro interno) o fuera del digestor (gasómetro externo), en algunos casos son acoplados a un sistema de compresión. Se construyen de ladrillos o de bloques de hormigón macizados, pudiéndose utilizar otros materiales

comunes en la región donde se construyan. Se construyen en los lugares donde el manto freático es por profundo.

Figura 5.

Digestor horizontal

Fuente: (Zúñiga, 2007)

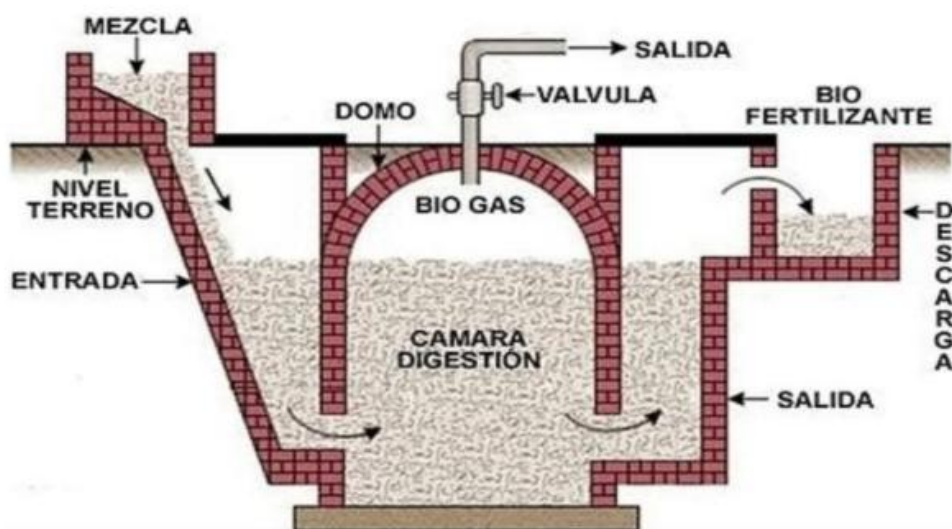
Chino:

En la región occidental de Cuba existen digestores de este modelo, de diferentes capacidades. Son enterrados, pueden ser redondos y achatados o redondos, se recomienda construirse con ladrillos de alta calidad.

Poseen menor eficiencia que los de tipo hindú, pero son buenos productores de abono, ya que la materia a degradar está mayor tiempo dentro del digestor. (Zúñiga, 2007).

Figura 6.

Biodigestor tipo chino.



1.8.2- Digestores de Alta Velocidad (CSTR):

A diferencia de los digestores de baja velocidad, emplean mezclado continuo y 2 etapas con recirculación de lodos en la mayoría de los casos. La primera etapa constituye el verdadero digestor de alta velocidad con agitación continuada, el segundo puede ser un digestor de baja velocidad y su objetivo es separar el biogás de la fase líquida y de los lodos. La recirculación de lodos permite aumentar el tiempo de residencia de estos, lo que posibilita reducir los tiempos de retención.

1.9- Digestores de Alta Carga:

Se han desarrollado específicamente para el tratamiento de residuales líquidos de elevado contenido de materia orgánica. Con estos residuales se confrontan dificultades (total o parcial) para su tratamiento por fermentación aeróbica, como son:

- Se requieren varias etapas de tratamiento aeróbico altamente eficientes, para lograr efluentes de buena calidad, lo que implica elevado costo de inversión y operación.
- La producción de sólidos a partir del tratamiento aeróbico es elevada lo que encarece aún más el tratamiento.
- Casi nunca poseen un balance nutricional adecuado.

La digestión anaeróbica de solución a estas dificultades, principalmente por ser un proceso más económico, energéticamente más favorable, capaz de minimizar la producción de lodos y con requerimientos nutricionales menos rigurosos.

A pesar de estas ventajas su aplicación a líquidos estuvo limitada durante muchos años, esto se debió fundamentalmente a las restricciones de los procesos convencionales para asimilar altas cargas orgánicas, al tener que operar con tiempos de retención altos. (Ruiz, 2002)

A partir de la década del 70 se desarrollaron diversas alternativas de procesos de digestión, con el objetivo primordial de poder reducir los tiempos de retención y posibilitar así la operación con cargas orgánicas elevadas, entre ellas tenemos:

1.10- Alternativas de procesos de digestión.

Digestor de Filtro Anaeróbico: Retiene gran parte de la población bacteriana en la matriz del filtro, evitando su dilución y en consecuencia reduciendo los tiempos de retención hidráulica. En ellos la producción de metano es de $5 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ digestor día}$, son capaces de operar a cargas orgánicas entre $2 - 5 \text{ kg DQO}/\text{m}^3\text{d}$, garantizando remociones de 80 - 90 %. La matriz de este filtro es una superficie porosa por donde pasa el líquido a contracorriente y se queda el microorganismo, puede ser polietileno u otro material inerte. Presenta algunas dificultades:

- (a) Se producen canalizaciones en la empaquetadura producto al escape de las burbujas de gases, lo que da lugar a que el residual fluya por estos canales.
- (b) En el tratamiento de residuales con un alto contenido de sólidos suspendidos, el riesgo de tupición es alto, siendo solo adecuado para residuos solubles y bastantes diluidos.
- (c) El costo de inversión es relativamente alto, en comparación con otras variantes desarrolladas como el Digestor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) del inglés Up flow Anaerobic Sludge Blanket)

Digestor de Flujo Descendente y Película Fija:

Constituye la tecnología más avanzada para el tratamiento de residuos con fuerte carga de DQO y hasta 3 kg/m^3 de sólidos en suspensión. Se basan en la inmovilización de las células microbianas participantes en el proceso, sobre soportes inertes que pueden estar fijos (película fija anaerobia) o sobre partículas en movimiento (cama expandida anaerobia). Comparados con los procesos convencionales son mucho más eficientes, la ventaja fundamental viene dada en los casos en que se hace difícil aclimatar el lodo como en los UASB. Su desventaja radica en la necesidad de utilizar recirculación en el caso de los de cama fluidizada y en la necesidad de utilizar empaquetadura, en los de cama fija.

Digestor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB).

Se comenzaron a desarrollar a fines de la década del setenta y actualmente existen algunas unidades instaladas a escala industrial. Se basan en la formación de una manta flotante de bacterias en el seno del digestor, que se alimenta de abajo hacia arriba. Esta manta constituye un auténtico filtro en el que se produce la metanogénesis y separa de forma eficiente el gas de la matriz sólida, llega a unos rendimientos de $5 - 10 \text{ m}^3$ de biogás/ m^3 de digestor, en dependencia de la carga orgánica.

Operan con lodos floculentos de alta velocidad de sedimentación y poseen aditamentos muy sencillos en su interior (deflectores) que permiten una eficiente separación de las burbujas de gases y la sedimentación de las partículas que son arrastradas hacia la salida. La no utilización de empaquetaduras resuelve las desventajas de los filtros anaerobios y el separador de gas evita el arrastre de flóculos hacia la tubería de descarga.

Por otra parte, como el lodo no está fijo a ningún soporte, las burbujas de gases realizan un efecto de mezclado que unido a un mezclado mecánico intermitente aceleran el proceso de digestión.

Como desventaja de este proceso se tiene la complejidad para lograr la aclimatación de los lodos, más aún cuando no se dispone de un inóculo procedente de un digestor similar. Este manto puede

lograrse con algunos residuos de la industria azucarera.

1.11- Otras Clasificaciones.

De acuerdo a la manera en que se operan los digestores pueden clasificarse en discontinuos y continuos, en dependencia de la continuidad de abastecimiento de la materia prima:

1.11.1- Digestores Discontinuos.

Reciben toda la carga en una sola operación, realizan el ciclo completo de fermentación y se descargan. Estos digestores se usan fundamentalmente, para procesar materiales de difícil degradación. Se utilizan como materia prima desechos vegetales, naturales o de cosecha, tales como: trigo, maíz, café, entre otros; también se utilizan estiércoles animales. Sean estos materiales, fibrosos, granulosos o menos densos que el agua, en este tipo de digestor no ocasiona inconvenientes. Asimilan hasta 30 % de sólidos totales.

1.11.2- Digestores Continuos.

Son aquellos en los cuales las sucesivas operaciones de carga de material fresco, se realizan sin interrumpir la continuidad del régimen de fermentación. Las tecnologías de digestión continua más representativas pueden agruparse en las tres categorías siguientes:

1.11.3- Digestores de Mezcla Total.

En este grupo se incluyen los digestores convencionales, cuya característica principal es que la biomasa metanogénica se elimina periódicamente a la medida que lo hace el residuo orgánico digerido. Esta mecánica de funcionamiento no permite una alta concentración de bacterias en el interior del digestor y por tanto, la producción de biogás y el índice de descontaminación es reducido. Producción: 1.5 m³ Biogás/m³ Digestor. Índice de descontaminación: < 3 kg DBO/m³ Digestor.

1.11.4- Digestores de "Contacto" o "Reciclado de Lodos".

La mecánica de funcionamiento de estos digestores implica la concentración del efluente digerido, que en parte es recirculado al digestor, con lo que se evita la pérdida de la biomasa microbiana. Su inconveniente es que se dificulta la mezcla en grandes digestores, especialmente cuando la cantidad de sólidos en suspensión es alta. Producción: 2.5 m³ Biogás/m³ Digestor. Índice de descontaminación: hasta 6 kg DBO/m³ Digestor.

1.12- Sistemas Anaerobios Avanzados.

En este grupo se incluye la generación de digestores que se han desarrollado en los últimos años y que tienen como objetivo común aumentar la concentración de la biomasa activa, mediante la aplicación de diferentes mecanismos que le han dado el nombre.

En esta categoría presentan grandes posibilidades de desarrollo a gran escala:

- Digestor de Filtro Anaerobio.
- Digestor de Flujo Descendente y Película Fija.
- Digestor de Flujo Ascendente Anaeróbico con Manto de Lodos.
- Digestor de Lecho Fluidizado.

En dependencia de la forma y estructura pueden clasificarse en los siguientes diseños.

1. Según el almacenamiento de gas:

- Cúpula Fija.
- De Depósitos Flotantes.
- Gasómetro de Caucho o Material Plástico.

2. Desde el punto de vista de su capacidad se dividen en:

- Minidigestores: no mayores de 5 m³.
- Medianos: hasta 100 m³.
- Grandes: son los más tecnificados y utilizan residuos urbanos, industriales.

3. Atendiendo a su forma geométrica pueden ser:

- Verticales.
- Cilíndricos.
- Esféricos.
- Rectangulares.
- Cuadrados.

4. Según su posición con relación a la superficie terrestre pueden ser:

- Superficiales.
- Semienterrados.
- Subterráneos.

5. De acuerdo a los materiales de construcción pueden ser de:

- Ladrillo.
- Mampostería.
- Hormigón.
- Plástico (o caucho).
- Metálicos.

Digestores con tecnología de punta

Una planta de biogás tiene el objetivo de ser eficiente, por lo que en su diseño se deben implementar tecnologías de punta para garantizar una producción sostenible y segura que permita recuperar la inversión en el menor tiempo posible. Se muestra un digestor con calefacción, aislamiento y domo inflable. El domo alberga el biogás que posteriormente es utilizado para generar electricidad en los motogeneradores, cuya potencia de operación es controlada por la presión del gas en el interior del domo o por la altura del domo inflable. A su lado está el contenedor que alberga el motogenerador y una antorcha de emergencia en el techo.

Figura 7.

Digestor de tecnología avanzada



Fuente: (Weber, 2012).

1.13- El biogás en el contexto internacional.

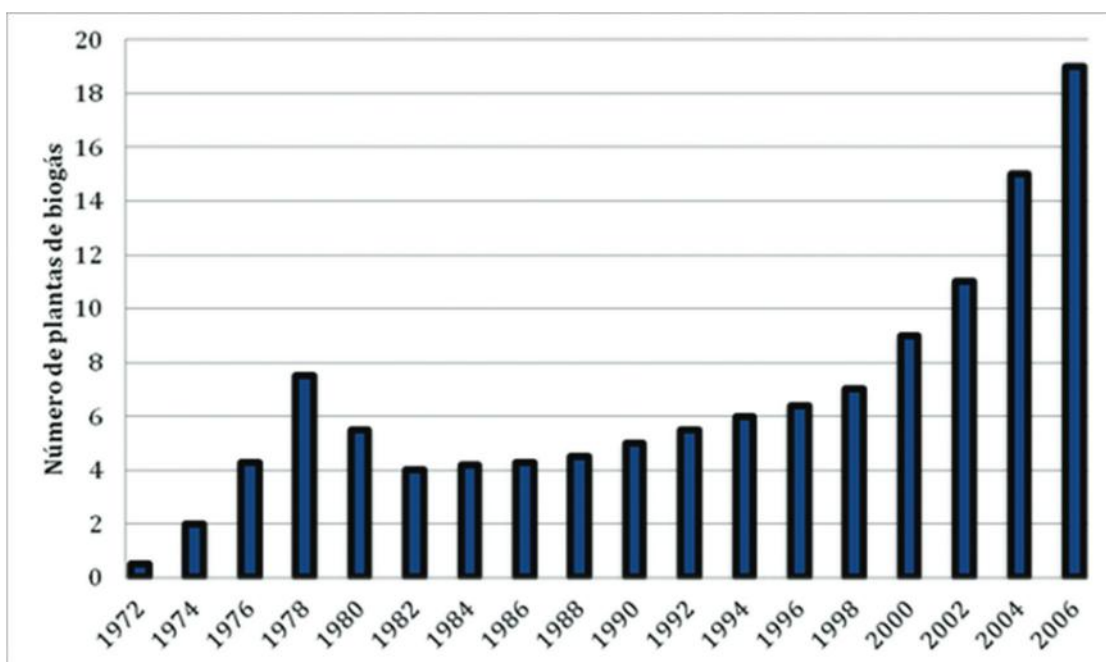
A nivel mundial, el uso del biogás es variante, va desde emplearse como combustible para la cocina, calefacción, electricidad, combustible para los vehículos, hasta utilizarlo como el gas “principal” para ser procesado e introducido en gasoductos de gas natural (Defra, 2010).

Otros usos están relacionados con el empleo de este para hacer metanol y ayudar a prolongar la conservación de frutas y granos por la inhibición del metabolismo de ciertos insectos, hongos y bacterias. (Mae-Wan, 2008).

Las mayores aplicaciones del biogás se han dado en China, India y Europa. China es de los países pioneros en el uso del biogás. Este país perteneciente al continente asiático desarrolló un programa que inició en los años setenta con un resultado de más de 7 millones de digestores, aunque sufrió de varias fallas (Boyle, 2004)

Figura 8.

Expansión de la producción de biogás en China.



Fuente: (Deublein, 2008)

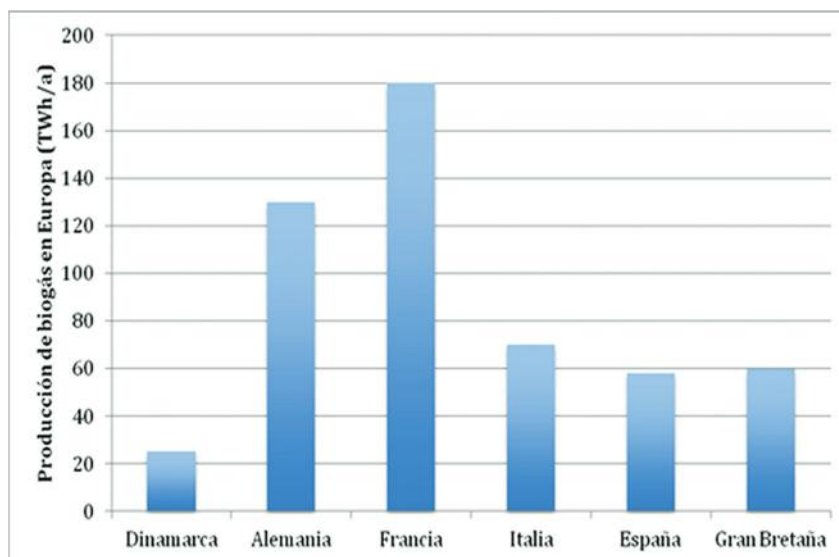
La generación global de biogás ha aumentado rápidamente desde el año 2000. Durante el periodo 2000 - 2014, el crecimiento anual promedio de la producción fue del 11.2%. En 2016, la producción de biogás superó los 60 mil millones de Nm³. Usando un factor de densidad de energía promedio de 21.6 MJ / Nm³ (60% de metano), (UNAM, 2018).

En el periodo 2000 -2016, Europa fue el mayor productor de biogás seguido de Asia y de América. Sin embargo, el crecimiento en Europa y Asia parece haberse desacelerado en los últimos años.

Sin embargo, la producción de biogás a nivel mundial no tiene relación con los países que más emisiones de metano tienen. Los países europeos que tienen mayor producción de biogás son Gran

Breña, Alemania, Francia, Italia, España y Dinamarca. (Weber, 2012).

Figura 9.



Producción de Biogás en Europa.

Fuente: (Weber, 2012).

En América, la producción de biogás no ha aumentado significativamente en los últimos 20 años. África produce solo el 0.03% de la producción mundial. (UNAM, 2018).

El biogás ofrece la oportunidad de obtener energía limpia de los residuos agrícolas y otros desechos y, por lo tanto, aumentar las fuentes de empleo y los ingresos en las zonas rurales. En algunos países, este ha sido históricamente el principal motor del desarrollo en el sector del biogás. (UNAM, 2018). El valor de la industria del biogás se puede atribuir principalmente a tres características del biogás:

Tratamiento de residuo y reciclado de nutrientes. El proceso de generación de biogás ofrece un tratamiento respetuoso con el medio ambiente de una amplia gama de desechos y residuos orgánicos y también facilita el reciclaje de nutrientes. La producción de biogás es una opción energéticamente eficiente y, por lo tanto, atractiva para el tratamiento de aguas residuales y lodos de aguas residuales. Reducción de gases de efecto invernadero (GEI). El proceso de biogás ofrece una solución respetuosa con el ambiente, ya que la producción de biogás a menudo reduce las emisiones de metano del estiércol y los desechos orgánicos. En años recientes ésta ha sido una de las principales fuerzas impulsoras del desarrollo en Europa y en algunos países asiáticos.

1.14- Biodigestores en el Contexto Cubano.

La contribución de Cuba a las emisiones globales de gases de efecto invernadero no rebasa el 0.1%.

No obstante, se han venido realizando esfuerzos importantes en la reducción de las emisiones; creándose las condiciones necesarias para la incorporación de la dimensión climática en la planificación del desarrollo productivo y para transitar hacia un modelo de desarrollo resiliente y bajo en carbono. Particularmente en el sector Energía, se trabaja en el cambio estructural de la matriz energética, impulsado la incorporación de fuentes renovables en la generación eléctrica. La mitigación en las políticas nacionales se considera esencial para el desarrollo sostenible del país. El Consejo de Ministros aprobó, en 2014, la “Política para el Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía”, dirigida a aprovechar al máximo los recursos renovables disponibles a nivel nacional. Para el cumplimiento de esta Política, se indican acciones concretas dirigidas a un desarrollo menos intenso en emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y se implementan de acciones de mitigación en 12 sectores claves del desarrollo: seguridad alimentaria, energía renovable, eficiencia energética, ordenamiento territorial y urbano, pesca, agropecuaria, salud, turismo, construcción, transporte, industria y manejo integral de los bosques. El país incluye en sus acciones de mitigación la producción de biogás, basado en el aprovechamiento de los residuos orgánicos para el uso doméstico y la obtención de bioabonos que remplazan fertilizantes químicos, coadyuvando a la reducción de las emisiones y a la disminución de la contaminación de cuencas hidrográficas y bahías. Aunque en proporciones insuficientes, existen avances promisorios en el uso de esta tecnología, entre ellos, los mostrados como resultado del Programa de Pequeñas Donaciones del (PNUD), que ha creado una capacidad de biodigestión de más de 15 mil metros cúbicos instalados y una producción estimada de más de 6 mil metros cúbicos de biogás por día y transfirió la tecnología para la construcción de un gasoducto de biogás, para la gasificación de 50 viviendas, a partir de la generación de biogás por el tratamiento de residuales de un gran productor de cerdos. (López, 2020).

Cuba cuenta, entre los sectores estatal y cooperativo-campesino, con más de cuatro mil digestores de biogás, instalaciones donde se garantiza la digestión anaerobia para procesar y tratar excretas. Guantánamo fue la provincia precursora en el empleo de esa fuente renovable de energía, a principios de la pasada década de los 80.

En la Unidad Empresarial de Base Porcina (UEBP) “El Colorado” que está ubicada en el municipio Cabaiguán, en la provincia de Sancti Spíritus, y tiene en sus alrededores una comunidad rural, de igual nombre, con 74 viviendas y 232 habitantes. Las fuentes energéticas más utilizadas para cocinar en la unidad productiva y en la comunidad, antes del uso de biogás, eran la electricidad, el diésel (costoso de adquirir) y la leña (de difícil acceso y escasa). Con el uso de estas fuentes de energía, la calidad de vida no era la deseada, debido a las incomodidades por el uso de la leña y el diésel y los gastos excesivos por pago de la factura eléctrica, además de afectaciones en la población como consecuencia del impacto del humo generado en la cocción de alimentos con diésel y leña. En la UEBP se construyeron dos biodigestores de cúpula fija (modelo chino modificado), con 45 y 50 m³ de

digestión, respectivamente. Ambos biodigestores tratan las excretas de 600 cerdos (el 50 % de la masa animal de la UEBP). Los dos biodigestores producen diariamente, en conjunto, 90 m³ de biogás, debido con una alta eficiencia. Esto es posible por mejoras realizadas en su diseño, a la disciplina de operación del sistema y a la dieta que se suministra a los cerdos (alimentos concentrados); sin embargo, la instalación productiva solo consumía diariamente entre 15 y 17 m³, por lo que existía un excedente de 73-75 m³/día. (López, 2020).

Desde finales de la pasada década se implementan experiencias de producción integrada de alimentos y bioenergía, sobre bases agroecológicas, en diferentes provincias cubanas, apoyadas por proyectos internacionales financiados por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y su Programa de Pequeñas Donaciones (PPD), y la Unión Europea. (López, 2020).

Según un estudio realizado en Cienfuegos por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos y la Delegación de Cubasolar en Cienfuegos (Avances y estado actual del biogas en Cienfuegos).

La Sociedad Cubana para la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (Cubasolar) y el Movimiento de Usuarios del Biogás (MUB) en Cienfuegos han apoyado en la provincia el Programa de Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía hasta el 2030 y la Tarea Vida, en particular el Biogás. El objetivo ha sido evaluar los avances de la tecnología del biogás en la provincia de Cienfuegos durante los últimos 10 años. El inventario de los equipos en funcionamiento al cierre de 2019 en fue de 219 equipos, con una capacidad media de 15 m³ de volumen del digestor, se logró un crecimiento exponencial hasta el 2016. A partir de esa fecha el crecimiento ha sido menos intensivo debido al reordenamiento de los productores porcinos. Más recientemente se ejecuta un proyecto demostrativo para la generación eléctrica con biogás a pequeña escala para el autoabastecimiento, con financiamiento internacional de la Cuba Cooperación Francia, EDF Francia y de la Plataforma Articulada para el Desarrollo Integral Territorial (Padit). El grupo electrógeno de biogás es de 10 KW. Con ello se logrará disminuir el consumo de energía eléctrica del SEN y de leña asociado a la producción porcina. Aún existen aún los siguientes problemas asociados a la implementación del biogás: (Benítez, 2020).

- En la ingeniería y construcción.
- Malas prácticas de operación.
- Fugas, rasgaduras y daños en cubiertas.
- Falta de limpieza y mantenimiento.
- Falta de infraestructura para el secado de los lodos y almacenamiento de biol.

- Falta de caracterización del biogás, lodo y biol.
- Falta de evaluaciones de eficiencia.
- Carencias de lagunas secundarias para mejorar la calidad del efluente.
- Muy poco uso del lodo y del biol como biofertilizantes.
- Falta de filtros de biogás.

1.15 - Mantenimiento.

Periódicamente se debe inspeccionar y verificar si existen filtraciones de agua o aire en los digestores de biogás, para proceder a su reparación. En los digestores de carga continua, por lo menos una vez al año, se debe vaciar completamente el digestor, retirando el lodo del fondo (Varnero, 2011)

Esto permite realizar lo siguiente:

- Tratamiento de roturas: cincelar las roturas en forma de V, raspar la superficie circundante; posteriormente llenar ese agujero en forma de V con cemento (1:1), compactar y aplicar dos o tres veces un enlucido hecho de una pasta de cemento puro.
- Cuando no se encuentran filtraciones, se debe lavar la cámara de fermentación y aplicar dos o tres capas de enlucido con una pasta pura de cemento.
- Si el enlucido está deteriorado o está deformado, es necesario sacarlo y lavar las paredes; entonces volver a enlucir, aplicando una tras otra, distintas capas de enlucido muy fino con una cuidadosa compactación.
- Cuando el agua freática penetra al biodigestor, es preciso aplicar una pasta salada con agua; se tapa el hoyo y se aprieta aplicando cemento con una cubierta de cenizas durante 20 minutos y entonces se remueve la cubierta.
- Cuando se produce una combinación de filtraciones en caños (tubos de entrada y salida) y cúpula, se cincela alrededor de la filtración y se saca el caño; entonces se vuelve a colocar cemento u hormigón de gravilla, haciendo fraguar localmente para que se fije el caño. Si el fondo se hunde o la pared se separa, se agrandará la resquebrajadura y se profundizará al máximo, rellenándose con una mezcla de hormigón con grava fina.
- Se debe revisar frecuentemente las juntas de la manguera para asegurar que no se filtre ni el agua ni el aire.

1.16 - Necesidad de Filtrar el Biogás:

En el biogás, el Metano (CH_4) es el gas quemador principal, su formación en el biogás convierte este en un combustible de alta calidad. La energía térmica principal de biogás nace del fuego de metano, los demás gases son impurezas. Esas impurezas afectan a la característica y calidad de biogás, particularmente CO_2 y H_2S . El biogás es el compuesto de gas metano CH_4 (50 - 70 %), dióxido de carbono CO_2 (30-45%) y algunos gases como hidrógeno H_2 (0 – 3 %), nitrógeno N_2 (0 – 3 %) y H_2S (0 – 3 %). La energía térmica del biogás es de 5000 – 6000 Kcal/m³. La alta densidad de los gases como CO_2 y H_2S existentes en el biogás produce corrosión por lo que el biogás debe ser filtrado antes de su uso (Becerra, 2017).

Para poder llevar la energía del biogás a otras necesidades de la producción, la agricultura y los servicios es necesario tener en cuenta el contenido de H_2S . Para emplear el biogás en turbinas y motores para el bombeo de agua, producción de energía eléctrica, quemadores de calderas, como gas de oxicorte, sistemas de refrigeración, etc.; es imprescindible llevar el H_2S a valores mínimos (Lujan, 2018).

El H_2S ocurre en forma natural y como producto de actividades humanas. Se encuentra entre los gases de volcanes, manantiales de azufre, emanaciones de grietas submarinas, pantanos y cuerpos de aguas estancadas y en el petróleo crudo y gas natural. El ácido sulfhídrico también está asociado con alcantarillas municipales, plantas para el tratamiento de desagües, operaciones de manejo de cerdos y abonos y operaciones relacionadas con pulpa de madera y papel. Las fuentes industriales de ácido sulfhídrico incluyen a las refinerías de petróleo, plantas de gas natural, plantas petroquímicas, plantas de hornos de coque, plantas que procesan alimentos y curtidurías. En la boca y en el tracto gastrointestinal hay bacterias que producen ácido sulfhídrico al degradar materiales que contienen proteínas de origen animal o vegetal. El ácido sulfhídrico es uno de los componentes principales en el ciclo natural del azufre. (Parrales, 2019).

El ácido sulfhídrico es liberado principalmente en forma de gas y se dispersa al aire. Sin embargo, en algunas ocasiones, puede ser liberado en el residuo líquido de una industria o como resultado de un evento natural. Cuando se libera en forma de gas, permanece en la atmósfera durante un promedio de 18 horas. En este período, el ácido sulfhídrico puede transformarse a anhídrido sulfuroso y a ácido sulfúrico. El ácido sulfhídrico es soluble en agua, formando un ácido débil. (Parrales, 2019).

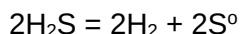
1.17- Características del H_2S .

Carácter Físico.

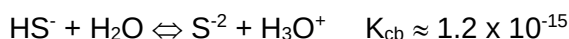
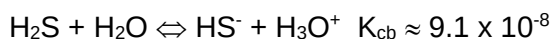
Peso Molecular: 34.08 g/mol

- Punto de fusión: -86 °C
- Calor latente de fusión (1,013 bar, en el punto triple): 69.75 KJ/kg
- Densidad del líquido (1.013 bar en el punto de ebullición): 914.9 kg/m³
- Equivalente Líquido/Gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)): 638 vol/vol
- Punto de ebullición (1.013 bar): -60.2 °C
- Calor latente de vaporización (1.013 bar en el punto de ebullición): 547.58 KJ/kg
- Presión de vapor (a 21 °C o 70 °F): 18.2 bar
- Temperatura Crítica: 100 °C
- Presión Crítica: 89.37 bar
- Densidad del gas (1.013 bar en el punto de ebullición): 1.93 kg/m³
- Densidad del Gas (1.013 bar y 15 °C (59 °F)): 1.45 kg/m³
- Factor de Compresibilidad (Z) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)): 0.9915
- Gravedad específica (aire = 1) (1.013 bar y 15 °C (59 °F)): 1.189
- Volumen Específico (1.013 bar y 21 °C (70 °F)): 0.699 m³/kg
- Capacidad calorífica a presión constante (Cp) (1 bar y 25 °C (77 °F)): 0.034 KJ/(mol.K)
- Viscosidad (1.013 bar y 0 °C (32 °F)): 0.0001179 Poise
- Conductividad Térmica (1.013 bar y 0 °C (32 °F)): 12.98 mW/(m.K)
- Solubilidad en agua (1.013 bar y 0 °C (32 °F)): 4.67 vol/vol
- Temperatura de Autoignición: 270 °C

Carácter Químico. a temperatura normal, la molécula de H₂S es muy sólida, pero en temperatura alta es muy fácil de descomponerse:



El H₂S disuelto en agua creando ácido sulfúrico (ácido débil) separado en dos ecuaciones siguientes:



A temperatura normal y presión atmósfera la tasa de disolución en agua de H₂S es 0,1ml/litro. En medio de álcali, la tasa de disolución de H₂S es mas alta, por eso, se produce la reacción entre H₂S y álcali.

- $\text{H}_2\text{S} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaHS} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{NaHS} + \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$

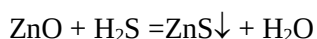
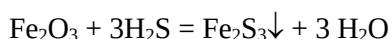
Tabla 4.

La existencia de H₂S dentro de la solución depende del nivel pH de la misma

pH	% S ²⁻ (H ₂ S)
5,0	98
6,0	90
6,5	70
7,0	50
7,5	25
8,0	10
9,0	1
10	0,1
11	0,01
12	0,001

Fuente: (Parrales, 2019).

Reacción con Metales Oxidados.



Carácter Tóxico del (H₂S).

La exposición a bajos niveles de H₂S puede producir irritación de los ojos, la nariz o la garganta. También puede causar dificultades respiratorias en personas asmáticas. Las exposiciones breves a concentraciones altas de ácido sulfhídrico (mayores de 500 ppm) pueden causar pérdida del conocimiento y posiblemente la muerte. En la mayoría de los casos, las personas que pierden el conocimiento parecen recuperarse sin sufrir otros efectos. Sin embargo, algunas personas parecen sufrir efectos permanentes o a largo plazo tales como dolor de cabeza, incapacidad para concentrarse y alteraciones de la memoria y la función motora. (Parrales, 2019).

La toxicidad del ácido sulfhídrico es parecida a la del cianhídrico. La causa por la cual, a pesar de la presencia más masificada de este compuesto, hay relativamente pocas muertes causadas por el. Sin embargo a partir de los 50 ppm tiene un efecto narcotizante sobre las células receptoras del olfato y las personas afectadas ya no perciben el hedor.

A partir de los 100 ppm se puede producir la muerte. Como la densidad del sulfhídrico es mayor que la del aire se suele acumular en lugares bajos como pozos, etc. donde puede causar víctimas. A menudo se producen varios afectados, una primera víctima se cae inconsciente y luego son afectados también todos los demás que van en su rescate sin el equipo de protección necesario. El H₂S parece actuar sobre todo sobre los centros metálicos de las enzimas, bloqueándolas e impidiendo de esta manera su funcionamiento. Para un tratamiento se recomienda llevar al afectado

lo más rápidamente posible al aire fresco y aplicar oxígeno puro. Además el ión sulfuro se combina con la hemoglobina del mismo modo que el oxígeno precipitando la asfixia del organismo. No se han detectado efectos a la salud en personas expuestas al ácido sulfhídrico en las concentraciones que se encuentran típicamente en el ambiente (0.00011-0.00033 ppm). (Parrales, 2019).

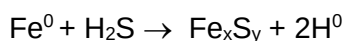
Los científicos poseen poca información sobre lo que sucede cuando una persona se expone al ácido sulfhídrico a través de la piel. Sin embargo, se sabe que es necesario tener cuidado con el ácido sulfhídrico en forma de líquido comprimido, ya que puede causar quemaduras de la piel por congelación.

A pesar de la alta toxicidad del gas sulfhídrico para los mamíferos hay muchos microorganismos que toleran elevadas concentraciones de este gas o que incluso se alimentan de él. Así hay teorías que asocian la metabolización del gas sulfhídrico como existe por ejemplo cerca de fuentes volcánicas subacuáticas con el desarrollo de la vida en la Tierra.

1.18- La corrosión causada por H₂S

- El H₂S tiene carácter corrosivo, especialmente en las condiciones de alta temperatura y presión. El H₂S puede corroer los equipos de metal, cuando quema produce gas SO₂, aún mas peligroso. Ejemplo: con hierro carbónico, el nivel erosivo de H₂S es 0,1 inch/año

- El desgaste de H₂S tiene origen de esta reacción:



- El sulfuro de hierro producto de esta reacción se pega muy fuerte al hierro creando una capa de óxido negro. Los iones hidrógenos nacidos de la reacción hacen que el hierro sea más frágil.

- Cuando quema, el H₂S produce gas SO₂, también es un gas ácido fuerte con carácter corrosivo, toxico para el sistema respiratorio, si tiene contacto con agua, forma el ácido H₂SO₄ productor de lluvias de ácidas. (Rivera, 2017).



Conclusiones parciales del primer capítulo.

Hasta este punto se puede concluir que el uso de la tecnología del biogás constituye una alternativa bastante alentadora para los tiempos actuales, donde la demanda de energía es mas alta que nunca a nivel global. Esta fuente renovable de energía destaca por sus numerosas aplicaciones tanto en la industria como en el hogar y los automóviles. De todos modos, su potencial va más allá de las ventajas del biogás a nivel práctico. No podemos olvidar su importante aportación a la reducción del cambio climático, y a la mejora en la calidad del aire, esencialmente debido a que no realiza

emisiones de dióxido de azufre, reduce la concentración de partículas contaminantes en el aire y nos ayuda a depender menos de los combustibles fósiles.

- Asimismo, esta energía renovable también se debe valorar desde la vertiente socioeconómica, ya que la generación de este combustible representa una oportunidad de negocio para las zonas rurales, además de garantizarles el suministro eléctrico descentralizado.
- Aplicando la tecnología de los biodigestores se favorece el control del metano en la atmósfera, un gas de mucho mayor poder de efecto invernadero que el CO₂.
- Se reutilizan y aprovechan los residuos orgánicos agropecuarios, que pueden convertirse en rentables.
- Con su uso, se reduce la emisión de dióxido de carbono que producen otros combustibles como el carbón o el petróleo. Por lo tanto, se evita el incremento de la contaminación ambiental, con sus consecuencias negativas para la salud.
- La eficiencia energética de las plantas de biogás es muy superior a la fotovoltaica.
- Las plantas de biogás mejoran la economía local, generando puestos de trabajo y beneficios económicos.
- Otra de las ventajas del biogás es que con su creación también produce fertilizante de alta calidad, que ofrece resultados de alta calidad en los cultivos.
- Posibilidad de disponer de electricidad y energía calorífica en cualquier lugar, incluso en las zonas rurales más remotas. Hay que tener en cuenta que las plantas de producción de este biocombustible se pueden instalar tanto en núcleos rurales como urbanos. Por lo tanto, se convierten también en una buena opción energética para los países emergentes.
- Con respecto a la desulfuración del biogás, es evidente que sin un sistema de filtrado cualquier aplicación técnica terminará provocando serios problemas debido a las características químicas-corrosivas y tóxicas del H₂S, por lo que se concluye que mediante la eliminación de este gas se garantiza:
 - Un óptimo funcionamiento de las máquinas (motores, turbinas, calderas, pilas de combustible, vehículos, etc.) relacionadas con su aprovechamiento como combustible.
 - Una vida útil prolongada de las máquinas y equipos utilizados para su bombeo, extracción y compresión (soplantes y compresores).
 - Una mejora en las emisiones de los gases de escape de las máquinas motoras.
 - Evitar concentraciones tóxicas al operario (ser humano).

- Reducción del coste de mantenimiento (reparación y cambio de aceites) de las máquinas involucradas en este tipo de instalación.
- Un óptimo funcionamiento del sistema de captación, bombeo, almacenaje y distribución del biogás.

Capítulo II: Base teórica del proceso de purificación del biogás.

Los gases naturales, en general, al igual que los gases combustibles de la industria del biogás, en particular, tienen sustancias acompañantes como vapor de agua, CO_2 , H_2S , N_2 , etc. La presencia de estas sustancias varía acorde con las condiciones concretas de la fuente de gas. El gas H_2S no solo es muy corrosivo sino que además es tóxico para la salud humana. También afecta la calidad del gas industrial, así como la calidad de los productos que utilizan como materia prima gases que tengan alto contenido de él, es por ello que en muchos países se limita al mínimo la presencia del H_2S en los productos comerciales gaseosos 4ppm. Precisamente por ello es que la separación de los compuestos de los gases de combustión constituye un importante problema. También se reconoce que el grado de afectación que producen a la calidad de los gases de combustión cada uno de ellos es diferente, entre ellos el H_2S , es el que mas afecta. El H_2S es un gas tóxico que produce mucho daño y debe ser eliminado totalmente. El CO_2 afecta el proceso de combustión del gas cuando está quemándose, hay que eliminarlo en altas concentraciones. Para eliminar el H_2S pueden emplearse tanto métodos secos como mojados. El método seco utiliza diferentes tipos de materiales secos para absorber el gas.

¿Qué se ha estado haciendo en nuestras instalaciones que por necesidad han tenido que eliminar el H_2S ?

Se ha empleado un método físico- químico, se han diseñado camas empacadas que se llenan de virutas de acero provenientes de los trabajos de tornería o fresado, generalmente de doble etapa, con resultados a largo plazo no deseados, por la corrosión existente en estas instalaciones y las roturas de compresores y tanques.

¿Por qué?

Se ha comprobado que la reacción $\text{Fe} + \text{H}_2\text{S}$ es muy lenta, por lo que el gas pasa por las camas empacadas y prácticamente no se captura H_2S .

Se han identificado que existen problemas en la ingeniería y construcción de biodigestores y filtros, malas prácticas de operación y la falta de filtros de biogás.

Por tanto en este capítulo se expondrán los procesos de filtrado existentes en el mundo, y, a partir de ellos se seleccionará el mas conveniente.

Teniendo en cuenta las características del biogás que ya hemos expuesto anteriormente, para purificar cualquier gas y el biogás, en particular puede utilizarse 1 de los procesos tecnológicos siguientes:

- Proceso de absorción.
- Procesos de adsorción en una superficie solida (óxido de hierro y carbón activado).
- Separación por membranas.
- Procesos de oxidación seca.
- Procesos de separación biológica (Biofiltros, biofiltros percoladores y biolavadores).

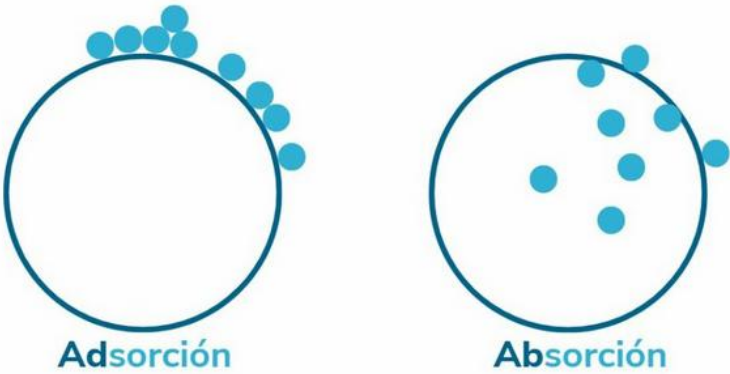
Tabla 5.

Diferencias entre absorción y adsorción:

	Absorción	Adsorción
Definición	Es el fenómeno en la que los átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos se disuelven en otra sustancia.	Fenómeno el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son retenidos en una superficie de una sustancia solida o líquida.
Fenómeno	Es un fenómeno de masa y volumen.	Es un fenómeno superficial.
Estado de agregación del sorbente	Líquido	Sólido y líquido
Estado de agregación del soluto	Líquido, gaseoso	Sólido, líquido y gaseoso

Figura 10.

Representación de los procesos de adsorción y absorción:



A continuación se describen brevemente cada uno de ellos:

2.1- Procesos de Absorción.

Este proceso se usa para el tratamiento de gases que contienen relativamente bajas concentraciones de H_2S . Este puede ser un proceso de absorción físico o un proceso de absorción químico. En los procesos de absorción físicos el H_2S puede ser absorbido por solventes, tales como el agua. Sin embargo, el consumo de agua es muy alto para la absorción de pequeñas cantidades de H_2S . Si se agregan al agua ciertos químicos, como el NaOH, se mejora el proceso de absorción. La absorción química del H_2S puede tener lugar con soluciones de sales de hierro tales como cloruro de hierro. Este método es muy efectivo en reducir altos niveles de H_2S . El proceso se basa en la formación de precipitados insolubles. El $FeCl_3$ puede ser agregado directamente al digestor y en digestores anaeróbicos pequeños este proceso es muy conveniente. (Araujo, 2015).

Un proceso químico líquido usado para remover H_2S de numerosas corrientes de gas es el proceso Stretford. Este proceso emplea una solución de lavado cáustico (conteniendo carbonato de sodio y vanadio pentavalente) para producir sulfuro elemental. El uso de hidróxido de sodio para la eliminación de H_2S de corrientes de gas es rentable sólo cuando se trata de cantidades muy pequeñas de H_2S y algunos medios están disponibles para disponer de la solución de sulfuro resultante, ya que en estos procesos no es posible regenerar el solvente. Se pueden utilizar tantas soluciones de sodio o hidróxido de potasio (NaOH o KOH) los cuales cuando reaccionan con el H_2S forman sales estables (Na_2CO_3 o Na_2S). (Araujo, 2015).

Los sistemas más empleados son:

Absorción con Compuestos de Hierro:

Se utilizan limallas de hierro colocadas en columnas de purificación que se encuentran humedecidas de forma discontinua con agua y rellenas con otro material por ejemplo, el aserrín; para ayudar a la hidrodinámica del sistema. (Varnero, 2011).

El proceso opera a distintas presiones, logrando eliminar eficientemente el H_2S a temperatura ambiente o superiores, con un contenido de humedad de las limallas entre 30 y 60 %, debiendo realizarse la operación a pH entre 7,5 y 8,5. Es posible emplear óxido de hierro (III) hidratado para la purificación del biogás, adición de cloruro de hierro (III), utilización de pellets de hierro, utilización de residuos de la extracción de níquel, lavado con solución de hidróxido de sodio, así como también, otros sustratos “secos” tales como óxido de zinc, sólidos alcalinos, entre otros. También se ha utilizado hierro quelatado en fase líquida para la absorción del H_2S presente en el biogás. (Varnero,

2011).

Absorción con Compuestos Orgánicos:

Diferentes compuestos orgánicos han sido utilizados para la purificación del biogás. Las soluciones de aminas (mono, di, tri etanol aminas o glicol aminas) se combinan por el grupo amino (NH_2) con CO_2 y H_2S para dar hidrógeno carbonato de amonio $(\text{RNH}_3)\text{HCO}_3$ o sulfuros de amonio $(\text{RNH}_3)_2\text{S}$. Las aminas se operan en procesos calientes debido a que el calor favorece la reacción química. Sin embargo, el calor excesivo puede causar vaporización y pérdida de la solución química. Por lo tanto, estos procesos operan usualmente a temperatura hasta 48°C . (Varnero, 2011).

La hidroxí-amino etilester es aún menos corrosiva y no forma espuma, de ahí que se prefiera para la purificación de gases. Otros productos orgánicos utilizados para la reducción del contenido de CO_2 y de H_2S en el biogás son el Towsend, en el que se emplea etilenglicol con dióxido de azufre y el Purox donde se aplica una solución de amonio de hidroquinona. La regeneración del absorbente se lleva a cabo, usualmente, mediante calentamiento de la solución con disminución de la solubilidad y desprendimiento de un gas concentrado en sulfuro. (Varnero, 2011).

El azufre puede recuperarse a partir de ese gas, quemando parte del sulfuro para obtener azufre elemental y dióxido de azufre, el sulfuro remanente se convierte, catalíticamente, en azufre elemental en presencia de óxido de aluminio. Debido a los costos de la mayoría de estas soluciones, este método de purificación se utiliza, fundamentalmente, en grandes instalaciones de producción de biogás, $\geq 15\,000\text{ m}^3/\text{d}$, en países productores de dichas sustancias. (Varnero, 2011).

Absorción con Agua.

Este método se denomina también fregado o limpieza húmeda. El absorbente utilizado es el agua, el cual se pone en contacto con el biogás a purificar en torres o columnas (rellenas o no) donde se efectúa la transferencia de masa del CO_2 y H_2S al agua que fluye a contracorriente. Las temperaturas de operación suelen ser de 5 a 10°C , aunque también se operan a temperatura ambiente, siendo las presiones de trabajo mayores de 1726 KPa . En este sistema se necesita regenerar el agua cargada de CO_2 y H_2S , lo que se realiza utilizando una torre donde, de forma instantánea, el CO_2 y el H_2S pasan al aire circundante, reincorporando el agua a proceso de absorción; siendo necesario reponer entre 10 y 20% de ésta. Esta es una metodología poco eficiente por las temperaturas y altas presiones de trabajo, encareciendo los costos de operación. (Varnero, 2011).

2.2- Procesos de Adsorción en una Superficie Sólida.

Los métodos de purificación por adsorción también llamados de lecho seco, se llevan a cabo sobre un material sólido fijo, sobre el cual el sulfuro de hidrógeno es adsorbido por adherencia. Por lo general, los materiales sólidos utilizados como adsorbentes son carbón activado, sílicagel y tamices

moleculares de zeolitas o tamices moleculares de carbón. Como el proceso de adsorción ocurre sobre la superficie del adsorbente, donde las moléculas son retenidas por fuerzas electrostáticas débiles, la reacción puede verse afectada por la humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de partículas. (Varnero, 2011).

El proceso de adsorción que requiere menos energía es cuando se utiliza carbón activado, porque opera con temperatura y presión menores, donde la reacción se realiza en los poros y el sulfuro de hidrógeno reacciona con el oxígeno produciendo azufre y agua.

La adsorción empleando sílicagel como indicador, también ha permitido la eliminación de sulfuro de hidrógeno y anhídrido carbónico. El cambio de coloración del compuesto indica la saturación del adsorbente que puede ser regenerado calentándolo a 117 °C. (Varnero, 2011).

2.2.1- Óxido de Hierro.

La adsorción química se puede llevar a cabo utilizando pellets de óxido de hierro como adsorbente. El biogás pasa a través del óxido de hierro para remover el H_2S , el cual al reaccionar con éste forma sulfuro de hierro. (Araujo, 2015).

2.2.2- Carbón Activado.

El carbón activado no impregnado que se utiliza para la eliminación de H_2S tiene capacidades de carga aproximadamente 0,02 g/g de carbón activado. Debido a su afinidad relativamente baja para remover H_2S , la utilización de este 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. Cuando la superficie es menos ácida el grado de disociación es superior y la creación de las especies de azufre elemental poliméricos resistentes a la oxidación adicional es más favorable. La eliminación de H_2S del biogás depende de la cantidad de agua presente en el sistema. (Araujo, 2015).

2.3- Separación por Membranas.

La utilización de tamices moleculares, permite que el sistema opere a temperaturas cercanas a la ambiental. Estos pueden usarse para eliminar H_2S , mercaptanos, agua y un buen número de otras impurezas. Los tamices moleculares compuestos de zeolita con alta afinidad por las moléculas polares, presentan un área superficial de hasta 590 cm²/g teniendo tamaños de poros bien definidos lo que permite una remoción selectiva de diferentes compuestos.

En la actualidad, a nivel mundial la tecnología de purificación ampliamente usada se denomina "Pressure Swing Adsorption" (PSA) y puede utilizar tanto carbono activado como zeolitas o ambos. En este proceso de PSA, el anhídrido carbónico se separa del biogás utilizando procesos de

adsorción/desorción a diferentes presiones. El sistema consta de cuatro recipientes llenos de material adsorbente. Durante el proceso, cada recipiente sigue un ciclo de presurización- adsorción- despresurización- desorción. Entonces el biogás entra por la parte inferior del recipiente y a medida que asciende, el material adsorbente capta tanto el anhídrido carbónico como el oxígeno y el nitrógeno, hasta obtenerse un gas con un 95 % de CH₄ y con una eficiencia de recuperación de metano presente en el biogás entre un 85% a 90% dependiendo del soporte o material adsorbente en el PSA. (Varnero, 2011).

En el caso de utilizar titanio activado, se logra obtener las eficiencias más altas de recuperación de metano. Cuando el material adsorbente de un recipiente está completamente saturado de los gases anhídrido carbónico, oxígeno y nitrógeno, la adsorción en ese recipiente deja de funcionar, entonces, el biogás pasa al siguiente recipiente, el cual previamente ha sido regenerado mediante despresurización a presión atmosférica. Por otra parte, los sistemas de PSA dejan una pérdida gaseosa, llamada "gas de cola", que podría contener sulfuro de hidrógeno, anhídrido carbónico y gas metano, que debiera ser quemada, utilizando parte del metano que tiene el biogás. Esto representa un 12% del metano proveniente del biogás (en función del porcentaje de nitrógeno presente en el biogás a purificar y el material adsorbente). Además, los sistemas de PSA no remueven completamente el oxígeno (si se utiliza como material adsorbente; carbón activado o zeolitas), el cual representa un riesgo explosivo en presencia de gas metano y pérdidas en la recuperación del metano por oxidación a anhídrido carbónico. (Varnero,2011)

Los métodos de purificación por adsorción presentan la ventaja de ser muy efectivos en la reducción y remoción de contaminantes, sin embargo presentan costos de operación altos, debido al consumo eléctrico de los compresores que alcanza presiones de 100 libras por pulgada cuadrada (PSI), por lo que su aplicación en países en vías de desarrollo se encuentra limitada. (Varnero,2011).

Este método tiene por objetivo "filtrar" el biogás. Así la corriente gaseosa a purificar se desplaza a través de una membrana selectiva, debido a la fuerza motriz generada por diferencias de presión. El factor determinante es la permeabilidad que poseen las moléculas que componen la corriente de gas a purificar.

El proceso lo componen la corriente de gas a purificar, y permeación de un gas a través de una membrana polimérica no rugosa, es un proceso complejo que puede involucrar varios pasos:

- Adsorción del gas en una interfase de la membrana.
- Solución del gas en la membrana en esa interfase.
- Difusión activada del gas en, y a través de la membrana.
- Desprendimiento del gas de la solución por la interfase opuesta.
- Desorción del gas de la última interfase, las zeolitas hidrofílicas son más indicadas para la adsorción de H₂S.

2.4- Procesos de Oxidación Seca.

Este método consiste en introducir aire/hidrógeno dentro del sistema de biogás. De esta forma una pequeña cantidad de oxígeno es introducida en el sistema de biogás usando una bomba de aire. Como resultado, el sulfuro en el biogás es oxidado a azufre y de esta forma disminuye la concentración de H_2S . Este es un proceso simple y de bajo costo, no se necesitan químicos ni equipamientos especiales y se utiliza cuando el contenido de sulfuro del gas es relativamente bajo y se requiere una alta pureza. (Araujo, 2015).

2.5- Proceso de Separación Biológico.

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_0) o sulfatos (SO_2), fijando CO_2 simultáneamente como función estequiométrica de la oxidación del sulfuro de hidrógeno. Las bacterias seleccionadas en los procesos para convertir H_2S a S_0 deben tener las siguientes características: capacidad fiable de convertir H_2S a S_0 , mínima entrada de nutrientes, y fácil separación de S_0 de la biomasa. Las bacterias fototróficas y quimiótroficas son microorganismos adecuados para la biooxidación de sulfuro de hidrógeno. Los principales microorganismos estudiados y que se emplean para la desulfuración, corresponden a los géneros Beggiatoa, Xanthomonas Sulfolobus, Lectospirillum, especialmente, Chlorobium y Thiobacillus. La bacteria fototrófica Chlorobium limicola es una bacteria ideal para estos procesos biológicos debido a su capacidad de crecer en condiciones anaeróbicas utilizando sólo sustratos inorgánicos y una fuente de luz y debido a su eficiente producción extracelular de azufre elemental a partir de H_2S . Los microorganismos necesitan de un soporte donde se puedan llevar a cabo los procesos y vías metabólicas. Para ello, existen sistemas, los cuales permiten que los microorganismos seleccionados, que se encuentren inmovilizados o en suspensión, mineralicen los compuestos a tratar. (Araujo, 2015).

A continuación se describen los tipos de filtros utilizados:

Biofiltros. Biorreactor de tres fases (gas, líquido, sólido) hecho con un lecho filtrante que tiene una alta porosidad, alta capacidad de amortiguación, alta disponibilidad de nutrientes y alta capacidad de retención de humedad para asegurar que los microorganismos elegidos puede crecer en él. (Araujo, 2015).

Biofiltros Percoladores. Los filtros percoladores funcionan de una manera similar a los biofiltros, excepto que el lecho empacado es continuamente goteado por una solución acuosa nutritiva. El lecho empacado generalmente es de un material sintético o inerte, como anillos de plástico, espuma de poro abierto, o roca de lava. La solución de goteo contiene nutrientes inorgánicos esenciales tales como nitrógeno, fósforo, y potasio, y por lo general es reciclada. (Araujo, 2015).

Biolavadores. La eliminación de H_2S utilizando biolavadores implica un proceso de dos etapas, en primer lugar la absorción de H_2S por un líquido seguido de la oxidación biológica de H_2S en el líquido. En la etapa de absorción, los contaminantes se extraen mediante la absorción con agua en una torre de aspersión o columna. En la segunda etapa, el líquido recircula al reactor biológico en donde se lleva a cabo la oxidación, por microorganismos que pueden encontrarse libres o inmovilizados. Una vez reducida la concentración del contaminante en el líquido, éste es reciclado al absorbedor. De esta forma, se puede lograr un enriquecimiento en metano, al eliminar el elemento (H_2S) más corrosivo y limitante respecto a usos posteriores del gas purificado. (Araujo, 2015).

Biofiltros de escurrimiento (biotrickling filters).

Los biofiltros de escurrimiento (biotrickling filters) operan en forma similar a biofiltros, aunque en los de escurrimiento, se introduce una fase líquida enriquecida en nutrientes a las camas de relleno o lechos de soporte, compuestas de material inerte y sintético, o bien, de material natural como rocas volcánicas. (Varnero, 2011).

La solución introducida contiene nutrientes inorgánicos esenciales, tales como nitrógeno, fósforo, potasio, sodio, entre otros, y dicha solución puede ser reciclada luego de ser utilizada. Aunque los biofiltros de escurrimiento son más complejos que los filtros convencionales, usualmente son más efectivos, especialmente en el tratamiento de compuestos difíciles de descomponer o compuestos que generan productos secundarios, tales como H_2S . En general, los filtros de escurrimiento se construyen a mayor altura que los biofiltros y son sistemas que presentan un mayor control debido a que la fase líquida introducida se transporta y remueve las celdas muertas y productos solubles e insolubles. Se ha comprobado que ambos tipos de biofiltros son tecnologías efectivas en la remoción de H_2S y olores asociados con emisiones gaseosas provenientes de plantas de tratamiento de aguas sanitarias. Si bien, los biofiltros escurridos no se han empleado a la misma escala industrial que los convencionales, la prospección que presenta ésta tecnología es alentadora. La tecnología asociada a los filtros de escurrimiento ha sido aplicada exitosamente descomponiendo hidrocarburos alifáticos y aromáticos, compuestos de cloruros y compuestos inorgánicos. La concentración de nutrientes que debe ser agregada en la solución, se basa en los requerimientos del consorcio microbiano y razones estequiométricas, aunque generalmente se requieren niveles de nutrientes bastantes menores a los esperados en base a la estequiometría, debido al reciclaje de nutrientes que se realiza respecto a

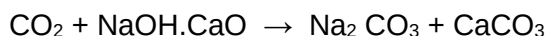
células muertas, biodigestión de biomasa acumulada, entre otros. Además, se deben mantener las concentraciones de sales y productos de metabolismo menores que los niveles inhibitorios. (Varnero,2011).

En la mayoría de casos, la solución se transporta a través del filtro y es reciclada, aunque en ciertos casos, el número de reciclajes posibles es limitado. Los filtros funcionan mejor cuando la película biológica es parcialmente humedecida, sugiriendo que los contaminantes se transfieren de la fase gaseosa a la película bacteriana directamente.

Por otra parte, se tiene que elegir cuidadosamente el soplador para tener una operación económicamente efectiva, tanto en los biofiltros convencionales como en los de escurrimiento. Cuando se realizan grandes aplicaciones, se recomienda un soplador con un “drive” de velocidad variable. Aunque estos modelos son más caros que aquellos de drive con velocidad fija, permiten ajustes respecto a cambios en flujos y presiones, que se producen debido a la biomasa. Los modelos con “drives” de velocidad variable evitan la necesidad de regulación y control de flujo. Se puede instalar un soplador tipo “forced draft” upstream o un soplador tipo “induced draft” downstream.

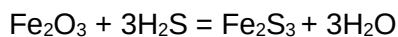
2.6- Utilización del Material de Cal Sodada para Absorber el CO₂.

El material de la cal sodada es un compuesto de cal viva CaO y NaOH en proporciones específicas. El proceso se produce poco a poco, la cal sodada absorbe el Carbono y produce un concentrado de carbonato como el que aparece en la formula siguiente:



2.7- Uso de Polvo de Óxido Ferroso y Aglutinante para Crear Pastillas Absorbentes.

El uso de Fe₂O₃ como absorbente se descubrió desde hace tiempo y se aplicó en la industria para limpiar gas con bajo contenido de H₂S (< 200ppm). El óxido ferroso, que desoxigena H₂S, es Fe₂O₃ activado, existente en aserrín u otras materias esponjosas, impregnados de NaOH o Na₂CO₃. El óxido ferroso tiene el nombre comercial Iron sponge. La reacción entre H₂S y Fe₂O₃ que forma Fe₂S₃ ocurre rápido, cuya ecuación es la siguiente:



Los sulfuros de hierro se recuperan de forma fácil el estado inicial Fe₂O₃ gracias al óxido en el aire y se enciende el fuego. Tal transformación causa peligros durante la echada del producto al ambiente.

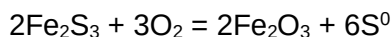


Tabla 6.Resumen de métodos de eliminación de H₂S.

Físico - químico	Adición de sales/óxidos de hierro al digestor
	Adsorción:
	– Carbon activado
	– Tamiz molecular
	– Óxidos de hierro (esponja de hierro, SulfaTreat®, Sulphur-Rite®)
	– Óxidos de zinc
	– Sólidos alcalinos
	Absorción/Scrubbing:
	– Agua
	– Solventes físicos sin - agua (Selexol®)
	– Soluciones alcalinas
	– óxido de zinc slurries
	– Iron oxide slurries
	– Sales de hierro, queladas y no queladas(Lo-Cat®, SulFerox®, Sulfothane®)
	– Sales de vanadio (Stretford)
	– Oxidantes químicos: hipoclorito, H ₂ O ₂ , KMnO ₄
	– Aminas
	Purificación de membrana
	Proceso Claus (+ SCOT / + Superclaus)
	Incineración
Biotecnológico	Adición de Aire/Oxígeno al digestor
	Biofiltro/filtro percolador (BiogasCleaner®, Biopuric®, DMT filter®)
	Bioscrubber (Thiopaq™)
Combinación de procesos físico-químicos/biotecnológicos	Absorción química con sales de hierro y regeneración microbial de la solución.

Fuente: (Parrales, 2019).

Conclusiones Parciales del Capítulo II.

Todos los métodos de filtrado del biogás presentan sus ventajas y desventajas características. Es necesario seleccionar uno que se adapte a nuestras condiciones materiales y tecnológicas

- La mayoría de las tecnologías aplicadas para la eliminación del H₂S por el método de

absorción en soluciones (método mojado) cuentan con sistemas de equipos complejos y poco articulados.

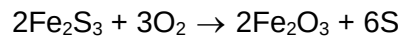
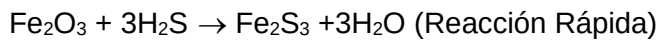
- Una vez terminado el proceso de eliminación del H_2S viene el proceso que hay que hacerle a la propia solución para su reciclaje. Separar los residuos que se quitaron en el proceso de reciclaje requiere otra línea de trabajo que le dé solución al problema, y esto produce muchos más gastos y dificultades.
- El precio que tiene hacer la solución para eliminar el H_2S es muy elevado, es compleja con respecto a otros métodos que se aplican.
- El proceso de aireación se presenta como una alternativa bastante sencilla pero solo a pocas concentraciones de H_2S .
- El carbón activado no representa la mejor alternativa, puesto que su efectividad se ve afectada por parámetros como la humedad.
- Los tamices moleculares son bastante efectivos, se logra purificar el biogas hasta un 95% de gas metano.
- Los biofiltros tienen la gran desventaja de necesitar condiciones muy específicas para su funcionamiento, requieren de equipos que garanticen las condiciones para el desarrollo de los microorganismos que metabolizan el H_2S , un suministro periódico de nutrientes y condiciones de temperatura reguladas.
- Los más simples en construcción, mantenimiento y costos de producción son los filtros a base de óxido de hierro.

Capítulo III - Diseño de un filtro para la eliminación del H₂S en el biogás.

3.9- Cálculo y Diseño del Filtro de Biogás.

Para el diseño de este filtro, después de haber analizado todos los procesos tecnológicos y métodos existentes, se propone emplear el método de adsorción con materiales secos a partir del Fe₂O₃, empleando para éste las propias virutas provenientes de la tornería y el frezado. Estas virutas deberán ser sometidas a un proceso de oxidación para transformarlas en (Fe₂O₃) aplicando el procedimiento que posteriormente se describirá. A partir de este elemento de fácil acceso se podrá fabricar de manera bastante sencilla la sustancia filtrante con la que funcionará nuestro filtro.

El método se apoya en la reacción química siguiente (Leitón, 2014).



Este es el método más fácil y barato, el Fe₂S₃ se regenera (se quema) con el O₂ del aire y puede ser usado nuevamente.

3.9.1- Cálculo de la Masa de Fe₂O₃ Necesaria para 365 Días de Operación a Partir del Volumen de Biogás Producido.

Partimos del conocimiento del volumen de biogás diario (cada 24h) que produce el digestor, por ejemplo una instalación que produce en un día un volumen de gas = 10 m³ / 24 horas lo que equivale a una media de 0,007 m³ / minuto.

Determinación del Volumen. Luego se determina qué parte de ese volumen está compuesta por H₂S, o lo que es lo mismo, que volumen de H₂S hay presente en 10m³ de biogás.

Conociendo que el biogás tiene un contenido de entre (0.1%-0.5% de H₂S) (tabla 1 componentes del biogás), asumimos el porcentaje máximo para el cálculo y aplicamos la fórmula siguiente.

$$V_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{10\text{m}^3 \times 0,5}{100} = 0,05\text{m}^3 = 50\text{Litros de H}_2\text{S}$$

Calculando la Masa. Conociendo el volumen de H_2S calculamos su masa multiplicando por su densidad

- Densidad del H_2S (ρ_{H_2S}) = 1,42 Kg/ m^3 (Parrales, 2019).

$$0,05m^3 \times 1,42 \text{ Kg}/m^3 = 0,071\text{Kg}$$

Determinación de la Masa Teórica de Fe_2O_3 por Día.

La absorción máxima del Fe_2O_3 es de 56,6 % del peso. Por tanto para 0.071Kg la masa de Fe_2O_3 es:

$$X = \frac{100 \times 0,071\text{Kg}}{56,6} = 0,1267\text{Kg de } Fe_2O_3/24 \text{ h (Cantidad de } Fe_2O_3 \text{ teórico que se necesita)}$$

En la práctica se incrementa en un 20 % esta cantidad.

$$0,20 \times 0,1267 = 0,02534$$

$$0,1267\text{Kg} + 0,02534 \text{ Kg} = 0,15204 \text{ Kg de } Fe_2O_3$$

Entonces necesito 0,1520 Kg de Fe_2O_3 para un día, para esa corriente.

Fijamos el Coeficiente de Seguridad.

Fijamos el coeficiente de seguridad a 2, tenemos:

$$0,152\text{Kg}/24\text{h} \times 2\text{veces} = 0,304\text{Kg}/24\text{h de } Fe_2O_3 \text{ diariamente}$$

Para H_2S al 0,5 % en un volumen de 10 $m^3/24\text{h}$ de biogás necesito 0,304 Kg de Fe_2O_3 diario.

Calcular para 365 Dias sin Sustituir el Fe_2O_3

Para limpiar el filtro cada 12 meses (sin tener que tocar esta viruta).

$$0,304\text{Kg} \times 365\text{días} = 110,989 \text{ Kg/año}$$

Por tanto, necesitamos un total de 110.989 Kg de Fe_2O_3 para filtrar 10 m^3 de biogás diariamente por un año entero.

3.9.2- Cálculo de la Masa de Fe_2O_3 Necesaria para 365 Días de Operación a Partir de Presiones de Trabajo y Masas Molares.

En este caso partimos del volumen del digestor, y su presión de trabajo, por tanto debemos saber en primer lugar cuál es el volumen de biogás producido a presión atmosférica, para ello supondremos un biodigestor de 10m^3 , que opera a una presión absoluta de 1.2 atm, mientras que la del aire es de 1 atm. A partir de este ejemplo desarrollaremos los cálculos para determinar qué masa de Fe_2O_3 se necesita para mantener el filtro en funcionamiento durante 365 días sin cambiarlo.

Tomamos los Siguietes Datos:

(P_1) Presión dentro del estanque = 1,2 atm

(P_2) Presión del aire = 1 atm (Presión fuera del estanque)

Diferencia de presión = 0,2 atm

$V_1 = 10\text{ m}^3$ (Volumen del gas dentro del estanque)

$V_2 = ?$ (Volumen de gas que tengo a esa presión fuera del estanque)

Aplicamos la Ecuación de Equilibrio:

Para conocer el volumen de gas que existe dentro del digestor a presión atmosférica.

$V_1P_1 = V_2P_2$ y calculamos el V_2

$$V_2 = \frac{V_1 \times P_1}{P_2} = \frac{10\text{m}^3 \times 1,2\text{atm}}{1\text{atm}} = 12\text{m}^3$$

Ya sabemos que la proporción de H_2S en el biogás está entre el 0,1 y el 0,5 %.(tabla 1 componentes del biogás) Asumimos 0.5%.

Calculamos el Volumen de H_2S

Partiendo del volumen de biogás a presión atmosférica multiplicamos por el porcentaje correspondiente al contenido de H_2S .

$$V_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{12\text{m}^3 \times 0,5}{100} = 0,06\text{m}^3$$

Según la Tabla Periódica de los Elementos Químicos (masa atómica).

Hidrógeno (H) = 1,00794

Azufre (S) = 32,066

Hierro (Fe) = 55,845

Oxígeno (O) = 15,9994

- En condiciones ideales, un mol de H_2S equivale a 34,0818 gramos (34,08 g/mol) y tiene un volumen de 0.0222m^3 . Se demuestra de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &\text{H}_2\text{S} \\ &(2 \times 1,00794) + (32,066) \\ &= 2,01588 \text{ g} + 32,066 \text{ g} \\ &= 34,08188 \text{ g} \end{aligned}$$

Entonces, el número de moles de H_2S presente en 0.06m^3 es:

$$X = \frac{0,06\text{m}^3}{0,0222 \text{ m}^3/\text{mol}} = 2,7027\text{Mol}$$

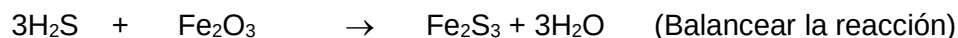
la masa de H_2S contenido en el estanque de 10 m^3 es:

$$2,7027 \text{ mol} \times 34,0818 \text{ g/mol} = 92,11\text{g} \quad (\text{Lo que equivale a } 0.9211\text{Kg})$$

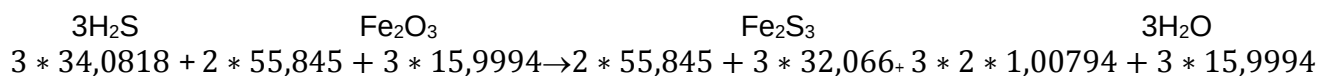
Por tanto, podemos decir hasta el momento que para el volumen analizado de 10m^3 a una presión de 1.2 atm tenemos presente 0,9211Kg de H_2S .

¿Qué Cantidad de Fe_2O_3 Tenemos que Utilizar Como Absorbente?

Para este cálculo es necesario plantear la fórmula química ajustada.



Ahora Multiplicamos el Número de Moles por la Masa Molar de Cada Elemento.



$$102,2456 \text{ g} + 159,68 \text{ g} \rightarrow 207,888 \text{ g} + 54,0458 \text{ g}$$

$$261,93 \text{ g} = 261,93 \text{ g}$$

Hemos comprobado que el balance está correcto, por lo que necesitan reaccionar 159,68 g de Fe_2O_3 con 102,93 g de H_2S . Entonces para saber que cantidad de Fe_2O_3 debe reaccionar con 92,11 g de H_2S que es nuestro volumen en el digestor, establecemos la relación:

$$102,2456 \text{ g} \rightarrow 159,68 \text{ g}$$

$$92,11\text{g} \rightarrow \text{M}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\frac{102,2456g}{159,68g} = \frac{92,11g}{M_{Fe_2O_3}}$$

$$M_{Fe_2O_3} = 143,8509 g$$

(Equivale a 0,1438 Kg)

Necesitamos para un día de funcionamiento una masa de 0,1438 Kg de Fe_2O_3 .

Sumamos el 20% de Este Resultado.

$$0,02876 + 0,1438 \text{ Kg} = 0,1725 \text{ Kg}$$

Fijamos el Coeficiente de Seguridad en 2.

$$2 \times 0,1725 \text{ Kg} = 0,345 \text{ Kg}$$

Para 365 Días.

$$0,345 \text{ Kg} \times 365 \text{ días} = 125,925 \text{ Kg}$$

Hay que hacer un tanque o filtro de capacidad de 125,925 Kg, ésta es la masa de Fe_2O_3 necesario para un año de funcionamiento.

Cabe mencionar que este método solo tiene en cuenta la masa molar de los elementos, en la vida real si varía la densidad del gas por efecto de la temperatura el resultado de aplicar el método 3.9.1 a los datos del método 3.9.2 los resultados difieren entre sí por un margen de aproximadamente 1% para los datos seleccionados. Además, supone que el 100% de las sustancias reaccionantes interactúen entre sí para formar las sustancias del producto lo que no ocurre en la práctica.

3.9.3 - Comprobación de Resultados.

Aplicando el metodo 3.9.1 a los datos del metodo 3.9.2.

- Densidad del H_2S a temperatura $25^\circ C$ (ρ_{H_2S}) = 1.36 Kg/m^3
- $V(H_2S) = 0.06 \text{ m}^3$

Masa de H_2S .

$$m(H_2S) = 0.06 \text{ m}^3 \times 1.36 \text{ Kg/m}^3 \\ = 0.0816 \text{ Kg}$$

Masa Teórica de Fe_2O_3 .

$$m_{(teórica de Fe_2O_3)} = m(H_2S) \times 100/56,6 \\ = 0.0816 \text{ Kg} \times 100/56.6 \\ = 0.1441 \text{ Kg}$$

Suma del 20%.

$$20\% \rightarrow 0.1441 \text{ Kg} = 0.02882$$

$$0.02882 + 0.1441 \text{ Kg} = 0.1729 \text{ Kg}$$

Coeficiente de Seguridad en 2.

$$2 \times 0.1729 \text{ Kg} = 0.3458 \text{ Kg}$$

Por 365 Días.

$$365 \times 0.3458 \text{ Kg} = 126.21 \text{ Kg}$$

Serán necesarios 126.21 Kg de Fe_2O_3 para un año de operación.

Tabla 7.

Comparación entre métodos.

	Método mediante volumen	Método mediante masas molares
Resultados	126.21 Kg	125.92 Kg
Diferencia	0.29 Kg	

Fuente: Elaboración propia.

Esta diferencia representa un 0.22% del valor máximo de los resultados y un 0.23% del mínimo.

Como se puede apreciar de ambas maneras llegamos al mismo resultado, partiendo de volúmenes conocidos y valor de presiones de trabajo.

3.10- Cálculos de la Torre del Filtro de Biogás.

Asumimos q la forma que tendrá el filtro es cilíndrica, (al menos en su parte central donde estará depositada la carga de Fe_2O_3), se fija su diámetro, se calcula el área de la circunferencia, y a partir de la fórmula de volumen del cilindro se despeja la altura 1 q debe tener para el volumen de Fe_2O_3 calculado.

Conversiones.

Densidad del Fe_2O_3 ($\rho_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 5242 \text{ Kg/m}^3$).

Volumen de Fe_2O_3 para 126.21 Kg

$V_{Fe_2O_3} = \frac{126.1}{5242} = 0.024m^3$ Entonces la masa que necesitamos ocupará un volumen en el filtro de $0.024 m^3$.

Fijo el Diámetro (2 veces el radio) se toma un valor arbitrario.

Diámetro $\varnothing = 0.154m$

Radio $r = \frac{0.154m}{2} = 0.077m$

Calculamos el Área de la Circunferencia.

$A = \pi r^2$ (Área de la superficie)

$A = 3.14(0.077m)^2$

$A = 0.0186m^2$

Calculamos la Altura del Material en un Filtro de Diámetro 0,154 m.

$V = A_B \times h_1$

$h_1 = \frac{V_{Fe_2O_3}}{A_B}$

$h_1 = \frac{0.024m^3}{0.0186m^2}$

$h_1 = 1,29 m$

$h_1 = 129 cm$

La Altura de la Capa de Material para 365 Días es de 129 cm o 1.29 m.

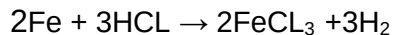
La proporción entre la altura y el diámetro es de 1 a 3 ó 4 veces. Siempre que tenga forma de cilindro no existe un número óptimo de diámetro.

3.11- Proceso de Transformación de la Viruta en Fe_2O_3 .

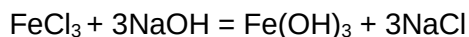
Es preciso tratar las virutas. A continuación el proceso y las ecuaciones balanceadas

- Se coge la viruta (del torno o de la fresadora) y se lava con detergente para eliminar la grasa y otras suciedades que puedan traer.
- Se deja secar la viruta.

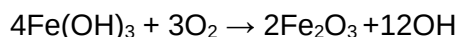
- Se prepara una solución al 5 % de HCL (ácido clorhídrico) y se sumergen las virutas limpias.



- Se sumerge la viruta entre 5 y 10 minutos dentro del ácido.
- Escurrirla y dejarla secar al aire.
- Preparamos una solución de NaOH (Hidróxido de Sodio o sosa cáustica) al 5 %.
- Se sumerge de 5 a 10 minutos.



- Se deja secar al aire.



¿Qué ocurre?

Que las virutas se han convertido en Fe_2O_3 , compuesto que sí reacciona rápidamente con el H_2S . El Fe_2O_3 obtenido se echa en el filtro.

¿Cuántos Kilogramos de viruta se necesitan para producir los 126,21 Kg de Fe_2O_3 ?

Teniendo en cuenta que en ninguna de las reacciones anteriores se produce ningún residual de hierro, podemos plantear que la cantidad de hierro final y la inicial son las mismas, por tanto debemos conocer de los 126,21 Kg de Fe_2O_3 cuantos Kgs pertenecen al (Fe) y cuantos pertenecen al (O) asumiendo que las virutas estarán compuestas de hierro.

Ya conocemos que: 1 mol de $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 159,68 \text{ g}$

Masa atómica del (Fe) = 55,845

Masa atómica del (O) = 15,999

$$55,845 \cdot 2 = 111,69 \text{ g}(\text{Fe}_2)$$

$$15,999 \cdot 3 = 47,99 \text{ g}(\text{O}_3)$$

$$\text{Comprobando: } 111,69 \text{ g} + 47,99 \text{ g} = 159,68 \text{ g}$$

Por tanto por cada mol de Fe_2O_3 tenemos 111,69 g de hierro.

Necesitamos saber cuantos moles de esta sustancia hay en el filtro, por lo que dividimos la masa de Fe_2O_3 entre su masa molar.

$$126,21 \text{ Kg} = 126210 \text{ g}$$

$$\frac{126210g}{159,68g} = 790,35$$

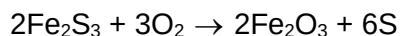
Tenemos 790,35 Moles de Fe_2O_3 . Esto multiplicado por los gramos de hierro en cada mol:

$$790,35 \cdot 111,69g = 88275,1563g$$

$$= 88,27 \text{ Kg}$$

Entonces necesitamos una masa de 88,27 Kg de hierro (virutas) para producir 126,21 Kg de Fe_2O_3 .

Esta viruta tratada y transformada en Fe_2O_3 reacciona con el H_2S y forma $\text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$. El agua es drenada del filtro al condensarse, y una vez reaccionado todo el Fe_2O_3 y transformado en Fe_2S_3 terminados los 365 días de operación, se puede regenerar de 8 a 10 días al aire y se vuelve a utilizar.



Se utiliza hasta que la viruta se pulveriza puesto que en este formato el gas ya no pasaría por la columna de la sustancia al compactarse. En realidad no se sabe cuántas veces se puede usar el material (3, 4, veces) depende del H_2S del gas, del excremento utilizado y de cómo es el proceso de tratamiento en el digestor.

Figura 11.

Proceso de producción de Fe_2O_3 .

Lava
Granos de
Lavado con
detergente



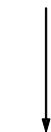
Secar



Solución al
5 % de
HCl
purificar



Se sumerge
entre 5 y 10
minutos



Solución al
5 % de NaOH



Escurrirla



Secar
Al
Aire



Fe₂O₃
obtenido
Empaquetar

Fuente: Elaboración propia.

3.12- Descripción del Filtro.

El filtro es un cilindro que en su interior carga el óxido ferroso. Para que el gas pueda entrar y salir se sitúa una criba en la cabeza de abajo y otra en la cabeza de arriba.

Sección Inferior: Esta parte incluye el tubo del gas no filtrado por donde ingresa el biogás “sucio” para ser posteriormente filtrado, la criba inferior que sustenta la carga de Fe_2O_3 y separa dicha carga del tubo de entrada, y, un drenaje para permitir la salida del agua que se condensará con el uso.

Sección Media: Esta es la sección cilíndrica donde se pone el óxido ferroso. Esta sección es la que determina la altura del filtro y donde la carga queda separada de la entrada y salida del filtro por ambas cribas, superior e inferior respectivamente.

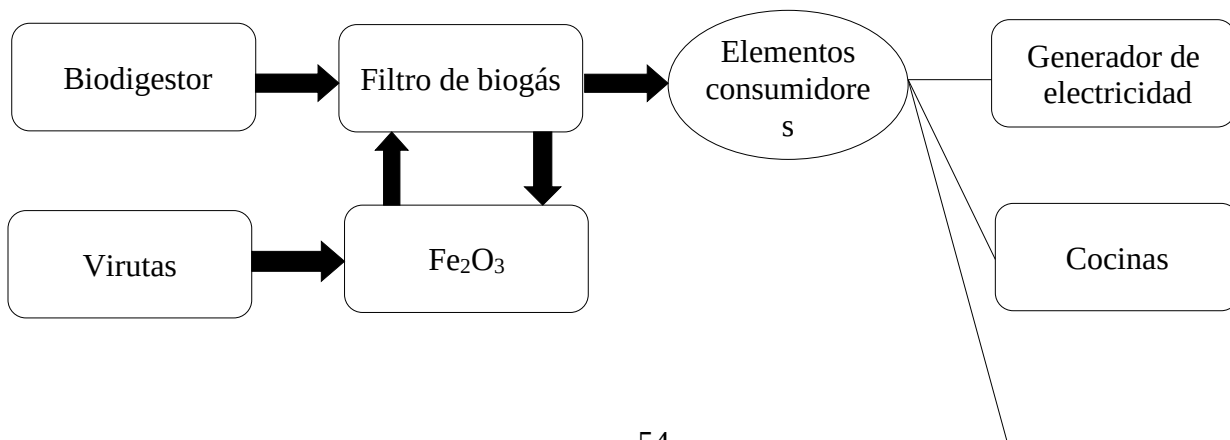
Sección Superior: aquí se encuentra la salida del gas filtrado, el tubo de salida, y la criba superior, una tapa para el fácil mantenimiento del filtro, para cargar y descargar el Fe_2O_3 .

3.13- Proceso de Filtración:

El gas no filtrado cruza la entrada y se mueve en la dirección vertical, atraviesa la criba y sube a la sección media donde el H_2S es adsorbido por el óxido ferroso. El gas filtrado sale por el tubo de salida en la tapa del filtro.

Figura 12.

Proceso de filtración del biogás.



Fuente: Elaboración propia.

Tras la filtración de los gases de impureza, el componente restante del biogás, se conduce a los objetos consumidores. El biogás se enriquece entonces por la alta temperatura. Los objetos consumidores, por tanto, no se corroen mucho y aumentan el tiempo de uso: para el generador de electricidad, la alta temperatura del biogás reduce el consumo del combustible, además el motor no se oxida por el H_2S ; mientras para los objetos de cocina o iluminación se facilita el encendido del fuego y disminuye el tiempo para alcanzar la temperatura necesaria.

3.14- Materiales de los que se Puede Fabricar el Filtro.

3.14.1- Filtro hecho de Plástico PVC

Este es un material económico y disponible en el mercado. Al elaborar el filtro con este material, se debe tomar en cuenta el requisito de la hermeticidad, en especial, en los puntos de unión tiene que ser capaz de soportar presiones de 0,2atm.

Con este material, el filtro no se fricciona por el H_2S . Se puede colocar el instrumento en un lugar fijo y se conecta al sistema de tubo a los objetos consumidores. Asimismo, el filtro no pesará tanto ni ocupará mucho espacio, y es fácil la sustitución de la sustancia filtradora periódicamente.

3.14.2- Filtro hecho de Acero Inoxidable.

Una alta resistencia y la absoluta hermeticidad son las ventajas de este material. Además, un filtro hecho de este material tendrá la forma de un producto industrial, muy atractivo en el mercado. Un instrumento hecho de este material es más caro que el de plástico. Un filtro de acero inoxidable sólo se puede elaborar en algunas fábricas especializadas, no es tan popular como el plástico y requiere técnicas más complejas. En la producción de este tipo de filtro, debe prestar atención también en los puntos de soldadura para que sean herméticos y soporten la presión de 0,1 atm. En la práctica, es cómodo el uso de este filtro, la sustitución de la sustancia filtradora no requiere de complejas técnicas.

3.15- Tecnología de Fabricación del Filtro.

Teniendo en cuenta lo práctico que resulta el material, y la simplicidad que representa su uso para la

fabricación de este filtro, se propone utilizar el plástico PVC con las siguientes características técnicas:

Tabla 8.

Características técnicas del plástico PVC.

Propiedades Térmicas		
Calor Específico (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	1000-1500	
Coeficiente de Expansión Térmica (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	75-100	
Conductividad Térmica a 23C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,12-0,25	
Temperatura Máxima de Utilización (C)	50-75	
Temperatura Mínima de Utilización (C)	-30	
Temperatura de Deflación en Caliente - 0.45MPa (C)	70	
Temperatura de Deflación en Caliente - 1.8MPa (C)	67	

Características físicas	Valor	Unidades
Peso específico	- 1.36 - 1.40	- gr/cm ³ a 25°C
Variación longitudinal máx.	> 5 segundos NCh 1649	%
Coeficiente de dilatación térmica	0.08	mm/(m°C)
Inflamabilidad	Autoextingible	-
Coeficiente de fricción	n = 0.009 =150	Manning Hazen Williams
Punto Vicat	76 (T° de ablandamiento)	°C
	4	50/60 ciclos
Constante dieléctrica	3,4 3	800 ciclos >1 Millón de ciclos
Factor de disipación	0,02-0,04	800 mil a 1 millón de ciclos
Resistencia dieléctrica	20	Kw / mm
Conductividad térmica	35×10-5	Cal × cm / (cm ² ×s×°

		C)
Tensión de diseño	100	kg/cm ²
Resistencia a la tracción	450 a 550	kg/cm ²
Resistencia a la compresión	610	kg/cm ²
Módulo de elasticidad	30.000	kg/cm ²
Resistencia al aplastamiento	Hasta 0,4 veces el Ø sin fisuras ni roturas (según normativa chilena)	-
Elongación hasta la rotura	15	%
Resistencia Química	-	-

Además, las tuberías y accesorios de PVC resisten presiones de trabajo por lo general superiores a los 63 PSI $\approx$ 4,28 atm lo cual es más que suficiente para este filtro, es prácticamente inmune a la corrosión causada por sustancias naturales del suelo o por productos químicos agrícolas. Por lo tanto, no es degradable y no requiere ninguna protección especial lo que se traduce en ahorro de costes. La calidad del fluido transportado permanece siempre inalterada. El proceso de fabricación de las tuberías de PVC requiere menos cantidad de energía que la necesitada para fabricar tuberías de otros materiales con lo que se convierten en altamente eficientes. Las pérdidas de presión se minimizan debido a que estas tuberías tienen una pared interior extremadamente lisa. Además tenemos el agregado de menor coste de instalación, una de las principales ventajas de las tuberías de PVC es el rendimiento en metros / hora de instalación en comparación con otras soluciones. Sumado a estas características, tenemos la peculiaridad de que existe un amplio mercado de proveedores con marcas certificadas de estos materiales, la estandarización de los diámetros y dimensiones de los accesorios hacen que este material sea el ideal para construir el filtro, sin necesidad de mecanizados complejos ni técnicas avanzadas.

3.15.1- Conformar la Sección Media.

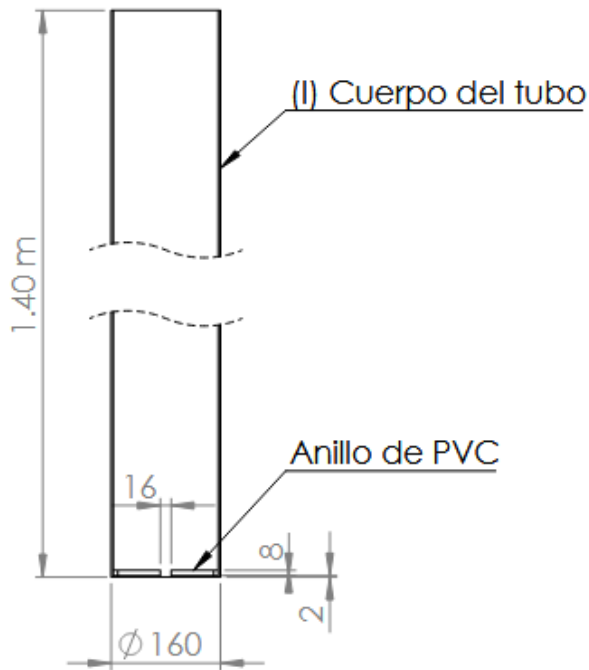
- Marcar con la cinta métrica la longitud (1.40 m) del tubo (I) que se va a cortar con la segueta, la segueta debe tener sus dientes limpios y afilados, luego de cortar retirar los excesos que queden en el tubo de PVC con lija o lima. (En lo adelante “cortar” hace referencia al proceso de medir y realizar el corte con la segueta). (Ver figura 13)
- Con limpiador para PVC, limpiar el borde del tubo por dentro y por fuera, retirando la

suciedad, grasa o humedad, esto permitirá que peguen mejor a las conexiones. (El proceso de limpieza queda implícito después de cada corte)

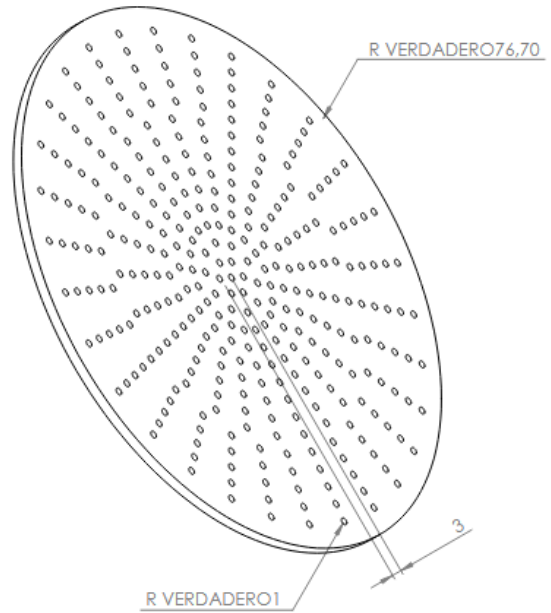
- Con una lija fina pulir un poco el extremo inferior del tubo, luego realizar una marca la cual determine hasta donde va a llegar la conexión, (por lo general 40 cm es lo que se superponen las piezas al ser pegadas)
- Cortar un anillo de 8 mm de longitud del tubo de Ø6 pulgadas sobrante, luego cortar el anillo por su diámetro, recortar las puntas a 8 mm. Este será el soporte para la criba inferior, la separación restante de 16 mm al recomponer el anillo es el espacio para insertar la criba cuando se ensamble el filtro. (Ver figura 13)
- Ahora con la brocha integrada en la tapa de la lata de pegamento, aplicar en el exterior del anillo para pegarlo al interior del tubo (I), a 2 mm del borde inferior. En lo adelante “pegar” se refiere al proceso de limpieza, aplicación del pegamento y adhesión de las partes. (Ver figura 13)
- Cortar una lámina de acero ST 316, espesor 3mm, formar un disco de 153 mm de diámetro, emplear equipo de corte oxi-acetilénico. Taladrar la cara, agujero Ø2 mm con patrón circular como muestra la figura 13.1. Colocar la criba 1 sobre el anillo de PVC, como se muestra en la Figura 17.

Figura 13.

Parte media del filtro (A) y criba 1 (B).



A



B

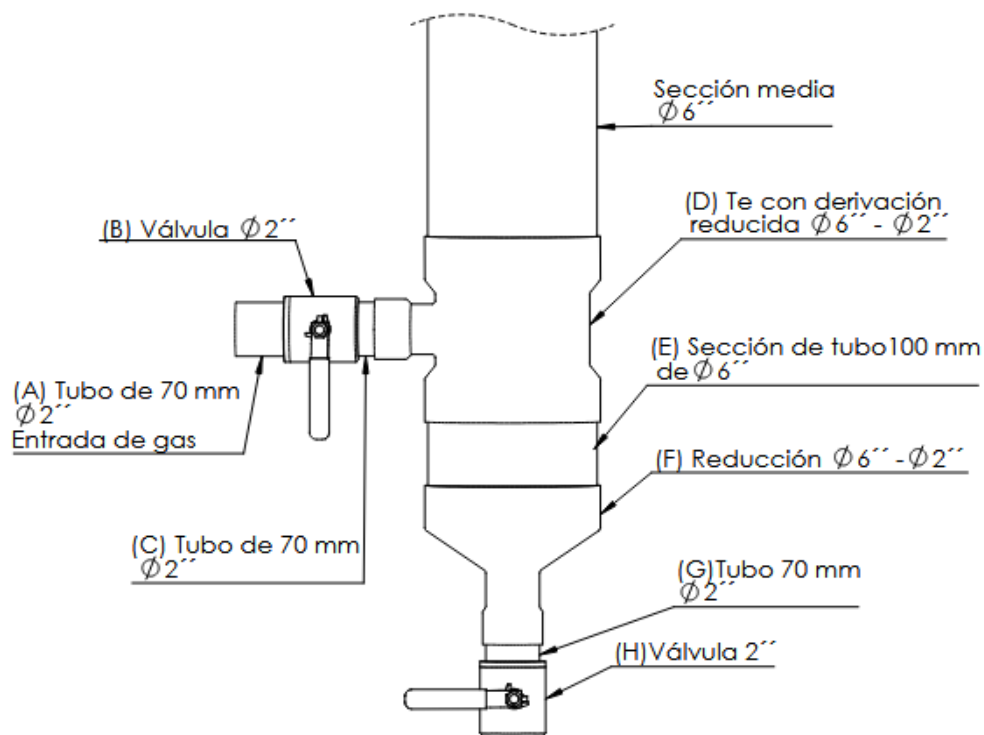
Fuente: Elaboración propia.

3.15.2 - Conformar la Sección Inferior.

- Pegar la Te (D) reducida hembra – hembra de Ø6 – Ø2''. (Ver figura 14)
- Cortar una sección del tubo (G) de Ø6'' sobrante a una longitud de 100 mm, pegar a continuación de la Te (D).
- Pegar la Reducción (F) hembra – hembra de Ø6'' – Ø2'' a continuación. (Ver figura 14)
- Pegar 70 mm de tubo (G) Ø2'' para drenaje. (Ver figura 14)
- En la derivación de la Te (D) pegar 70 mm de tubo de Ø2'' (C). Para la entrada de gas. (Ver figura 14)
- Roscar los tubos (C) y (G) de entrada y drenaje respectivamente, usar terraja de Ø2'', HSS Co 5 Rosca NPT, para roscar tubos de PVC. Hacer rosca de 15mm.
- Enroscar las válvulas (B) y (H).

Figura 14.

Parte inferior del filtro.



Fuente: Elaboración propia.

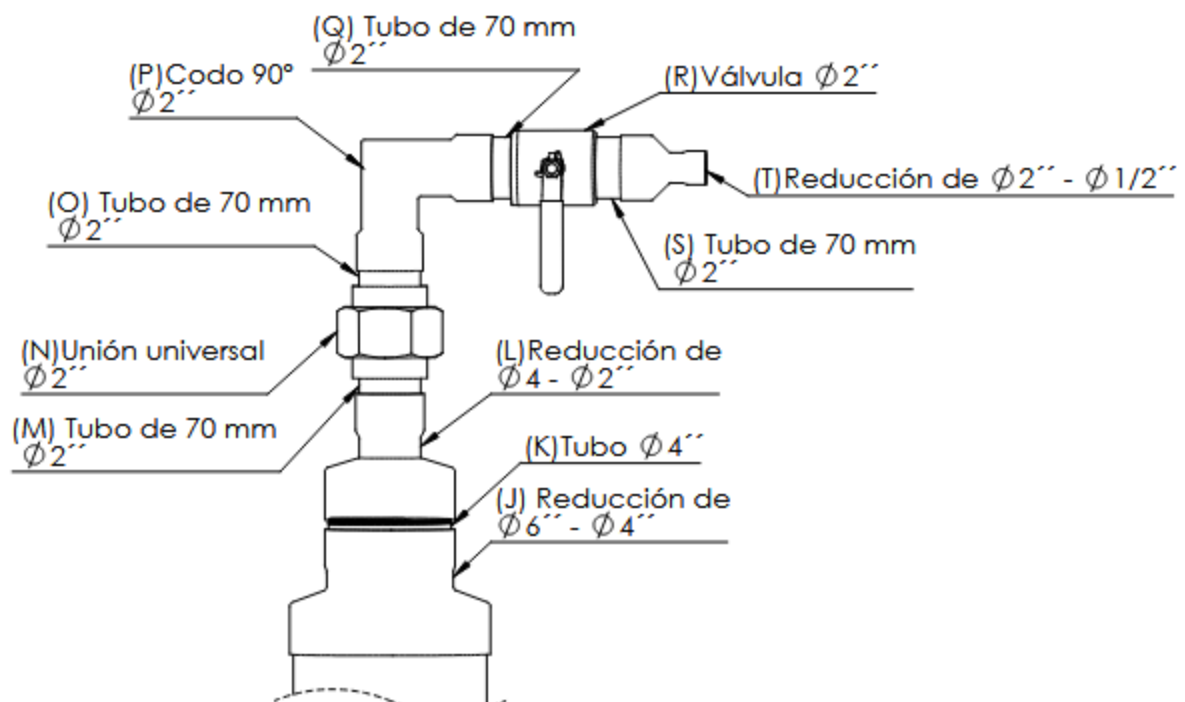
3.15.3 – Conformar la Sección Superior.

- Pegar Reducción (J) en (I) de $\text{Ø}6'' - \text{Ø}4''$ hembra hembra.
- Cortar anillo de longitud 10 mm, $\text{Ø}95.6$ mm pegar por el interior de (K) a 10 mm del borde inferior.
- Pegar tubo (K) en (J) $\text{Ø}4''$
- Colocar junta de goma $\text{Ø}101.6$ y 3mm a tope con (K).
- Roscar (K), usar terraja ajustable a $\text{Ø}4''$, con dientes HSS Co 5 Rosca NPT, longitud – 40mm.
- Cortar una lámina de acero ST 316, espesor 3mm, formar un disco de $\text{Ø}95.6$ mm, emplear equipo de corte oxi-acetilénico. Taladrar la cara, agujero $\text{Ø}2$ mm con patrón circular como muestra la figura 15.1. Colocar la criba 2 sobre el anillo de PVC, como se muestra en la Figura 16
- Enroscar Reducción (L) de $\text{Ø}4'' - \text{Ø}2''$, roscada en hembra $\text{Ø}4''$ a (K).
- Cortar 70 mm y pegar a continuación tubo (M) de $\text{Ø}2''$. Roscar el extremo saliente, usar terraja de $\text{Ø}2''$, HSS Co 5 Rosca NPT, para roscar tubos de PVC. Hacer rosca de 15mm.
- Acoplar unión universal roscada (N) al tubo (M).

- Roscar tubo (O) de 50 mm, Ø2 pulgadas, acoplar a la unión universal roscada (N).
- Pegar codo (P) de 90º, Ø2 pulgadas a continuación.
- Cortar y pegar 70 mm de tubo (Q) de Ø2'' a continuación del codo (P). Roscar el saliente, usar terraja de Ø2'', HSS Co 5 Rosca NPT, para roscar tubos de PVC. Hacer rosca de 15mm.
- Enroscar la válvula de tiro rápido (R) Ø2''.
- Cortar 70 mm de tubo (S) de Ø2'' y roscar 15mm con terraja de Ø2'', HSS Co 5 Rosca NPT, acoplar a la válvula (R).
- Pegar la reducción (T) de Ø2'' – Ø(½)'' para la salida del gas.

Figura 15.

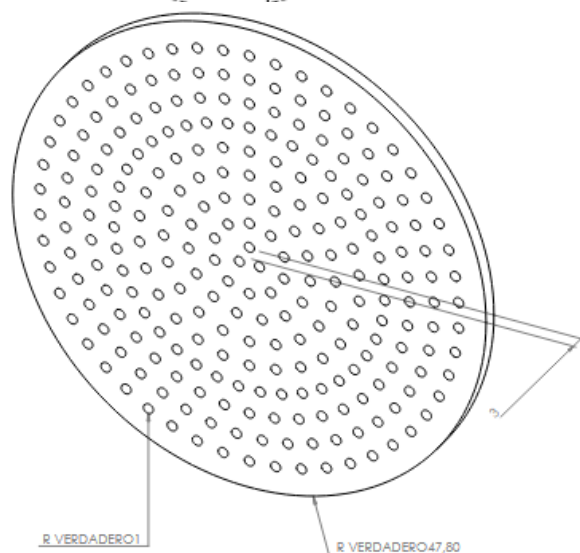
Parte superior del filtro.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15.1.

Criba 2



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9.

Observación sobre las Uniones:

Unión	Roscada	Pegada
Sección Inferior		
A - B	x	
B - C	x	
C - D		x
D - E		x
E - F		x
F - G		x
G - H	x	
D - I	x	
Sección superior		
I - J		x
J - K		x
K - L	x	
L - M		x
M - N	x	
N - O	x	
O - P		x
P - Q		x
Q - R	x	
R - S	x	
S - T		x

Fuente: Elaboración propia.

En uniones roscadas aplicar teflón para plomería.

3.15.4 - Montaje del Filtro.

Fijar el cuerpo del filtro a la pared, utilizar 2 abrazaderas de acero con revestimiento de goma para tubos de Ø6'', abrir el filtro por la reducción (L) Ø4'' – Ø2'' roscada en la parte superior, llenar con las virutas, colocar la criba superior y cerrar nuevamente para completar el ensamblaje.

3.15.5 – Puesta en Funcionamiento.

Para comenzar el uso, conectar la entrada del filtro (A) al biodigestor, la salida (T) al consumidor, cerrar la válvula de drenaje (H), abrir las válvulas de entrada y salida del gas (B) y (R).

3.16- Predeterminación del Costo de Fabricación del Filtro.

El costo de producción constituye un instrumento de control y de vital importancia, ya que el análisis del mismo refleja el conjunto de gastos incurridos en la fabricación del producto o prestación de servicio. Es también la expresión monetaria de los gastos de producción, es decir, los gastos corrientes de las empresas en la elaboración de la producción. En ella se incluyen los gastos de materias primas y materiales auxiliares empleados en cualquier tipo de fabricación, los gastos de trabajo humano que representamos por salario, la parte de los activos fijos tangibles que se transfieren al producto en forma de depreciación, el valor de la energía consumida, los gastos por concepto de seguridad social, así como otros gastos necesarios que apoyan indirectamente todo tipo de fabricación. El costo como categoría económica expresa la eficiencia en el trabajo, constituye un indicador generalizador de la calidad y permite comparar la producción obtenida y la magnitud de los gastos incurridos en su fabricación, reflejando en el ahorro de los recursos materiales, humanos y financieros. Los principales elementos del costo de producción expresado en forma monetaria son:

- El valor de las materias primas.
- Materiales auxiliares empleados en la fabricación.
- Los gastos relacionados con el trabajo humano, que compensa los valores de los productos para sí, representándolo por el salario.
- La parte de los activos fijos tangibles que se transfieren al producto en forma de depreciación.
- El valor de la energía consumida.
- Los gastos indirectos y otros gastos.

Para este trabajo se han considerado solamente los costos de las piezas y algunas de las materias primas principales, puesto que una valoración económica más detallada dependerá de la persona natural o jurídica que se dé a la tarea de construir este filtro, por tanto manteniendo el marco puramente teórico se presenta el costo aproximado para este diseño.

Tabla 10.

Valor de las materias primas.

Pieza	Precio	Cantidad	Suma
Tubo – 6''.	7.96 usd / m	2 m	15.92 usd
Tubo – 4''.	2.20 usd / 4 m	1 m	2.20 usd
Tubo – 2''.	3.30 usd / 3 m	1 m	1.1 usd
Te reducida de 6'' - 2''.	4.83 usd / u	1 u	4.83 usd
Reducción de 6'' - 2''.	3 usd / u	1 u	3 usd
Reducción de 6'' - 4''.	2.78 usd / u	1 u	2.78 usd
Reducción roscada de 4'' - 2''.	14 usd / u	1 u	14 usd
Reducción de 2'' - (1/2)''	1.80 usd / u	1 u	1.80 usd
Codo 90°, 2''.	1.60 usd / u	1 u	1.60 usd
Union universal roscada 2''.	1.13 usd / u	1 u	1.13 usd
Válvula de tiro rápido 2''	15 usd / u	3 u	45 usd
Pegamento de pvc.	6.14 usd/u	1 u	6.14 usd
Limpiador para tuberías de PVC.	3 usd/u	1 u	3 usd
Abrazadera	2 usd/u	2 u	4 usd
Total	-	-	106.5 USD

Material	Precio	Cantidad	Suma
HCL – 32%	\$ 4049 CUP/Ton	1 L	\$ 4.04
NaOH – 50%	\$ 10646 CUP/Ton	1 L	\$ 10.64
Viruta de acero	\$ 0.40 CUP/Kg	126 Kg	\$ 51
Total	-	-	\$65.58 CUP

Fuente: Elaboración propia.

La tasa de cambio vigente según el Banco Central de Cuba con respecto al dólar es de:

TC: 1 USD – 24 CUP

TC población: 1 USD -120 CUP

105.5 USD = 2532 CUP

2532 CUP + 65.58 CUP

2597.58 CUP = 108.23 USD

Tabla 11.

Comparación de precios.

Filtro del mercado	Filtro fabricado
649 USD	108.23 USD

Fuente: Elaboracion propia

3.17 – Características Técnicas Esperadas para el filtro.

Altura del filtro: 2,21 m.

Masa: 132.3 Kg.

Material: Plástico PVC.

Presión de trabajo máx: 5 atm.

Temperatura de trabajo máx: 40° C.

Sustancia filtradora: Fe_2O_3 .

Ciclo de cambio de la sustancia filtradora: 365 días.

Vida útil: 50 años.

Conclusiones parciales del Capítulo III:

Al término de este capítulo podemos decir que disponemos de un método de cálculo que propone el diseño de un filtro usando materiales relativamente de fácil acceso, en comparación con otros métodos que exigen sustancias químicas más complejas y/o materiales de más alta tecnología de fabricación como membranas y carbón activado.

- La sustancia filtrante a partir de la cual funciona el filtro es de fácil acceso, se podrá fabricar de manera sencilla.
- Los materiales a utilizar pueden ser de bajo costo y de un diseño simple.
- Mediante este método no será necesario un mantenimiento periódico, basta con cargar el filtro una vez para que esté en funcionamiento por 365 días.
- El Fe_2O_3 después de usarse se puede regenerar con solo exponerlo al aire atmosférico para volver a ser usado después de un año de explotación.
- No se requieren equipos colaterales consumidores de energía para el funcionamiento del filtro.
- No se consume agua como en el caso de los métodos mojados.
- Al estar fijado el coeficiente de seguridad en 2, es menos probable que algún contenido de H_2S escape del filtro.
- Se requiere precaución al trabajar con las sustancias químicas HCl y NaOH, son agentes químicos ácidos y corrosivos, a pesar de que sus concentraciones sean del 5% al ser usado pueden representar peligro si hay contacto con los ojos o mucosas, además no deben ser ingeridos bajo ninguna circunstancia. Por lo tanto es necesario proteger los ojos la piel y las vías respiratorias.

Conclusiones generales:

De manera general podemos concluir que este diseño se presenta como una alternativa atractiva y solucionadora, gracias a la aplicación de un método de filtrado usando el Fe_2O_3 se podrá lograr eliminar el gas H_2S que como ya hemos afirmado anteriormente es el causante de la corrosión en equipos consumidores, de daños a la salud humana y de la contaminación ambiental consecuente con su emisión descontrolada a la atmósfera. Toda tecnología produce en mayor o menor medida un impacto ambiental, la rápida obsolescencia de la tecnología y la oferta constante de nuevos productos generan una gran cantidad de residuos, estos contienen a menudo sustancias tóxicas, que pueden filtrarse en el subsuelo y afectar al agua si no se gestionan adecuadamente. El agotamiento de los recursos energéticos debido a la utilización masiva y creciente de fuentes primarias y no renovables como el petróleo aumentan de manera acelerada la contaminación y por lo tanto la desaparición de hábitats y de especies, tanto animal como vegetal. Teniendo esto en cuenta, este trabajo se ha propuesto desde el diseño construir el filtro a partir de materiales simples, con estándares de fabricación de acuerdo a las normas ambientales internacionales, y de carácter duradero.

Recomendaciones:

Se recomienda poner en práctica esta tecnología, y de manera práctica ser capaces de medir los parámetros de funcionamiento del filtro. Comprobar el efecto de la temperatura, la presión y la humedad en el rendimiento del filtro.

Estudiar más a fondo la reacción química que corresponde a la regeneración de la viruta después de usarse ya que esta estará expuesto a la atmósfera. Esta sustancia se expone al aire donde precipita el azufre y de nuevo se recupera el Fe_2O_3 que podía reutilizarse durante un cierto número de ciclos de sulfurización/oxidación. El azufre depositado podría quemarse a SO_2 para obtener ácido sulfúrico, o bien extraído con disolvente y recristalizarlo en condiciones alcalinas. El SO_2 es un gas incoloro con un característico olor irritante. Se trata de una sustancia reductora que, con el tiempo, el contacto con el aire y la humedad, se convierte en trióxido de azufre. La velocidad de esta reacción en condiciones normales es baja. Por lo tanto para la reutilización de la sustancia filtrante se recomienda un estudio más profundo del tema.

En el caso de necesitar columnas de Fe_2O_3 excesivamente grandes por el volumen de biogás a filtrar, es posible segmentar el filtro y dividirlo en dos o tres partes iguales de ser preciso y conectarlas en serie, por tanto se recomienda estudiar más a fondo esta variable.

Se deja abierta la posibilidad de diseño con el precedente de este trabajo de construir un filtro en acero inoxidable y estudiar su factibilidad, ya que este es también un material mucho mas duradero que el plástico y de mayor atractivo para la industria.

Referencias bibliográficas

- Álvarez López, A., Pentón Martínez, E., Pérez Rodríguez, D., (2023). Delegación de CubaSolar en Cienfuegos. Centros de Estudios Ambientales de Cienfuegos.
- Becerra, C. A. R. (2017). *Los biodigestores: fuente de desarrollo sostenible y calidad de vida en comunidades rurales de Colombia*. (Tesis de Grado Facultad de Ingeniería Geográfica y Ambiental). Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A.).
- Benítez Gutiérrez, O., Costa Pérez, I., Águila Cabrera, I., Boyle, G. E., (2004). *Renewable energy*. Oxford University.
- Campus, da Zapateira. (2020). Digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica. (Tesis de Grado de la Facultad de Ciencias). Universidad de Coruña.
- Defra., (2010). *Anaerobic. de digestión*. <http://www.biogas-info-co.uk/ind,ex.php/localgovernment>.
- Deublein, D., and Steinhauser, A., (2008). *Biogas from Waste and renewable Resources: An Introduction*. Wiley-VCH, Weinheim.
- España. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST)., (2019). *Límites de exposición profesional para agentes químicos en España*.
- García, G. D. J. G., (2012). *Biogás: una alternativa ecológica para la producción de generalidades. (Monografía)*. Colección de Estudios de Casos Experiencias en el enfrentamiento de energía.
- Leitón, J., (2014). *Purificación de biogás utilizando agua a presión, óxido de calcio y carbón*. (Tesis de Grado Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia). Universidad de San Carlos de Guatemala. Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas.
- López, A., Sayran, V., Suárez, J., (2020). La llama azul del biogás: Cabaiguán, una experiencia exitosa. Colección de Estudios de Casos “Experiencias en el enfrentamiento.
- Lujan, L. C., (2018). *Utilización del biogás como combustible*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Mae-Wan, H., (2008). Biogás bonanza for third world development. Institute of Science in metanol para su adaptación. *Revista ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, XXV(3), 33-38. México. Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM)., (2018). *Biogás en México: Lecciones aprendidas de los proyectos de cooperación 2018-2019. Informe cooperativo, lúster combustibles gaseosos, ib tech*, Danishenergy agency. Instituto de Ingeniería.
- Montalvo Martínez, S. J., (2000). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*.
- Obaya, y colectivo de autores, (1991). *Lodos anaerobios termófilos del proceso UASB. (t-III). Uso del del Cambio Climático*.
- Ortega, S. P. R., (2013). *Energía del biogás: Una opción sustentable para el medio rural y semiurbano*. Universidad Veracruzana Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Parrales, J. K. H. (2019). *Evaluación de la remoción del sulfuro de hidrógeno en el biogás mediante el método de la aireación*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias.
- Quintero, A. G. E., & Colindres, E. N. H. (2012). *Evaluación de medios filtrantes para la reducción del sulfuro de hidrógeno en el mejoramiento de la calidad del biogás*. Departamento de Ambiente y Desarrollo.

- Rivera, W. E. L., Vargas, F. G. L., & Flores, F. A. M., (2017). *Fundamentos teóricos y propuesta de un proceso para la práctica del envasado de biogás libre de CO₂ y H₂S en El Salvador*. (Tesis de Diplomado). Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. Universidad de El Salvador.
- Rodarte, M. A. M., (2017). *Ecodiseño de un sistema de remoción de sulfuro de hidrógeno en un biodigestor pecuario*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados Departamento de Estudios de Posgrado.
- Ruiz, I., Álvarez, J. A. y Soto, M., (2002). *El potencial de la Society*. [http:// www.issis.org.uk/biogasbonanza.php](http://www.issis.org.uk/biogasbonanza.php).
- Solís, R. I. M., (2018). *Simulación de la desulfuración de biogás por adsorción en un medio nano particulado de alta porosidad*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- Tutacano, E. G. C., (2017). *Diseño de un Biorreactor para generar biogás a partir de desechos orgánicos de animales en la irrigación de Majes – Caylloma*. (Tesis Postgrado). Facultad de Ingeniería de Procesos y Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de San Agustín.
- Varnero, M. T., (2011). *AGRIMED*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.
- Weber, B., (2012). *Producción de biogás en México*. Red Mexicana de Bioenergía, A.C.
- Zúñiga, I. C., (2007). *De Biodigestores*.

Anexos:

Tablas

Tabla 11.

Tabla Periódica de los Elementos.

The Periodic Table of the Elements

1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.003														
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797														
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050											13 Al Aluminum 26.981538	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973761	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948														
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938049	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80														
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29														
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.9055	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.078	79 Au Gold 196.96655	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)														
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (262)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 (269)	111 (272)	112 (277)	113	114																		
																		58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
																		90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Tabla 13

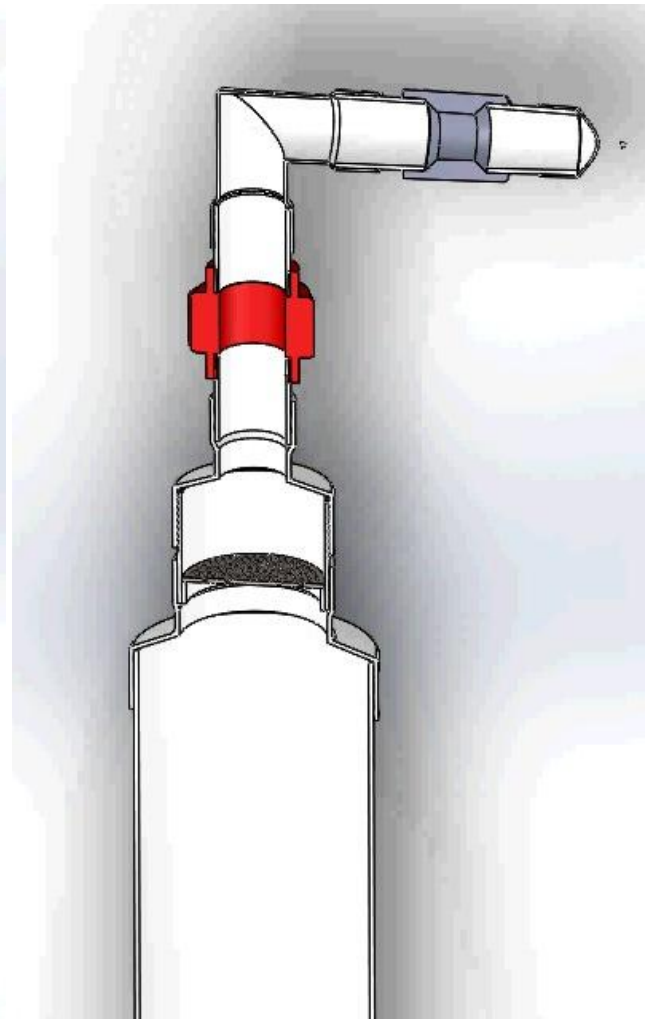
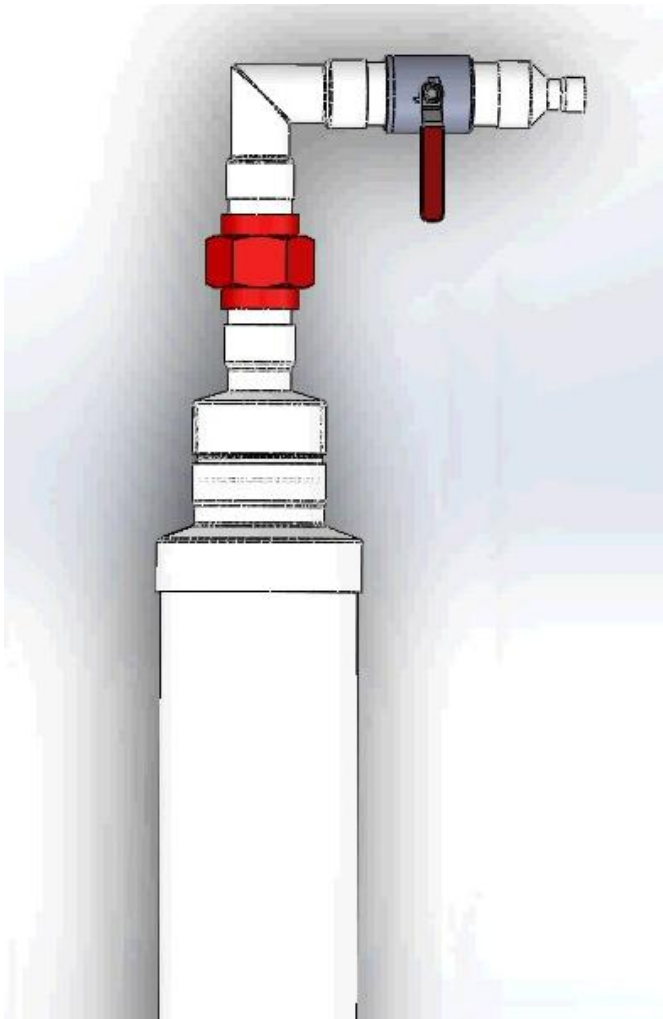
Listado oficial de precios del Grupo Empresarial de Reciclaje 2023.

516,1	Chatarra de metales ferreos			
516.1.11	Chatarra de acero			
516.1.11.0020	Chatarra acero h/ 800 x 500 x 500 mm	kg	0,60	1,00
516.1.11.0040	Chatarra acero fuera de medida	kg	0,40	0,40

Figuras

Figura 16.

Vistas preliminares del filtro sección superior.

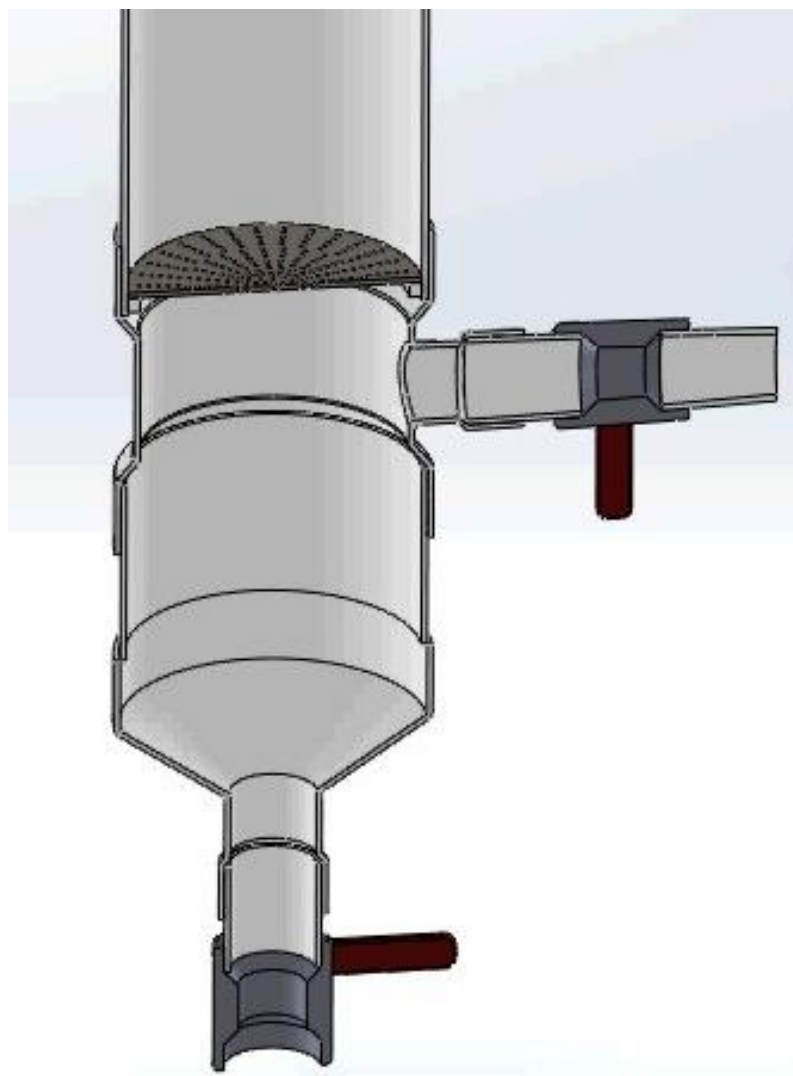


Criba 2

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17.

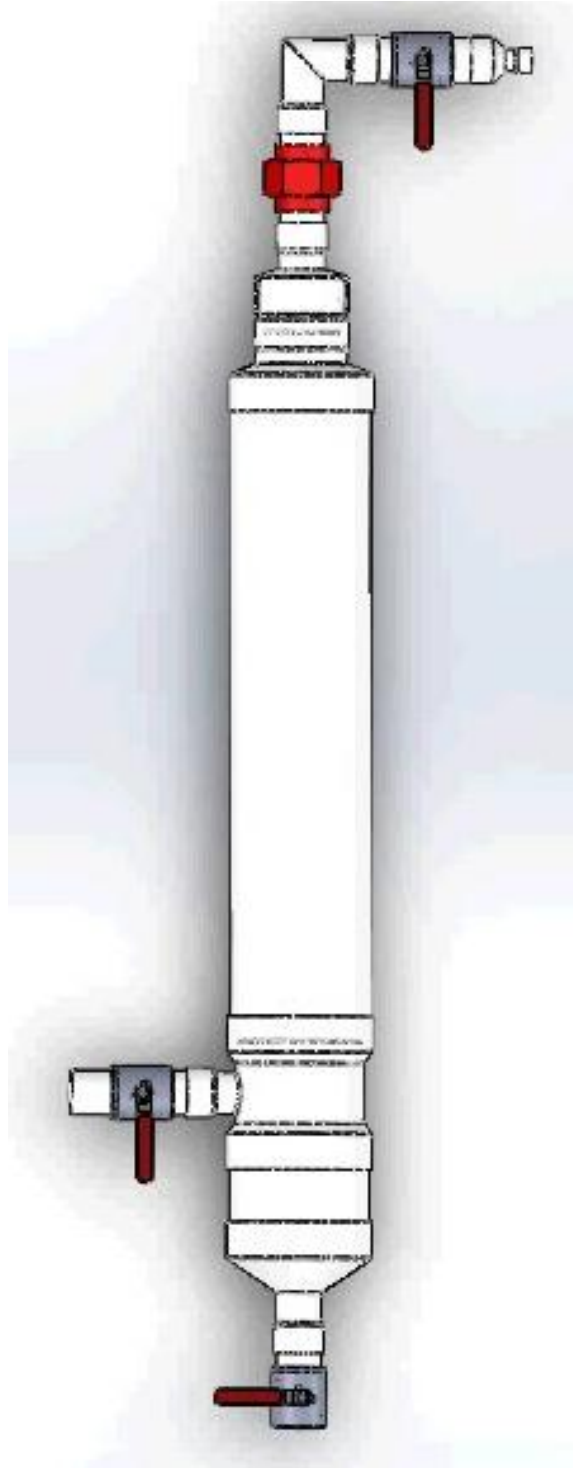
Vistas Preliminares del filtro sección inferior



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18.

Vista Preliminar del Filtro ensamblado.



Fuente: Elaboración propia.

Precio del Fe_2O_3 en el mercado.

Precio FOB de Referencia  [Conseguir Precio Último >](#)

US\$ 300,00-1.700,00 / Tonelada | **1 Tonelada** (Pedido Mínimo)

Color:	Yellow/ Brown
Apariencia:	Gránulo
tecnología:	cama seca fija
estándar de grado:	grado industrial
amable:	óxido anfótero
capacidad de azufre:	12-35%