



**Estudio del almacenamiento de gas metano en un biodigestor para la generación
de calor a través del uso de desechos orgánicos**

Macias Nastul, Victor Andrés

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Tecnología Superior en Electromecánica

Monografía, previo a la obtención del título de Tecnólogo Superior en Electromecánica.

Ing. Parreño Olmos, José Alfredo

03 de febrero 2022

Latacunga



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA
CERTIFICACIÓN

Certifico que la monografía, **“Estudio del almacenamiento de gas metano en un biodigestor para la generación de calor a través del uso de desechos orgánicos”** fue realizado por el señor **Macias Nastul, Víctor Andrés**, la cual ha sido revisada y analizada en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 03 de febrero 2022



Firmado electrónicamente por:
**JOSE ALFREDO
PARRENO OLMOS**

.....

Ing. Parreño Olmos, José Alfredo

C.C.: 050233718-1

REPORTE DE VERIFICACIÓN DE CONTENIDOS



TESIS_MACIAS ANDRES_BIODIGESTOR.pdf

Scanned on: 15:51 February 3, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	267
Words with Minor Changes	42
Paraphrased Words	569
Omitted Words	0



Firmado electrónicamente por:
**JOSE ALFREDO
PARRENO OLMOS**

Ing. Parreño Olmos, José Alfredo

C.C.: 050233718-1



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORIA

Yo, **Macias Nastul, Víctor Andrés**, con cédula de ciudadanía n°**1724244650** declaro que el contenido, ideas y criterios de la monografía: **“Estudio del almacenamiento de gas metano en un biodigestor para la generación de calor a través del uso de desechos orgánicos”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 03 de febrero 2022

Macias Nastul, Víctor Andrés

C.C.: 172424465-0



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE TECNOLOGÍA SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Macias Nastul, Victor Andrés**, con cédula de ciudadanía n°**1724244650**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar la monografía: ***Estudio del almacenamiento de gas metano en un biodigestor para la generación de calor a través del uso de desechos orgánicos*** en el Repositorio Institucional cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 03 de febrero 2022

Macias Nastul, Victor Andrés

C.C.: 172424465-0

Dedicatoria

Se la dedico primeramente a Dios por darme la fortaleza, salud y sabiduría para poder seguir adelante con mis proyectos.

A mi madre y a mi padre por siempre estar conmigo dándome el apoyo necesario, por confiar en mí siempre y por enseñarme los valores que hoy me definen.

A mi familia y amigos por ayudarme siempre que pudieron, y por darme el apoyo moral necesario.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por darme salud, familia y amigos y por permitirme cursar una carrera universitaria.

A mi madre y a mi padre por apoyarme en todo el transcurso de mi vida, y por siempre estar allí en todos mis proyectos.

A mi familia y amigos por darme apoyo y por acompañarme en el transcurso de mi vida.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación de contenidos.....	3
Responsabilidad de auditoría.....	4
Autorización de publicidad.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos.....	8
Índice de tablas	14
Índice de figuras.....	16
Índice de ecuaciones	18
Resumen	19
Abstract.....	19
Problema de Investigación.....	21
Tema.....	21
Antecedentes.....	21
Planteamiento del problema.....	22
Justificación	23
Objetivos.....	24
<i>Objetivo general.....</i>	<i>24</i>
<i>Objetivos específicos</i>	<i>24</i>
Alcance	24
Fundamentación teórica.....	26
Desechos orgánicos	26
<i>Residuos generados en el Ecuador.....</i>	<i>27</i>

<i>Biomasa</i>	28
<i>Origen de residuos orgánicos</i>	29
<i>Tipos de biomasa</i>	30
Biomasa natural.....	30
Biomasa residual	30
Biomasa residual húmeda	31
<i>Desechos agrícolas</i>	31
<i>Residuos ganaderos</i>	32
Biodigestor	33
<i>Componentes principales del biodigestor</i>	33
Cámara de entrada o carga	34
Reactor	34
Salida del efluente	34
Tanque de salida.....	34
Cúpula de gas	35
Válvulas de seguridad	35
Apaga llamas	36
Condensador de agua	37
Filtro de ácido sulfhídrico	38
<i>Tipos de Biodigestores</i>	38
Biodigestor de tipo chino.....	39
Biodigestor tipo hindú.....	40
Biodigestor horizontal.....	41
Biodigestor de Diseño Tubular	41
Biodigestor Realizado por Tanques	42
Digestión anaeróbica	43

<i>Etapas de la digestión anaeróbica</i>	43
<i>Parámetros físicos y químicos para la descomposición</i>	45
Concentración de oxígeno	45
Temperatura.....	45
Retención Hidráulica	46
pH	47
Macronutrientes y micronutrientes	47
Biogás	48
<i>Composición del biogás.....</i>	48
<i>Ventajas del uso del biogás</i>	49
<i>Desventajas del uso del biogás.....</i>	50
Dimensionamiento y análisis de factibilidad de un biodigestor.....	52
Parámetros a tener en cuenta para la instalación del biodigestor ...	52
<i>Factores básicos a tener en cuenta.....</i>	52
<i>Factores básicos a tener en cuenta (ubicación).....</i>	53
Factibilidad,rendimiento de los distintos tipos de biodigestores.....	54
<i>Dimensionamiento de los biodigestores</i>	54
<i>Ventajas y Desventajas del biodigestor tipo hindú</i>	55
Ventajas.....	55
Desventajas.....	55
<i>Ventajas y Desventajas del biodigestor tipo chino</i>	55
Ventajas.....	55
Desventajas.....	56
<i>Ventajas y Desventajas del biodigestor de diseño tubular....</i>	56
Ventajas.....	56
Desventajas.....	56

Parámetros para el dimensionamiento de un biodigestor	59
<i>Estiércol diario.....</i>	<i>60</i>
<i>Estiércol disponible.....</i>	<i>60</i>
<i>Mezcla del material con agua.....</i>	<i>61</i>
<i>Carga diaria que se coloca en el biodigestor</i>	<i>62</i>
<i>Tiempo de retención hidráulica (TRH).....</i>	<i>62</i>
<i>Consideraciones en base a la temperatura del biodigestor ..</i>	<i>63</i>
Parámetros a tener en cuenta con respecto al biogás	65
<i>Conducción del biogás.....</i>	<i>68</i>
Tubería de conducción del biogás	68
Salida del biogás	69
Primera válvula de control	69
Válvula de alivio del biogás	70
Válvula para la liberación de agua.....	71
Filtro de ácido sulfhídrico (H_2S).....	72
Gasómetro.....	73
Dimensiones y componentes del biodigestor de diseño tubular	73
<i>Volumen del biodigestor</i>	<i>73</i>
<i>Dimensiones de la zanja de un biodigestor tubular</i>	<i>76</i>
Consideraciones con respecto al terreno	78
<i>Ecuaciones generales con respecto a la materia orgánica ...</i>	<i>79</i>
Parámetros para un biodigestor de diseño tubular óptimo	80
<i>Características de la bolsa del biodigestor.....</i>	<i>80</i>
<i>Agitadores.....</i>	<i>81</i>
<i>Electrobomba estercolera</i>	<i>82</i>
<i>Sensores CH_4</i>	<i>83</i>

<i>Detector de ácido sulfhídrico.....</i>	83
Usos del biogás.....	85
<i>Equipos que Aprovechan la Energía Térmica del Biogás.....</i>	88
Cocina a biogás	89
Calefactores a biogás.....	89
Lámparas a biogás	89
Refrigerador a biogás.....	90
<i>Propiedades y características del biogás</i>	90
Estudio para la selección correcta del biodigestor	92
<i>Estimado de biogás que se requiere diariamente</i>	92
<i>Estudio enfocado en una zona climática cálida</i>	93
Cantidad de material orgánico requerido	94
Dimensiones del biodigestor en una zona cálida.....	97
<i>Estudio enfocado en una zona climática templada.....</i>	101
Cantidad de material orgánico requerido	102
Dimensiones del biodigestor en una zona fría	103
Biogás enfocado para la generación de calor.....	107
<i>Calefacción enfocada en la crianza de animales.....</i>	108
Funcionamiento de un calefactor a biogás.....	109
Factibilidad de calefactores a biogás.....	111
<i>Calefacción enfocada en domicilios.....</i>	113
Factibilidad de calefactores domiciliarios	117
<i>Equipos necesarios para la utilización del biogás</i>	119
<i>Factibilidad del almacenamiento de biogás.....</i>	122
Factibilidad del uso de un biodigestor para generar calor.....	125
<i>Costos de los implementos del biodigestor.....</i>	132

<i>Ahorro monetario</i>	135
<i>Recuperación de inversión</i>	135
Conclusiones y recomendaciones	137
Conclusiones	137
Recomendaciones	140
Bibliografía	141
Anexos	146

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Dimensionamiento de los biodigestores</i>	48
Tabla 2 <i>Evaluación de tres tipos de Biodigestores Convencionales</i>	57
Tabla 3 <i>Ventajas/ Desventajas de Biodigestores Domo Fijo y Domo Tubular</i>	58
Tabla 4 <i>Estiércol Diario producido por tipo de animal</i>	60
Tabla 5 <i>Cálculos para saber el Estiércol Disponible</i>	61
Tabla 6 <i>Relación de agua</i>	61
Tabla 7 <i>Relación con Respecto a la Temperatura y el TRH</i>	62
Tabla 8 <i>Temperatura del Biodigestor</i>	63
Tabla 9 <i>Producción estimada de biogás</i>	66
Tabla 10 <i>Longitudes en base a las circunferencias del biodigestor</i>	76
Tabla 11 <i>Dimensiones a, b, p, óptimas con respecto a la inclinación del talud</i>	79
Tabla 12 <i>Características del Motor de un Agitador de Biodigestor</i>	81
Tabla 13 <i>Características de una Electrobomba Estercolera</i>	82
Tabla 14 <i>Consumo del biogás por hora (l/h)</i>	87
Tabla 15 <i>Consumo de Biogás/ Hora de Algunos Equipos</i>	88
Tabla 16 <i>Equivalencias energéticas con respecto 1000 litros de biogás</i>	90
Tabla 17 <i>Características que presenta el biogás</i>	91
Tabla 18 <i>Valor Energético que presenta el biogás</i>	92
Tabla 19 <i>Consumo de biogás diario de distintos equipos</i>	93
Tabla 20 <i>Cantidad de Biogás Diario Producido por Estiércol de Animales</i>	95
Tabla 21 <i>Cantidad de Biogás Diario Producido por Residuos Vegetales</i>	96
Tabla 22 <i>Total de Biogás Diario Disponible</i>	96
Tabla 23 <i>Carga Diaria de Biodigestor</i>	97
Tabla 24 <i>Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor (en zona cálida)</i>	99
Tabla 25 <i>Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor(en zona cálida)</i>	100

Tabla 26 <i>Consumo de Biogás Diario de Distintos Equipos</i>	102
Tabla 27 <i>Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor(en zona templada)</i>	104
Tabla 28 <i>Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor(en zona templada)</i>	105
Tabla 29 <i>Comparación de los Biodigestores en Base a su Ubicación</i>	107
Tabla 30 <i>Lista de modelos de calefactores a biogás</i>	108
Tabla 31 <i>Comparación de las tres parideras</i>	113
Tabla 32 <i>Consumo de Calefactores Utilizando Biogás</i>	118
Tabla 33 <i>Consumo de Calefactores Utilizando Propano</i>	119
Tabla 34 <i>Características de un Cilindro de Gas Estandarizado</i>	122
Tabla 35 <i>Consumo Energético con Respecto a los Equipos del Biodigestor</i>	129
Tabla 36 <i>Consumo de Biogás Diario de Equipos de Calefacción</i>	130
Tabla 37 <i>Consumo Energético con Respecto a los Equipos de Calefacción</i>	131
Tabla 38 <i>Costo estimado de un Biodigestor de Diseño Tubular</i>	132
Tabla 39 <i>Ahorro monetario</i>	135
Tabla 40 <i>Recuperación de Inversión del Biodigestor de Diseño Tubular</i>	135
Tabla 41 <i>Dimensiones del Gasómetro</i>	148
Tabla 42 <i>Diámetro de tuberías</i>	149

Índice de figuras

Figura 1 <i>Porcentajes y Clasificación de la Basura Generada en el Ecuador</i>	28
Figura 2 <i>Ciclo de la Biomasa</i>	29
Figura 3 <i>Desechos Orgánicos</i>	30
Figura 4 <i>Desechos Agrícolas</i>	32
Figura 5 <i>Estiércol del Ganado</i>	32
Figura 6 <i>Funcionamiento Básico del Biodigestor</i>	33
Figura 7 <i>Partes de un Biodigestor</i>	35
Figura 8 <i>Válvulas de Seguridad</i>	36
Figura 9 <i>Apaga Llamas de un Biodigestor</i>	36
Figura 10 <i>Condensador de Agua de un Biodigestor</i>	37
Figura 11 <i>Filtro de Ácido Sulhídrico de un Biodigestor</i>	38
Figura 12 <i>Biodigestor Tipo Chino</i>	39
Figura 13 <i>Biodigestor Tipo Hindú</i>	40
Figura 14 <i>Biodigestor Horizontal</i>	41
Figura 15 <i>Biodigestor de Tipo Tubular</i>	42
Figura 16 <i>Biodigestor Realizado por Tanques</i>	43
Figura 17 <i>Etapas de la Digestión Anaeróbica</i>	44
Figura 18 <i>Conducción del biogás</i>	68
Figura 19 <i>Salida de Biogás en un Biodigestor de Diseño Tubular</i>	69
Figura 20 <i>Primera Válvula de Control</i>	69
Figura 21 <i>Válvula de Alivio del Biogás</i>	71
Figura 22 <i>Válvula para la Liberación de Agua</i>	72
Figura 23 <i>Esquema de un Cilindro</i>	75
Figura 24 <i>Esquema de una zanja trapezoidal</i>	77
Figura 25 <i>Agitador para Biodigestor Tubular</i>	81

Figura 26 <i>Electrobomba Estercolera</i>	82
Figura 27 <i>Detector de Ácido Sulfhídrico</i>	84
Figura 28 <i>Detector de Ácido Sulfhídrico en Presencia de Dicho Compuesto</i>	84
Figura 29 <i>Equipos que Aprovechan la Energía Térmica del Biogás</i>	86
Figura 30 <i>Lámpara a Biogás</i>	89
Figura 31 <i>Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor (en zona cálida)</i>	99
Figura 32 <i>Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor(en zona cálida).</i>	100
Figura 33 <i>Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor(zona templada)</i>	105
Figura 34 <i>Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor(zona templada)</i>	106
Figura 35 <i>Funcionamiento de un Calefactor a Biogás</i>	109
Figura 36 <i>Calefactor a biogás</i>	110
Figura 37 <i>Calefactor a Biogás enfocado para Gallinas</i>	110
Figura 38 <i>Sistema de Calefacción e Iluminación en un Criadero de Cerdos</i>	111
Figura 39 <i>Mediciones de Temperatura de Tres Parideras</i>	112
Figura 40 <i>Calefactor a Gas Metano (Biogás)</i>	114
Figura 41 <i>Modificación del Diámetro del Inyector de un Quemador</i>	115
Figura 42 <i>Funcionamiento de un Quemador a Biogás</i>	117
Figura 43 <i>Conducción de Biogás para un Calefactor</i>	120
Figura 44 <i>Conducción de Biogás para un Calefactor Domiciliario</i>	120
Figura 45 <i>Almacenamiento del Biogás a Presión</i>	122
Figura 46 <i>Características del Biodigestor a Estudiar</i>	126
Figura 47 <i>Cavado de la Zanja del Biodigestor</i>	150

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 <i>Producción diaria del biogás</i>	67
Ecuación 2 <i>Volumen del biogás</i>	67
Ecuación 3 <i>Volumen Líquido</i>	73
Ecuación 4 <i>Volumen Total</i>	74
Ecuación 5 <i>Circunferencia del Biodigestor Tubular</i>	75
Ecuación 6 <i>Relación Longitud/Distancia, Para una forma Tubular</i>	75
Ecuación 7 <i>Área de la zanja de un Biodigestor Tubular</i>	77
Ecuación 8 <i>Volumen de la Zanja</i>	78
Ecuación 9 <i>Longitud de las paredes inclinadas del Talud</i>	78
Ecuación 10 <i>Carga Diaria</i>	79
Ecuación 11 <i>Estiércol disponible</i>	80
Ecuación 12 <i>Estiércol diario</i>	80
Ecuación 13 <i>Diámetro del inyector</i>	115
Ecuación 14 <i>Consumo de biogás en (m³/h)</i>	116
Ecuación 15 <i>Potencia térmica</i>	116
Ecuación 16 <i>Consumo de biogás en (m³/día)</i>	117
Ecuación 17 <i>Cantidad de Energía (en Joules)</i>	123
Ecuación 18 <i>Potencia de un agitador</i>	127
Ecuación 19 <i>Cálculo de la bomba</i>	128
Ecuación 20 <i>Volumen del Gasómetro (Tasa de Consumo)</i>	147

Resumen

En la actualidad se ha tratado de dar más importancia al uso de fuentes de energía alternativas y renovables, ya que dichas fuentes poseen varios beneficios, tanto en el ámbito de lo económico como en el de lo ambiental, y ayudándonos a dejar de lado el uso de las fuentes de energía convencionales. La utilización de gas metano proveniente de la descomposición de material orgánico en un biodigestor es una de las fuentes de energía renovables que más beneficios aporta tanto en lo económico, como en lo ambiental. En el aspecto de lo monetario, la utilización de un biodigestor representa un considerable ahorro económico, pues mediante este proceso, literalmente podemos generar calor y electricidad a partir de la descomposición de desechos orgánicos, desechos que no poseen ningún uso y no tienen ningún costo. En el aspecto de lo ambiental, el uso de dichos biodigestores también impone un papel importante, pues al aprovechar el material orgánico que regularmente se encuentra en la intemperie, evita que el gas metano que naturalmente produce estos desechos, se libere en el medio ambiente, provocando efectos negativos en el medio ambiente. El biodigestor puede ser implementado satisfactoriamente en los campos, o en lugares en donde exista actividades de ganadería y agricultura, ya que en estos sectores es donde se produce una gran cantidad de materia orgánica.

Palabras clave:

- **BIODIGESTOR**
- **METANO**
- **DESECHOS ORGÁNICOS**

Abstract

At present, attempts have been made to give more importance to the use of alternative and renewable energy sources, since these sources have several benefits, both in the economic and environmental spheres, and helping us to put aside the use from conventional energy sources. The use of methane gas from the discharge of organic material in a biodigester is one of the renewable energy sources that provides the most benefits both economically and environmentally. In the monetary aspect, the use of a biodigester represents considerable economic savings, because through this process, we can literally generate heat and electricity from the destruction of organic waste, waste that has no use and has no cost. In the environmental aspect, the use of said biodigesters also imposes an important role, because by taking advantage of the organic material that is periodically found outdoors, it prevents the methane gas that naturally produces these wastes from being released into the environment, causing negative effects on the environment. The biodigester can be successfully implemented in the fields, or in places where there are livestock and agricultural activities, since a large amount of organic matter is produced in these sectors.

Key words:

- **BIODIGESTER**
- **METHANE**
- **ORGANIC WASTE**

Capítulo I

1. Problema de Investigación

1.1 Tema

Estudio del almacenamiento de gas metano en un biodigestor para la generación de calor a través del uso de desechos orgánicos

1.2 Antecedentes

En la actualidad, el gas metano es una de las opciones más factibles y sencillas para ser una fuente de energía renovable y para ser utilizada como combustible, ya que, prácticamente es obtener energía o calor a través de la descomposición de desechos orgánicos como son: residuos de comida, excremento de animales o desechos vegetales, haciendo así, que se pueda reducir la contaminación y a su vez obtener provecho de ella, y es por esa razón que en muchos países, incluido en el Ecuador, ya se está utilizando a este tipo de gas como una fuente de energía alternativa y como sustituto de algunos combustibles.

Ciudades como Quito desde el 2016 y Cuenca, ya cuentan con estas plantas de generación de energía eléctrica con aprovechamiento del biogás.

Según (Garzón Cuji, 2011) de acuerdo con el tema de su tesis “Estudio de un biodigestor generador de gas metano mediante abono orgánico para prácticas de energías alternativas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato” enfatiza en que se deben aprovechar los desechos orgánicos como una fuente de energía alternativa, ya que en la actualidad, a estos desechos no se les da ningún uso, y además estos provocan un constante peligro de contaminación ambiental, además resalta de como en nuestro país, los sistemas de biogás se reflejan como económicos, seguros, y que además utilizan recursos renovables.

Según (Crisanto Perrazo, 2013) de acuerdo con el tema de su tesis “Estudio de factibilidad para implementar una central eléctrica aprovechando el biogás generado por el relleno sanitario del Inga”, enfatiza que en la actualidad uno de los mayores problemas que enfrentan muchas ciudades como Quito, es la disposición final de los residuos sólidos, ya que estos residuos provocan una producción de biogás, que en sí esta mayormente compuesto por metano, causando así una contaminación al medio ambiente.

De acuerdo a (Baculima Pintado & Rocano Tenezaca, 2015) con el tema de su tesis “Estudio para la determinación de la producción de energía eléctrica a partir del aprovechamiento del biogás de una granja porcina ubicada en la ciudad de Azogues” habla acerca de cómo en el Ecuador debido a la demanda de abastecimiento energético, se están utilizando nuevos sistemas de generación de energía, enfocándose en fuentes de energía renovables, y entre ellos proyectos que se basan en el uso de la biomasa.

1.3 Planteamiento del problema

Actualmente en el Ecuador como en muchos otros países, siempre ha existido un problema que se ha mantenido latente a lo largo de los años, y que se ha tratado de dar una solución, y este problema es la contaminación ambiental por causa de emisiones del gas metano.

El gas metano tiene la capacidad de contaminar mucho más al medio ambiente que el dióxido de carbono, de acuerdo con el Fondo de Defensa Ambiental (EDF) el metano es entre 80 a 84 veces más nocivo que el CO₂, y a diferencia de pensar que el ser humano es el principal causante de las emisiones de metano, la realidad es otra, ya que las mayores emisiones de metano y de dióxido de carbono son causadas por la ganadería y la agricultura, ya que el metano se forma a partir de la descomposición de material orgánico, como son: el excremento de animales y residuos vegetales,

causando que todo este material orgánico no se lo utilice con un fin beneficioso y que a su vez provoque un gran daño al ecosistema y al medio ambiente.

Aparte de esta preocupación antes mencionada, en el Ecuador ha existido otro problema latente que también se le ha tratado de dar una solución, y este es la demanda creciente de abastecimiento de energía, causado a medida del crecimiento de la población y el crecimiento de pueblos y ciudades, añadiendo además que, durante la emergencia sanitaria del covid-19, según el Operador Nacional de Electricidad (CENACE), la demanda de energía aumento un 8,13% entre los meses de enero y julio del 2021.

Todos estos factores provocan que el país tenga dificultades a la hora de abastecer la demanda energética, y tenga que recurrir a fuentes de energías alternativas a las convencionales, como son los combustibles fósiles.

1.4 Justificación

El desarrollo del presente proyecto de estudio tiene como finalidad principal determinar que factibilidad presenta el utilizar el gas metano (proveniente de la descomposición de los desechos orgánicos) para la generación de calor.

Además, dicho proyecto también pretende ofrecer un mayor conocimiento con respecto a la capacidad de poder generar energía y calor a través del almacenamiento de material orgánico en un biodigestor, siendo este, un tema de gran importancia, pues permite así dar un uso a los desechos orgánicos que se producen mayoritariamente en campos como la ganadería y la agricultura y que tanto afectan al ecosistema, debido a que estos, al descomponerse producen de manera natural el gas metano, siendo dicho gas, muy nocivo para el medio ambiente.

La implementación de un biodigestor puede presentar un considerable ahorro económico, ya que prácticamente es generar calor y electricidad a partir de la descomposición de desechos orgánicos, desechos que no poseen ningún uso y no

tienen ningún costo, además, que también aprovechamos el gas metano que regularmente se encuentra en la intemperie, y que tantos efectos negativos produce en el medio ambiente.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Estudiar el almacenamiento de gas metano en un biodigestor para la generación de calor a través del uso de desechos orgánicos.

1.5.2 Objetivos específicos

- Recopilar información sobre la generación de gas metano en un biodigestor.
- Realizar un muestreo de producción de desechos orgánicos.
- Investigar de manera detallada el funcionamiento de un biodigestor, sus piezas y componentes, y de cómo este transforma los residuos orgánicos en gas metano.
- Definir qué tipo de procedimiento se realiza para la producción del gas metano extraído del material orgánico.
- Determinar qué cantidad de calor se produciría a través del uso de desechos orgánicos.
- Determinar los parámetros a tomar en cuenta para dimensionar un biodigestor de manera óptima.
- Realizar cálculos, con respecto a la producción de biogás y a la estimación de energía calórica que puede producir un biodigestor.

1.6 Alcance

El presente proyecto de estudio tiene como alcance la presentación de información, cálculos, bases y datos que reflejen si resulta factible, económico y beneficioso la utilización del gas metano como una fuente de generación de calor, y que

dichos datos presentados puedan resultar útiles al momento del dimensionamiento e instalación de un biodigestor.

El desarrollo de este proyecto además pretende ofrecer un mayor conocimiento con respecto a la generación de calor con el almacenamiento de desechos orgánicos en un biodigestor, con la finalidad de que en varios sectores del país se pueda conocer este método y que cada vez más este sea aplicado para sustituir algunos combustibles fósiles y fuentes de generación de energía convencionales.

Finalmente, se pretende con este proyecto ofrecer un uso alternativo a los desechos orgánicos, y al metano que este produce y que tanto afecta al medio ambiente, utilizando a este biogás como una fuente renovable de generación de energía y calor.

Capítulo II

2. Fundamentación teórica

2.1 Desechos orgánicos

Los desechos orgánicos son en sí restos o residuos biodegradables de animales y plantas, que poseen la propiedad de descomponerse por acción de microorganismos, esta materia orgánica posee varios usos, puede ser utilizada como abono orgánico, una fracción de estos residuos orgánicos también puede ser utilizado como alimento para algunos animales, y mediante una digestión anaeróbica, es decir, con ausencia de oxígeno, se puede generar biogás, para consecutivamente, generar combustible y electricidad, añadiendo además que este material puede ser un recurso valioso para el suelo.

Estos desechos orgánicos a pesar de que poseen varios usos, si no son tratados o utilizados con un fin, estos pueden ser nocivos para el medio ambiente y para la salud de las personas, ya que puede provocar malos olores o enfermedades.

A pesar de que los desechos orgánicos tienen la propiedad de descomponerse, no todos se descomponen con la misma rapidez, como es el caso del papel y el cartón, ya que estos necesitan condiciones especiales de biodegradación.

Según (Garzón Cuji, 2011) el volumen de residuos de origen vegetal suponen el 25% de estos residuos, los cuales equivale un (20%), los residuos de alimentos (18%) y papel y cartón (15%), la transformación de la madera forma otro 18% de los residuos orgánicos.

Además, se debe añadir que, para que el rendimiento del biogás sea más eficiente, el material orgánico que se utilice debe ser fresco, es decir mientras más fresco sea el material orgánico, más eficiente será el biogás, y menos riesgo existirá de una acidificación en el proceso.

2.1.1 Residuos generados en el Ecuador

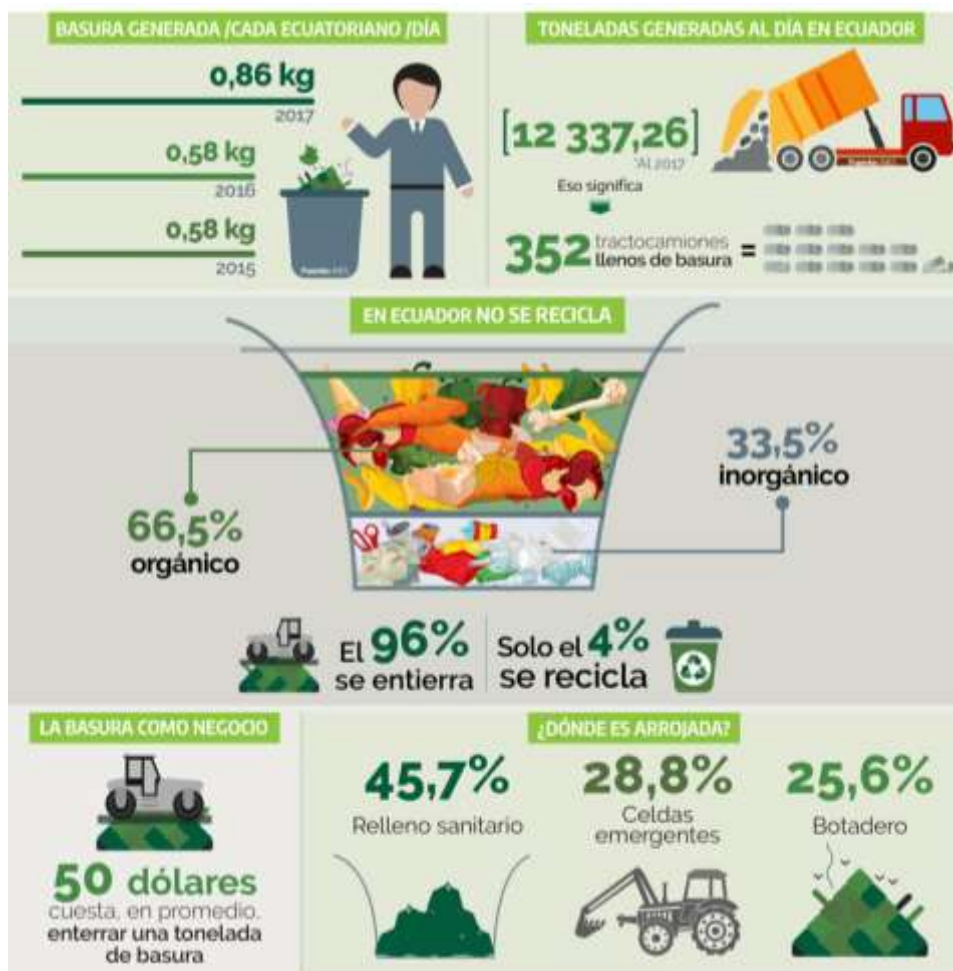
Según (Morán, 2020) un ecuatoriano genera 0,86 kg de basura al día, una cifra que parece mínima, pero que no lo es al multiplicarla con la población del país, representando en millones de desperdicios que mayoritariamente son enterrados en el Ecuador.

Basándose en cifras del INEC, el 66.5% de la basura generada en el Ecuador corresponde a desechos orgánicos, mientras que el 33.5% corresponde a desechos inorgánicos, de lo que en total tan solo el 4% de la basura se recicla, mientras que el 96% de la basura es enterrada.

De acuerdo con (Morán, 2020) un 45.7% de la basura es enviado a relleno sanitario, un 28.8% se dirige a celdas emergentes, y un 25.6% va hacia los botaderos, añadiendo además que las ciudades que más basura arrojan son Guayaquil en primer lugar recibiendo un estimado de 3395 toneladas de basura diarias, le sigue Quito con un estimado de 2100 toneladas de basura y finalmente Cuenca con un estimado de 521 toneladas de basura.

Figura 1

Porcentajes y Clasificación de la Basura Generada en el Ecuador.



Nota. En el gráfico se representa la cantidad de basura que se genera en el Ecuador, además, de que se representa el porcentaje de basura orgánica e inorgánica, y en qué lugares estos desechos son arrojados. Tomado de (Morán, 2020)

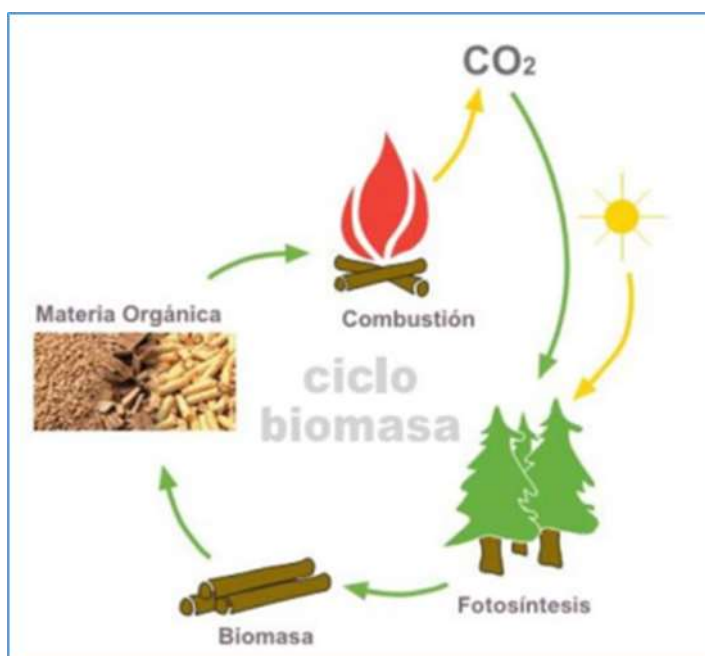
2.1.2 Biomasa

La biomasa se refiere a toda materia orgánica que provenga de residuos animales y vegetales, es decir, la biomasa puede comprender residuos de comida, excremento de animales y personas, residuos generados a partir de procesos agrícolas y ganaderos, desechos orgánicos industriales, etc., siendo todos estos residuos útiles para poder ser utilizados como una fuente de generación de energía y calor.

Desde hace muchos años a la biomasa se la ha utilizado de una forma rudimentaria, ya que, por medio de una combustión directa de este material, se puede cocer alimentos, producir vapor, secar granos, en general, producir calor, pero además el uso de esta biomasa también puede servir como una fuente de generación de energía eléctrica, y para la producción de combustibles por medio de la generación de biogás.

Figura 2

Ciclo de la Biomasa.



Nota. Representación del ciclo de la biomasa. Tomado de (Arce Cabrera, 2011)

2.1.3 Origen de residuos orgánicos

Los residuos orgánicos en sí, poseen varios orígenes, siendo los principales, de origen animal, vegetal, agroindustrial, forestal y doméstico.

Figura 3*Desechos Orgánicos*

Nota. En el gráfico se representa algunos ejemplos de desechos orgánicos, como son cáscaras de plátano, residuos vegetales y cáscaras de huevo. Tomado de (Factor energía, 2017)

2.1.4 Tipos de biomasa

En si existen dos tipos de biomasa:

2.1.4.1 Biomasa Natural

Esta biomasa se produce en ecosistemas naturales, sin ninguna intervención humana, pero la explotación de esta biomasa puede presentar dos complicaciones, la primera es el transporte de este material, ya que dicha biomasa puede generarse en lugares con difícil acceso, y el segundo problema es el efecto negativo en el medio ambiente que presenta la extracción de esta biomasa.

2.1.4.2 Biomasa Residual

Esta biomasa a diferencia de la anterior, se produce gracias a la intervención humana, como, por ejemplo, residuos orgánicos que resultan de actividades como la agricultura y ganadería.

2.1.4.3 Biomasa residual húmeda

De acuerdo con (Baculima Pintado & Rocano Tenezaca, 2015) la biomasa residual húmeda es aquella que posee un porcentaje de humedad considerablemente alto, siendo un estimado de 60% de humedad, siendo este tipo de biomasa muy ideal para la producción de combustibles gaseosos y líquidos, y esta se obtiene por parte del ser humano, de aguas residuales urbanas, desechos sólidos y residuos biodegradables, y por parte de animales, esta biomasa residual húmeda se obtiene en instalaciones agropecuarias.

2.1.5 Desechos agrícolas

Los desechos agrícolas son todos residuos que se producen a partir de cultivos de hierba y leña, y residuos que se generan en el desarrollo de actividades de estos sectores, siendo la mayoría de estos residuos que se producen inconscientemente en actividades forestales.

Según (Arce Cabrera, 2011) en el sector de la agricultura se genera una gran variedad de desechos orgánicos, estimando que en desechos de campo se genera un cantidad de desechos del 60%, mientras que en desechos de procesos entre un 20 a 40 % .

Según (Arce Cabrera, 2011) existen cultivos que pueden ser utilizados primordialmente para generar energía, como es el caso de la caña de azúcar, maíz y el trigo.

Figura 4*Desechos Agrícolas*

Nota. En el gráfico se representa los desechos orgánicos generados a partir de la limpieza de un campo. Tomado de (2000agro, 2020)

2.1.6 Residuos ganaderos

Según (Sandoval Carrasco, 2016) el abono y los purines provenientes de animales como la vaca y el cerdo, son considerados como el material más óptimo para producir biogás, debido a que este se encuentra en exceso, teniendo como única desventaja, que dicho material no posee una capacidad muy alta de producir biogás, ya que posee una alta cantidad de nitrógeno y es muy líquido para su proceso.

Figura 5*Estiércol del Ganado.*

Nota. En el gráfico se representa a una persona realizando la recolección del estiércol de ganado. Tomado de (Arce Cabrera, 2011)

2.2 Biodigestor

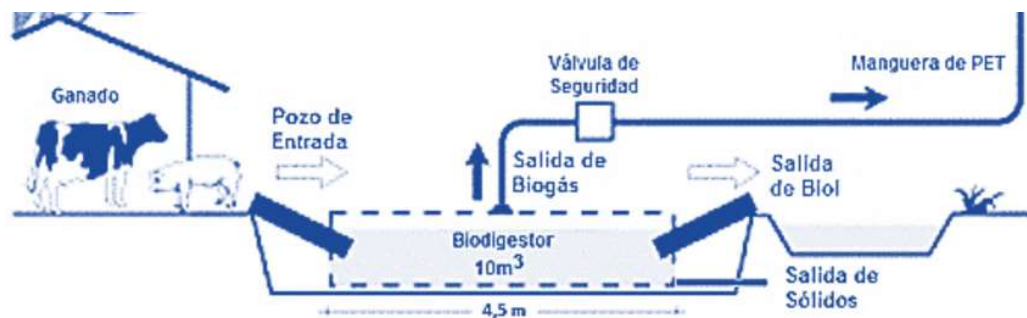
Un biodigestor consiste en un contenedor hermético y cerrado, dentro del cual se depositan toda variedad de desechos orgánicos tales como: residuos de comida, excremento de animales y personas, restos vegetales, desechos orgánicos industriales, etc.

Todos estos desechos, son mezclados con agua, y al descomponerse en un ambiente anaeróbico, es decir, con ausencia de oxígeno, y en un cierto periodo de tiempo, produce como resultado, el biogás.

En si no todo desecho orgánico es recomendable ser colocado en el biodigestor, tal es el caso como el cartón y el papel, ya que, este tipo de desechos orgánicos tardan más en descomponerse que otros materiales orgánicos, también otro residuo orgánico que no se recomienda colocar en el biodigestor son cítricos, ya que estos pueden llegar a acidificar, siendo este un factor negativo en la generación de biogás.

Figura 6

Funcionamiento Básico del Biodigestor.



Nota. En el gráfico se representa el proceso que realiza el biodigestor para transformar la materia orgánica en energía. Tomado de (Calvo, 2018)

2.2.1 Componentes principales del biodigestor

A continuación, se presentarán los componentes principales y básicos que posee un biodigestor.

2.2.1.1 Cámara de entrada o carga

Esta cámara en si es una especie de depósito o ducto, en el cual se colocará la materia orgánica que va a alimentar al biodigestor, dirigiéndose todos estos residuos específicamente al reactor del biodigestor.

2.2.1.2 Reactor

El reactor consiste en un recipiente o tanque que se sitúa bajo tierra, y es en donde se produce todo el proceso bioquímico de descomposición de los desechos orgánicos.

Este recipiente la mayoría de veces es alargada, puede ser construida de diversos materiales como son plástico, concreto, acero, etc., y tiende a tener diferentes formas, como cubicas, cilíndricas, rectangulares, ovoides, etc., dependiendo del tipo y diseño del biodigestor.

Ya que en el reactor se realizará todo el proceso de degradación de la materia, este contenedor deberá evitar la entrada de oxígeno y deberá tener una temperatura óptima para el proceso, además de que se encargará al final de recoger todo el gas producido.

2.2.1.3 Salida del efluente

Son los conductos en donde se extrae todo el efluente que se encuentra dentro del biodigestor, por lo general estos están colocados en distintos niveles.

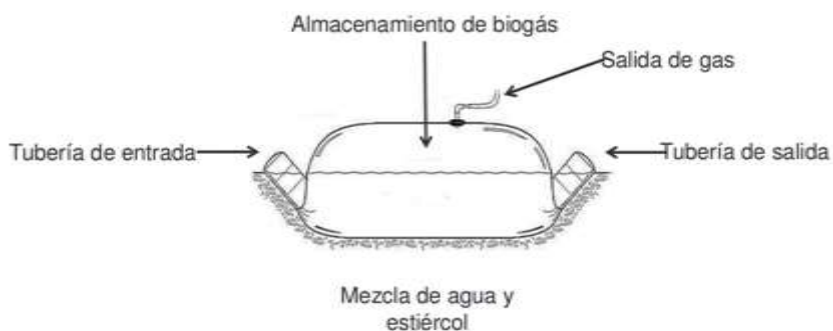
2.2.1.4 Tanque de salida

Usualmente este está colocado debajo de la cámara de carga y se encarga de recolectar el residuo o el lodo resultantes de la descomposición anaeróbica proveniente del reactor.

Figura 7

Partes de un Biodigestor

Partes del biodigestor



Nota. En el gráfico se representa las partes principales del biodigestor, siendo estas, la cámara de entrada y el tanque de salida, el reactor, y el conducto de la salida del biogás. Tomado de (Vargas Lehner, 2014)

2.2.1.5 Cúpula de gas

También denominado como domo o gasómetro, esta cúpula de gas se encarga únicamente de almacenar el biogás producido en el biodigestor.

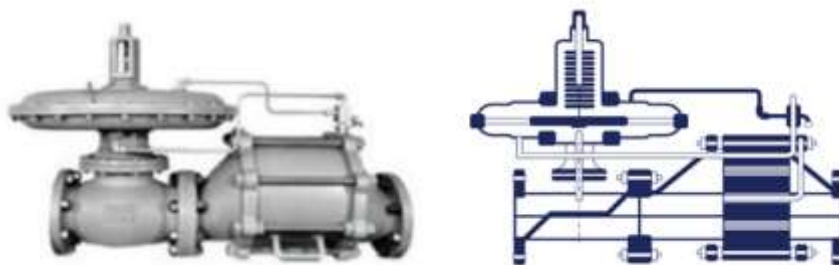
Regularmente, esta cúpula se ubica en la parte superior del biodigestor, aunque también suelen estar separadas del biodigestor.

2.2.1.6 Válvulas de seguridad

Estas válvulas de seguridad se encargan de regular la presión de gas en el sistema, haciendo escapar dicho gas durante algunos minutos, en el caso de que exista un exceso de presión, esta válvulas está conformada principalmente por una especie de plato, añadido con arandelas de peso calibrado.

Figura 8

Válvulas de Seguridad



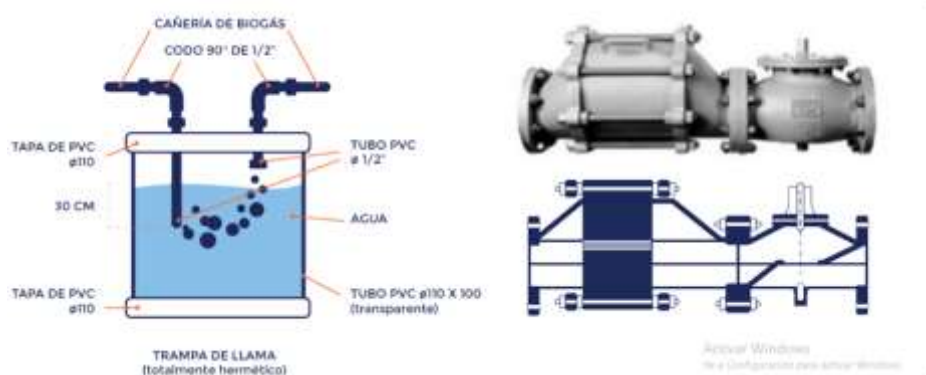
Nota. En el gráfico se representa las válvulas de seguridad que se utilizan para regular la presión de gas en un biodigestor. Tomado de (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019)

2.2.1.7 Apaga Llamas

Su función primordial es de prevención, ya que evita la propagación de llamas que puedan provocarse en el biodigestor, siendo el apaga llamas más común, el que se puede observar en la *Figura 9*, en donde se observa de como el gas que se dirige de izquierda a derecha, burbujea en el agua para seguir su camino.

Figura 9

Apaga Llamas de un Biodigestor



Nota. En el gráfico se representa dos sistemas de apaga llamas en el caso de propagación de llamas en el biodigestor, una industrial de fundición (derecha) y una artesanal (izquierda). Tomado de (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019)

2.2.1.8 Condensador de agua

Este condensador se encarga de solucionar el problema que se presenta cuando el agua que posee el gas generado, se condensa, provocando que dicho gas no pueda circular.

El condensador en si se compone de un recipiente que se encuentra lleno de agua, con una tubería en su interior con forma de T, la parte superior de la tubería se va a encontrar fuera del recipiente y es por donde va a circular el gas, mientras que el agua que se condense, va a dirigirse por el caño que se encuentra dentro del recipiente, estancando dicha agua dentro de ella.

Figura 10

Condensador de Agua de un Biodigestor



Nota. En el gráfico se representa un condensador de agua encargado del problema de la condensación del agua que contiene el biogás. Tomado de (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019)

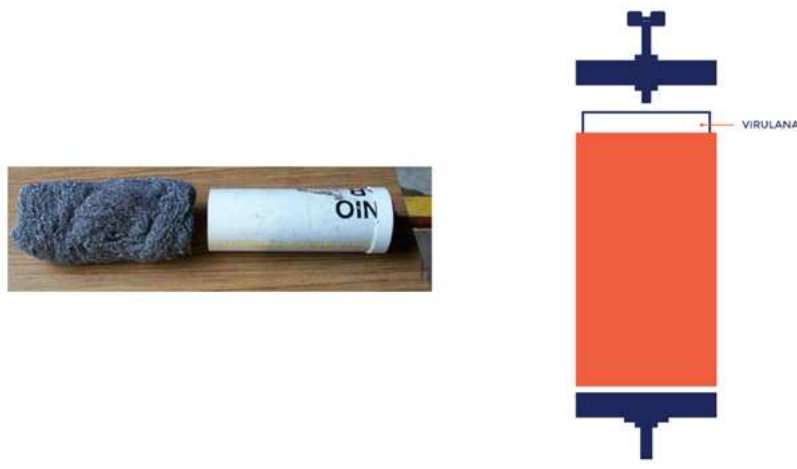
2.2.1.9 Filtro de ácido sulfhídrico

El filtro de ácido sulfhídrico es una parte muy importante para la purificación de nuestro gas, ya que, el biogás que se produce en los biodigestores posee varios compuestos y entre ellos está el ácido sulfhídrico (H_2S), siendo este un compuesto altamente tóxico y nocivo para la salud ya que el H_2S en una concentración de 50ppm, puede causar mareos, mientras que en una concentración de 100ppm, puede llegar a ahogar a una persona si se está en contacto por mucho tiempo.

El filtro se compone básicamente en utilizar virutas de hierro oxidadas, colocándolas en un trozo de tubería, y dicho filtro será ubicado en el área en donde el biogás pase.

Figura 11

Filtro de Ácido Sulfhídrico de un Biodigestor



Nota. En el gráfico se representa en la parte derecha, un modelo de un filtro de ácido sulfhídrico y en la parte izquierda, las virutas de hierro que deben ser colocada dentro del filtro. Tomado de (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019)

2.2.2 Tipos de Biodigestores

Existen varios diseños y modelos de biodigestores, a continuación, se presentarán los más relevantes.

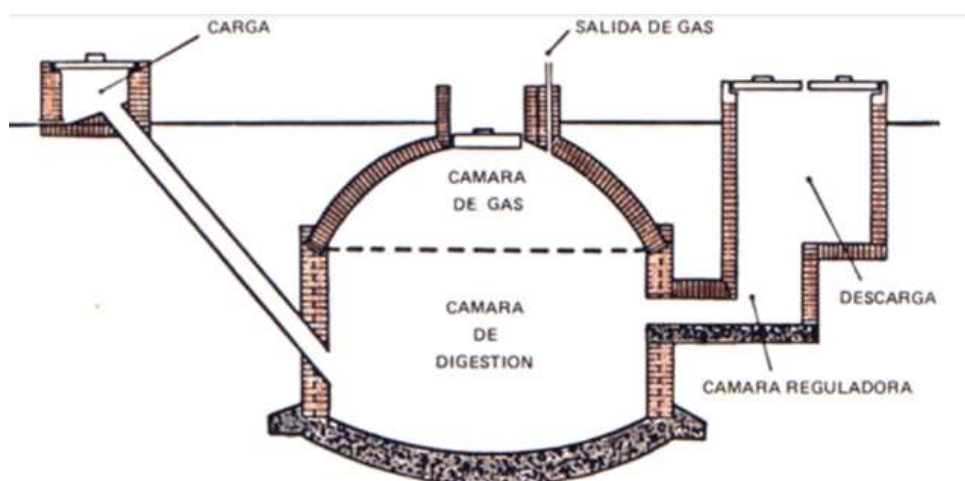
2.2.2.1 Biodigestor de tipo chino

El biodigestor de tipo chino consiste en un biodigestor de cúpula fija, que regularmente está construido de ladrillos, hormigón o piedras, este biodigestor no posee una cúpula de gas, por lo que almacena el biogás dentro del mismo sistema, acumulándose presiones de aproximadamente 100cm de columna de agua.

La fluctuación del nivel de la mezcla en fermentación aumenta el contacto de la fase líquida con el oxígeno del aire, reduciéndose la actividad de las bacterias generadoras de metano, y la alta presión impide que el gas salga libremente del seno de la mezcla, todo lo cual conduce a una menor eficiencia de generación de biogás en los digestores de tipo chino, en comparación con los de tipo hindú, generándose en el primero entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen del digestor. (Garzón Cuji, 2011, pág. 14).

Figura 12

Biodigestor Tipo Chino



Nota. En el gráfico se representa el diseño y las partes de un biodigestor tipo chino.

Tomado de (Garzón Cuji, 2011)

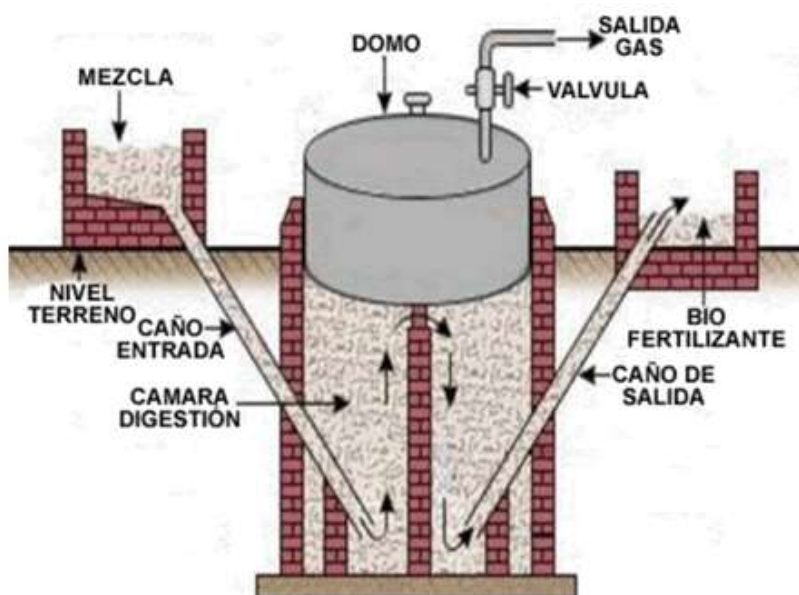
2.2.2.2 Biodigestor tipo hindú

Son biodigestores continuos, es decir, que se cargan y descargan una vez al día, todos los días. Se los construye enterrados y verticales, semejando a un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día. El gasómetro está integrado al sistema, de manera que en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie es de alrededor de 30 cm de columna de agua. (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019, pág. 5).

A diferencia del biodigestor tipo chino, este biodigestor al poseer una campana o domo en donde se almacenará el biogás, va a existir una presión constante, generándose una mejor producción de biogás (0.5 y 0.1 volumen de gas por volumen del biodigestor por día).

Figura 13

Biodigestor Tipo Hindú



Nota. En el gráfico se representa el diseño y las partes de un biodigestor tipo hindú.

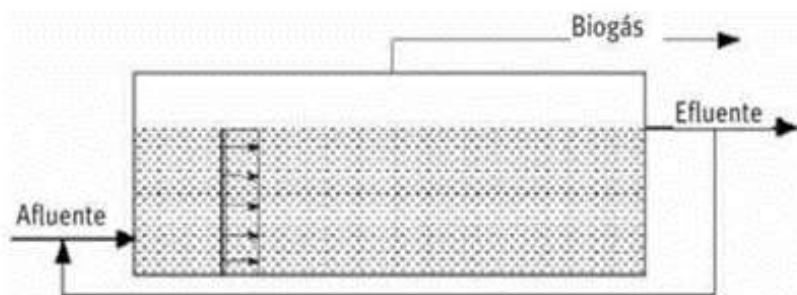
Tomado de (Garzón Cuji, 2011)

2.2.2.3 Biodigestor Horizontal

Este tipo de biodigestores poseen un diseño alargado, se construyen enterrados y son poco profundos, este biodigestor hace que la materia orgánica circule en flujo pistón, es decir, este biodigestor trabaja de la misma manera que el intestino de un ser humano, haciendo que la materia orgánica mezclada con agua ingrese por un extremo, y el lodo y residuos resultantes de la digestión anaeróbica salgan por el otro extremo.

Figura 14

Biodigestor Horizontal



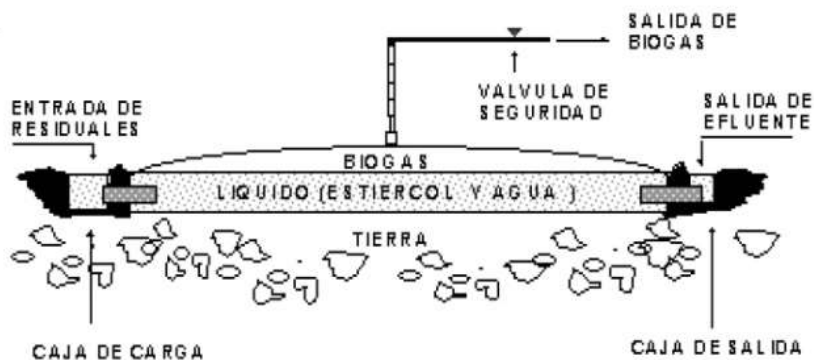
Nota. En el gráfico se representa el diseño y las partes de un biodigestor Horizontal.

Tomado de (Garzón Cuji, 2011)

2.2.2.4 Biodigestor de Diseño Tubular

Es un biodigestor de régimen continuo que consiste de un tubo de membrana ubicado en una pendiente, cuyos extremos están sellados a dos caños de PVC o integrados a las cámaras de carga y descarga. Se recomienda colocarlo enterrado dentro de un pozo que le ayude a mantener y sostener su forma.

(Academia de las renovables. Santa Fe, 2019, pág. 6)

Figura 15*Biodigestor de Tipo Tubular*

Nota. En el gráfico se representa el diseño y las partes de un biodigestor tipo Tubular.

Tomado de (Garzón Cuji, 2011)

2.2.2.5 Biodigestor Realizado por Tanques

Este tipo de biodigestores son de pequeña a mediana escala (familiar), y están contruidos con tanques prefabricados. La construcción se basa en un tanque (reactor), que puede ser de los prefabricados para contener agua, al cual se le coloca la carga, la descarga y la salida de gas. El gas generado en el reactor se acumula en gasógenos, que suelen ser de campana invertida. (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019, pág. 7).

Figura 16*Biodigestor Realizado por Tanques*

Nota. En el gráfico se representa un ejemplo de un biodigestor elaborado por tanques.

Tomado de (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019)

2.3 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica, también llamada biometanización, en si es un proceso biológico y degradativo que consiste en la descomposición microbiológica de materia orgánica, siendo esta degradación realizada en un entorno húmedo y con ausencia de oxígeno.

Este proceso de descomposición es realizado comúnmente en tanques herméticos y cerrados, llamados biodigestores, en donde, se coloca materia orgánica mezclada con agua dentro de estos contenedores para su respectiva descomposición, siendo este, el método más convencional que existe para la producción de biogás.

2.3.1 Etapas de la digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica en si es un proceso complejo en donde intervienen varios microorganismos, y el proceso completo que realiza la digestión anaeróbica puede ser clasificado en tres etapas:

La primera etapa es denominada como Hidrólisis, aquí la materia orgánica compleja es despolimerizada, es decir, degradada en moléculas más solubles (ácidos

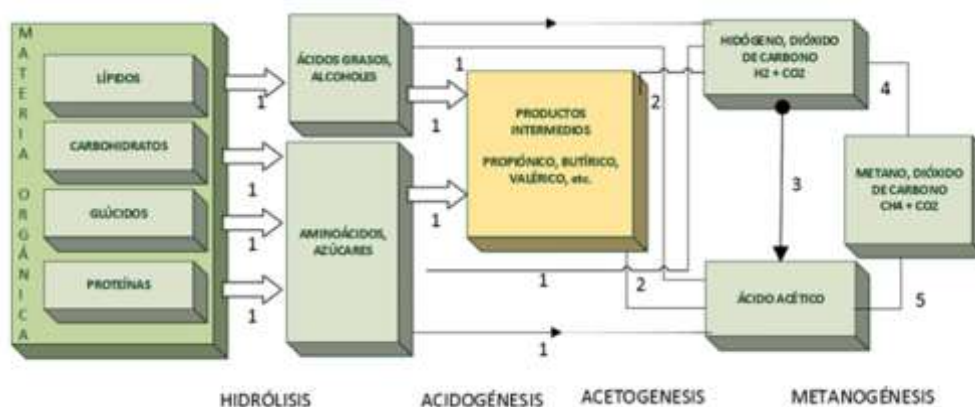
grasos, hidrogeno, dióxido de carbono) por acción de enzimas hidrolíticas, en otras palabras, la materia orgánica es hidrolizada y fermentada.

La segunda etapa es denominada como acidogénesis, aquí la materia orgánica soluble es procesada por un grupo de microorganismos llamados acetogénicos y acidogénicos, causando que se libere dióxido de carbono (CO_2), ácido acético (CH_3COOH) e hidrogeno molecular (H_2).

La tercera y última etapa es denominada como metanogénesis, aquí se presentan dos formas metabólicas diferentes que poseen los microorganismos metanogénicos, la primera en donde se puede generar metano (CH_4) a partir del dióxido de carbono (CO_2) y del H_2 , es denominada como vía hidrogenotrófica, y la segunda forma en donde se puede transformar el ácido acético (CH_3COOH) en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), es denominado como vía acetoclástica.

Figura 17

Etapas de la Digestión Anaeróbica



Nota. En el gráfico se representa un diagrama en donde se detallan todas las etapas que componen la digestión anaeróbica. Tomado de (Baculima Pintado & Rocano Tenezaca, 2015)

2.3.2 Parámetros físicos y químicos para la descomposición

Para que exista un adecuado proceso de digestión anaerobia, se deben tener en cuenta estos parámetros físicos y químicos:

2.3.2.1 Concentración de oxígeno

Las bacterias metanogénicas (bacterias responsables de la producción de metano), necesitan primordialmente de un ambiente en donde exista ausencia de oxígeno, ya que para dichas bacterias el oxígeno es un elemento tóxico.

Si existe presencia de oxígeno en la digestión anaeróbica, las bacterias metanogénicas serán consumidas por bacterias que se desarrollan en presencia de oxígeno, como es el caso de bacterias hidrolíticas y acidogénicas.

2.3.2.2 Temperatura

La temperatura es uno de los factores más importantes para la digestión anaeróbica, ya que este factor determinara la velocidad de degradación de las bacterias involucradas.

En si existen un amplio rango de temperatura en donde la digestión anaeróbica puede llevarse a cabo, siendo estos rangos clasificados en tres grupos principales, los cuales son: Psicofílicos, trabajando en un rango entre 10°C a 25°C; Mesofílicos, trabajando en un rango entre 25°C a 40°C y Termofílicos, trabajando en un rango entre 40°C a 55°C.

Se considera que mientras exista una mayor temperatura, es decir a un rango de temperatura termofílico, mayor será la producción de biogás y el proceso se realizara en un menor tiempo, ya que mientras el rango de temperatura Psicofílico necesita un periodo de tiempo de 50 a 100 días, el rango de temperatura termofílico tan solo requiere de un periodo de tiempo de 15 a 25 días.

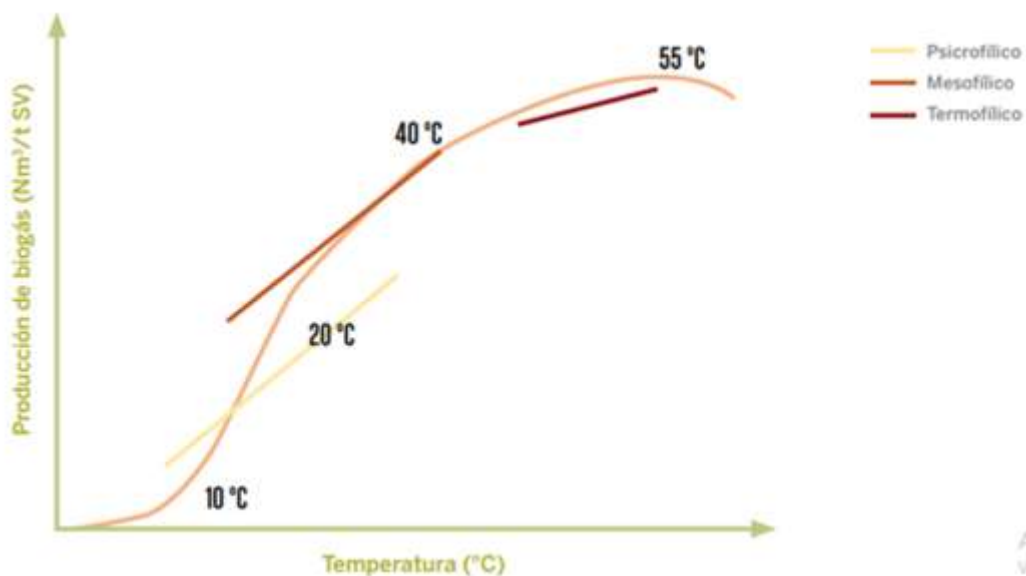
La digestión anaeróbica realizada a temperaturas termofílicas, además de generar mayores cantidades de metano, ayuda a una mejor eliminación de patógenos y

virus, la única desventaja que presenta trabajar a altas temperaturas es el alto costo que este presenta.

De acuerdo a (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016) se considera más viable el rango de temperatura Mesofílico, ya que para el proceso de la digestión anaeróbica la temperatura debe mantenerse estable, porque, si existe cambios bruscos de temperatura, habría una alteración en las macromoléculas, que impedirían una correcta producción de biogás.

Figura 18

Producción de Biogás en Función de la Temperatura del Proceso



Nota. En el gráfico se representa la producción de biogás que produce el biodigestor en función de la temperatura del proceso. Tomado de (FAO, 2019)

2.3.2.3 Retención Hidráulica

La retención hidráulica, también denominada como TRH, se denomina al tiempo que el sustrato permanece en el biodigestor, siendo esta variable relacionada directamente con la temperatura, el TRH también se clasifica en los tres rangos de temperatura, siendo estos: Psicrofílicos, oscilando en un tiempo de entre 50 a 120 días; Mesofílicos,

oscilando en un tiempo de entre 25 a 50 días y Termofílicos, oscilando en un tiempo de entre 15 a 25 días.

2.3.2.4 pH

El pH es uno de los factores más importantes que se deben controlar en el proceso de digestión anaeróbica, ya que la generación del biogás depende altamente del pH, dependiendo además de este factor la toxicidad de las bacterias metanogénicas y el crecimiento de varios microorganismos presentes en el proceso de digestión.

En si el pH varía principalmente por el tipo de material orgánico que ingresa al biodigestor, y es muy primordial dar un control rutinario del pH.

De acuerdo con (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016) el rango de pH óptimo depende en cierto punto con respecto a las etapas de la digestión anaeróbica, ya que para la etapa de hidrólisis y acidogénica, su rango optimo seria de 4 a 8, mientras que en la etapa de metanogénesis su rango de pH no debe ser menor a 6,6.

Según (Baculima Pintado & Rocano Tenezaca, 2015) el proceso de digestión anaeróbica en general, debe realizarse en un rango de 6,8 y 7,5 de ph, ya que si se realiza en un rango mucho menor al de 6,5 se produciría una acidificación del reactor, impidiendo el desarrollo de las bacterias metanogénicas.

2.3.2.5 Macronutrientes y micronutrientes

Estos factores son muy importantes en el proceso de digestión anaeróbica, pues elementos como el carbono, nitrógeno, azufre y fósforo son componentes necesarios para el desarrollo óptimo de las bacterias, siendo el carbono y el nitrógeno los más importantes, ya que prácticamente, la base estructural de estos microorganismos se compone de estos elementos, siendo además que el carbono trabaja como una fuente de energía de los microorganismos y el nitrógeno ayuda a la generación de nuevas células, influyendo esto directamente en la generación de biogás.

2.4 Biogás

El biogás en si es una mezcla de gas que se produce por la acción de varios microorganismos, como bacterias metanogénicas, que se encargan de la biodegradación de material y desechos orgánicos, tales como: desechos de comida, excremento de animales, o residuos vegetales; provocando que la descomposición de estos materiales, y añadido a que este proceso se lo realice en un ambiente anaeróbico, es decir, con ausencia de oxígeno, da como resultado la producción del biogás.

2.4.1 Composición del biogás

El biogás producido por la descomposición de desechos orgánicos en un ambiente anaeróbico, está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, siendo el metano el que se encuentra en mayor cantidad, pero, de una manera más detalla, el biogás en si está compuesto por: metano (CH₄) en una mayor proporción, oscilando entre un 50% a 75%, le sigue el dióxido de carbono (CO₂), en una proporción oscilando entre un 30% a 45%, y en menor medida se encuentran el ácido sulfhídrico (H₂S) oscilando entre 0.01 a 0.40%, nitrógeno (N₂) oscilando entre 1 a 2% y oxígeno (O₂), siendo el ácido sulfhídrico el que provoca que el biogás posea un olor penetrante, fuerte y desagradable, añadiendo además que el H₂S es un gas altamente tóxico.

Tabla 1

Dimensionamiento de los biodigestores

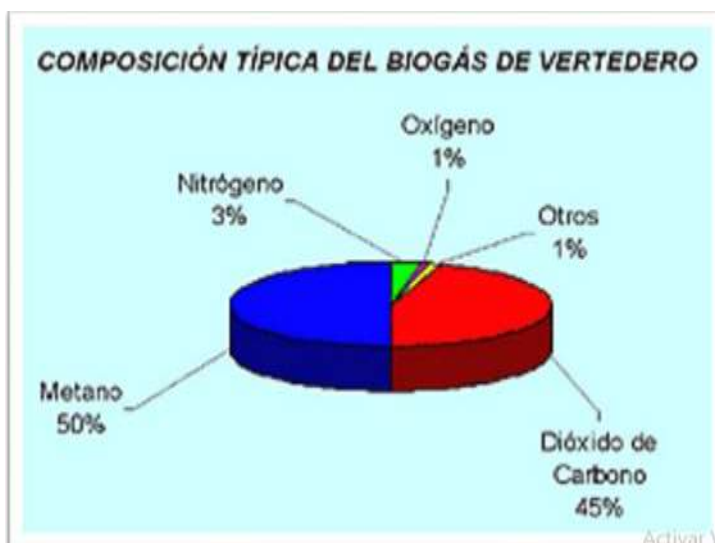
Componentes	Unidad	Contenido
Metano	%	50-75
Dióxido de carbono	%	30-45
Nitrógeno	%	1-2
Oxígeno	%	0.1
Sulfuro de hidrogeno	%	0.01-0.40

Componentes	Unidad	Contenido
Saturación con vapor de agua	%	80-100

Nota. En la tabla se observan los componentes que posee el biogás. Tomado de (Moncayo Romero, 2017)

Figura 19

Composición Típica del Biogás de Vertedero



Nota. En el gráfico se representa un diagrama circular en donde se detallan las composiciones generales que posee el biogás. Tomado de (Arce Cabrera, 2011).

2.4.2 Ventajas del uso del biogás

- La producción del biogás es renovable, ya que la materia prima que se utiliza para su producción, consiste en la utilización de desechos orgánicos tales como: excrementos de animales, residuos de comida, desechos vegetales, etc., haciendo así que la materia prima para producir biogás sea interminable.
- El biogás es un recurso que no contamina y no es nocivo para el medio ambiente, ya que para su producción debe realizarse en un ambiente

anaeróbico, es decir, con ausencia de oxígeno, lo que en si significa que no existe ningún tipo de combustión, y al no haber combustión, tampoco hay producción de gases de efecto invernadero, además, la producción del biogás también es amigable con el medio ambiente, ya que al utilizar desechos orgánicos, principalmente del ganado y la agricultura, evitan que estos residuos se mantengan en la intemperie y produzcan emisiones de gas metano, siendo este gas más nocivo para el medio ambiente, que el dióxido de carbono.

- Es una fuente renovable confiable, ya que, a diferencia de otras fuentes de energía renovables, como la eólica o la solar, que dependen del comportamiento climático para la producción de energía, la producción del biogás es ininterrumpido, ya que no depende del comportamiento climático, pero esto es en biodigestores en donde posean una fuente de calor externa.
- El biogás funciona como un buen sustituto de los combustibles fósiles, ya que estos combustibles a diferencia del biogás, requieren de la utilización de materiales como son carbón, petróleo y gas, materiales que no son renovables.
- De acuerdo a (Arce Cabrera, 2011) el biogás posee una mejor combustión, ya que reduce el humo visible del arranque en un 30%, además que cualquiera de sus mezclas reduce en proporción equivalente a su contenido, las emanaciones de CO₂ y partículas de hidrocarburos aromáticos.

2.4.3 Desventajas del uso del biogás

- La producción del biogás no puede ser realizado en cualquier sitio, ya que se requieren de ubicaciones específicas donde exista abundancia de

desechos orgánicos, siendo los sitios rurales los más factibles para la construcción de biodigestores, mientras que en las ciudades no resulta muy factible la ubicación de biodigestores.

- No existe muchos avances tecnológicos en los sistemas de producción del biogás, es decir, que no se ha enfocado en desarrollar tecnologías que permitan que la utilización del biogás se lo realice en grandes escalas, y que a su vez su producción sea económica y fiable.
- Se requiere de grandes áreas de terreno para la producción del biogás, por ejemplo, para producir un estimado de 1 megavatio de energía eléctrica (MW), se requiere un estimado de 300 hectáreas.
- Debido a que no se le ha dado mucha importancia al desarrollo del biogás como fuente renovable, aun se requiere de una gran inversión para que el biogás sea considerado como una fuente de energía y combustible viable, ya que aún existe un alto costo de la materia prima.

Capítulo III

3. Dimensionamiento y análisis de factibilidad de un biodigestor

3.1 Parámetros a tener en cuenta para la instalación del biodigestor

En si existen algunos aspectos importantes que se deben tomar en cuenta a la hora del diseño y construcción de un biodigestor, siendo el primer aspecto importante la recolección, el transporte y la preparación de la materia prima que va a alimentar al biodigestor.

El segundo aspecto a considerar es el almacenamiento, el transporte y el uso del biogás que el biodigestor producirá, y como último aspecto a considerar es el uso y el transporte del lodo o el residuo que resulte de la digestión anaeróbica.

3.1.1 Factores básicos a tener en cuenta

Para que el funcionamiento del biodigestor sea optimo, se deben tener en cuenta varios aspectos y criterios como:

- Fijarse primeramente en la cantidad y calidad de materia orgánica que vamos a utilizar en el biodigestor, es decir, percatarse de que la biomasa que dispongamos para alimentar el biodigestor, sea suficiente para el objetivo al que se aspira, y con respecto a la calidad, se debe percatar que la materia orgánica que se va a utilizar sea óptima para la producción de biogás, ya que no todo desecho orgánico es recomendable para la generación de dicho gas, como es el caso de cítricos, ya que estos desechos pueden acidificar el proceso de digestión anaeróbica, y por esa razón, no es muy recomendable su uso para alimentar un biodigestor; y otro desecho que no es muy recomendable ser utilizado en este tipo de procesos, es el cartón y sus derivados, ya que estos residuos tardan más en degradarse a diferencia de otros desechos orgánicos.

- Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es el dimensionamiento y el tamaño que tendrá el biodigestor, ya que, si nuestro biodigestor será de un tamaño considerable, este va a requerir de un mantenimiento y un control más minucioso, además de que necesitará de una considerable cantidad biomasa, y por ende producirá más biogás.
- Como otro aspecto importante a considerar es la cantidad de biogás que producirá, y por ende la cantidad de energía o combustible que se obtendrá.
- El presupuesto es otro factor a tomar en cuenta al momento de la construcción de un biodigestor, ya que, si el presupuesto invertido en la construcción del biodigestor supera con respecto a su producción, no se cubrirían los gastos, y, por ende, no resultaría factible construir dicho biodigestor.

3.1.2 Factores básicos a tener en cuenta (ubicación)

La ubicación en donde se colocará el biodigestor es de gran prioridad, ya que de este factor depende de que dicho biodigestor trabaje en óptimas condiciones y sin contratiempos, además, si este es construido en un lugar estratégico, la producción del biogás puede resultar más económica. A continuación, se presentarán algunos factores importantes a tener en cuenta con respecto a la ubicación del biodigestor.

- Primeramente, el biodigestor deberá ser colocado cerca de un sitio en donde se generen desechos orgánicos en grandes cantidades, es decir, cerca de sectores ganaderos o agrícolas, con la finalidad de ahorrar en el transporte y traslado de dichas sustancias hacia el biodigestor.

- Se debe tomar en cuenta la topografía, el nivel del suelo y la disponibilidad de terreno, es decir todas las características del sitio en donde el biodigestor deberá ser colocado.
- La construcción del biodigestor deberá ser ubicado cerca de donde se consumirá el gas, ya que las presiones que se obtienen de dicho biogás, complica el transporte de este.
- El biodigestor deberá ser ubicado en un lugar en donde el clima favorezca la producción del biogás (digestión anaeróbica), es decir en un lugar con un clima promedio a los 35° grados centígrados, y en donde no exista presencia de vientos fríos.

3.2 Factibilidad y rendimiento de los distintos tipos de biodigestores

En si existe una gran variedad de biodigestores como ya se había observado en el capítulo 2.2.2, y estos varían principalmente con respecto a sus diseños, tamaños y componentes extras, pero en sí, todos estos biodigestores poseen la misma función de descomponer la materia orgánica para producir biogás.

Existen biodigestores de bajo costo, que son utilizados principalmente por pequeños y medianos productores agropecuarios, estos biodigestores no poseen sistemas apartes de agitación y calefacción.

3.2.1 Dimensionamiento de los biodigestores

Con respecto al dimensionamiento de los biodigestores, estos pueden clasificarse en tres grupos principales.

- El primer grupo es denominado de pequeña escala o domésticos, y estos poseen un tamaño promedio de entre 5 a 15 m^3 .
- El segundo grupo es denominado de mediana escala o productiva, y estos poseen un tamaño promedio de entre 15 a 1000 m^3 .

- El tercer grupo es denominado de gran escala o industriales, y estos poseen un tamaño promedio mayor a $1000m^3$.

A pesar de que existen varios tipos de biodigestores, los más convencionales, comunes y funcionales se clasificarían en tres tipos: el biodigestor tipo chino, el biodigestor tipo hindú, y el biodigestor de balón plástico (diseño tubular).

3.2.2 Ventajas y Desventajas del biodigestor tipo hindú

3.2.2.1 Ventajas

- Este biodigestor posee una presión de gas constante al poseer una campana flotante.
- Ya que la campana flotante que posee este tipo de biodigestores puede girar, se puede remover la capa de material orgánico que suele generarse dentro de este.
- Puede almacenar una mayor cantidad de biogás.

3.2.2.2 Desventajas

- Su construcción resulta muy costosa, siendo el componente más costoso la campana flotante.
- No cualquiera puede instalar este tipo de biodigestor, ya que para su construcción se necesita de una mano de obra especializada.

3.2.3 Ventajas y Desventajas del biodigestor tipo chino

3.2.3.1 Ventajas

- Al no poseer una campana flotante, los costos de construcción de este tipo de biodigestor son bajos.
- Este tipo de biodigestores no presenta problemas de corrosión, ya que no posee piezas metálicas y móviles.

- Este tipo de biodigestor posee una larga vida útil.

3.2.3.2 Desventajas

- Este biodigestor no posee una presión de gas constante.
- Dicho biodigestor debe tener un mantenimiento muy cuidadoso ya que suelen presentarse grietas o porosidades, y ya que este no posee una campana, el gas se almacena en el mismo sistema, ocasionando presiones muy altas dentro del biodigestor.

3.2.4 *Ventajas y Desventajas del biodigestor de diseño tubular*

3.2.4.1 Ventajas

- Posee un costo de producción demasiado bajo a diferencia de los otros dos tipos de biodigestores.
- Este tipo de biodigestor es de sencilla instalación.
- Gracias a su posición horizontal, es conveniente colocar a este tipo de biodigestor en sitios con un alto nivel freático.

3.2.4.2 Desventajas

- Dicho biodigestor posee una corta vida útil, ya que es construido solamente de material plástico.
- Es propenso a daños y rasgaduras.

Tabla 2*Evaluación de Tres Tipos de Biodigestores Convencionales*

Criterios	Biodigestor Tipo	Biodigestor Tipo	Biodigestor Diseño
	hindú	chino	Tubular
Mejor producción de gas	X	X	X
Mejor presión constante de gas	X		
Mejor observación del nivel de gas	X		
Mayor desgaste de las partes	X		
Mayor durabilidad		X	
Fácil instalación			X
Mejor control del sobrante		X	
Menor costo			X

Nota. Evaluación de los biodigestores convencionales (tipo hindú, tipo chino y de diseño tubular). Tomado de (Leon Cifuentes, 1991)

El biodigestor de diseño tubular se considera como uno de los más económicos, a comparación de los demás tipos de biodigestores.

El biodigestor de tipo chino y tipo hindú, presentan una mejor presión constante del gas metano, a diferencia del biodigestor de diseño tubular.

El biodigestor de diseño tubular a diferencia de los otros tipos, es de muy fácil instalación, y por esta razón, es el más utilizado en América Latina.

Tabla 3

Ventajas y Desventajas de Biodigestores Domo Fijo y Domo Tubular

	Domo Fijo	Domo Tubular
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Su vida útil es de 20 años. -Usan poca agua en la carga (estiércol: agua 1:1) respecto a los biodigestores tubulares. -No ocupan espacio en la finca al estar enterrados y no es necesario sistema de protección. -Alcanza presiones de biogás muy superiores (1m de columna de agua) a los biodigestores tubulares. 	<ul style="list-style-type: none"> -Es la tecnología más conocida y utilizada en América Latina. -Se pueden adaptar a climas fríos de los andes con calefacción solar pasiva. -Instalación rápida (1 o 2 días) después del cavado de la zanja. -Cualquier productor capacitado puede ser instalador de biodigestores tubulares. -El coste del transporte de materiales es bajo por ser piezas ligeras y ya estar prefabricadas. -Se pueden hacer de cualquier tamaño. -Vida útil de 15 años en adelante.

	Domo Fijo	Domo Tubular
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> -Tienen un elevado costo -Es una técnica aplicada principalmente en Asia y África, - Necesitan de un personal capacitado para su construcción. -Al construirse debajo de la tierra, no posee de una calefacción solar pasiva. 	<ul style="list-style-type: none"> -Al estar semienterrados y dejar la cúpula a la vista es necesario proteger el área. -Usan más agua en la carga (estiércol: agua 1:3 a 1:5) que los biodigestores de domo fijo. -Alcanzan menores presiones de biogás (hasta 15cm de columna de agua) que los de domo fijo.

Nota. En la tabla se observan las ventajas y desventajas que presentan los dos tipos de biodigestores principales (tubular y domo fijo). Tomado de (Martí Herrero, 2019)

El biodigestor de diseño tubular es el más utilizado en América Latina, debido a que dichos biodigestores trabajan de manera eficiente en los climas que existen en esta región, a diferencia del biodigestor de domo fijo, que es un tipo de biodigestor que es comúnmente utilizado en Asia y África, desconociéndose con exactitud, de cómo estos biodigestores trabajen en los climas de Latinoamérica, además, estos biodigestores son económicos y no se requiere de un personal capacitado para su construcción a diferencia del biodigestor de domo fijo, haciendo que dicho biodigestor pueda ser construido sin problemas en varias casas para uso doméstico, y también para uso productivo.

3.3 Parámetros a tener en cuenta para el dimensionamiento de un biodigestor

Uno de los factores principales que se debe tomar en cuenta a la hora de dimensionar un biodigestor, es conocer las propiedades del material orgánico con el que

se va a trabajar, es decir, se debe conocer el tipo del material, la cantidad con la que se cuenta, su disponibilidad, sus propiedades físicas y químicas, etc.

3.3.1 Estiércol diario

A la cantidad de estiércol que se genera en una granja o finca, se denomina como estiércol diario, Mediante un estimado con respecto al peso vivo de los animales se puede saber la cantidad de estiércol diario que genera cierto tipo de animal.

Tabla 4

Estiércol Diario Producido por Tipo de Animal

Animal	Kg de estiércol diario (kg/día)
Bovino (500 kg)	10.00
Porcino (50 kg)	2.25
Aves (2 kg)	0.18
Ovino (32 kg)	1.50
Caprino (50 kg)	2.00
Equino (450 kg)	10.00
Conejo (3 kg)	0.35
Humano	0.4

Nota. En la tabla se muestra la cantidad de estiércol diario que producen distintos tipos de animales en kg. Tomado de (FAO, 2011)

3.3.2 Estiércol disponible

El estiércol disponible se refiere únicamente al estiércol que se va a colocar en el biodigestor, siendo que, el valor del estiércol disponible va a hacer menor al valor del estiércol diario.

Para conocer el valor de estiércol disponible, se debe tener en cuenta las horas de estabulación de los animales.

Tabla 5*Cálculos para saber el Estiércol Disponible*

Caso	Estiércol disponible
Estabulados	= estiércol diario
Estabulados solo a la noche	= 0,25 x estiércol diario
Estabulado un número de horas	= (n° horas estabulado/24 horas) x estiércol diario

Nota. En esta tabla se representa algunos cálculos para obtener el estiércol disponible.

Tomado de (Martí Herrero, 2019)

3.3.3 Mezcla del material con agua

Como ya se había mencionado con anterioridad, la materia orgánica que va a ingresar en el biodigestor debe ser mezclada con agua, para que se pueda generar una óptima producción de biogás. En algunos biodigestores como es el caso de los tubulares, se recomienda que la carga que va a ingresar al biodigestor posea un porcentaje de entre 3% y 16% de sólidos totales.

Tabla 6*Relación de Agua*

Estiércol	Relación Estiércol: Agua
Bovino	1:1
Porcino	1:3
Aves	1:3

Nota. En la tabla se representa una referencia con respecto a cuanta agua debe ser colocada en el material, dependiendo con el tipo de estiércol que se utilice, se considera que los estiércoles de animales en general tienen una relación de 1:3, a excepción del estiércol bovino ya que este es muy húmedo. Tomado de (FAO, 2011)

3.3.4 Carga diaria que se coloca en el biodigestor

Se denomina carga diaria a la mezcla entre agua y estiércol que es colocada en el biodigestor, esta se expresa en litros de carga por día (l/día).

3.3.5 Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Se denomina tiempo de retención hidráulica al tiempo que la materia orgánica tarda en permanecer en el biodigestor. El (TRH) puede variar por diversos factores, siendo uno de los factores más principales, la temperatura, ya que, entre mayor temperatura exista en el biodigestor, menor será el tiempo de retención hidráulica, como se puede observar en la *tabla 7*.

Otro factor en menor medida que puede influir en el TRH, es la agitación, ya que, si se mantiene agitando a la materia orgánica dentro del biodigestor, su tiempo de retención también va a ser menor.

Si el TRH es menor, existirá una menor producción de biogás, o tan solo se producirá dióxido de carbono, con ausencia de metano, sin embargo, si el TRH es muy excesivo, se puede perder las propiedades del biogás.

Tabla 7

Relación con Respecto a la Temperatura y el TRH

Temperatura	Tiempo de retención Hidráulica
35°C	25-30 días
30°C	30-40 días
25°C	35-50 días
20°C	50-65 días
15°C	65-90 días
10°C	90-125 días

Nota. En la tabla se representa el tiempo de retención que existe con respecto a la temperatura que posea el biodigestor. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

3.3.6 Consideraciones en base a la temperatura del biodigestor

Como ya se había mencionado, la temperatura es un factor importante para una producción óptima del biogás, ya que, si el biodigestor trabaja a temperaturas considerablemente altas, mayor será su producción de biogás y además menor será su tiempo de retención, sin embargo, se recomienda que el biodigestor trabaje con una temperatura que oscile entre 35°C a 37°C o superiores, ya que, a estas temperaturas se puede realizar una correcta digestión anaeróbica y por ende una correcta producción de biogás.

Para lograr que nuestro biodigestor trabaje en temperaturas óptimas, se deben tomar en cuenta dos aspectos importantes que son: el diseño de nuestro biodigestor y el lugar en donde colocaremos el biodigestor.

Si el biodigestor se encuentra ubicado en zonas donde haiga una temperatura ambiente superior, es decir, temperaturas superiores a los 20 °C, no es recomendable realizar diseños de calefacción solar pasiva en el biodigestor.

Si el biodigestor se encuentra ubicado en zonas donde exista una temperatura ambiente o menor a está, es decir, temperaturas de 20 °C o menores, es recomendable realizar diseños de calefacción solar pasiva en el biodigestor.

Tabla 8

Temperatura del Biodigestor

Eco región típica (altura, msnm)	Temperatura ambiente media (°C)	Temperatura sin diseño solar	Temperatura con diseño solar
Trópico cálido (< 300)	28-32	28-32	No requiere

Eco región típica (altura, msnm)	Temperatura ambiente media (°C)	Temperatura sin diseño solar	Temperatura con diseño solar
Trópico (300- 1000)	23-27	23-27	No requiere
Valles (1000- 2000)	18-22	18-22	23-27
Valles altos (2000-3000)	13-17	13-17	18-22
Altiplanos (3000- 4500)	8-12	8-12	13-17

Nota. En biodigestores como es el caso de los de diseño tubular, se pueden realizar diseños de calefacción solar pasiva, enfocándose primordialmente en el material con el que va a estar constituido el biodigestor (plástico, geomembrana de polietileno o de PVC). Tomado de (Martí Herrero, 2019)

A continuación, se presentarán algunas modificaciones que pueden tener los biodigestores de diseño tubular, para poder obtener una calefacción solar pasiva, óptima.

- Utilizar materiales de color oscuro, es decir, que el material con el que esté constituido el biodigestor sea de un color oscuro, esto se lo realizaría con la finalidad de que dicho material logre absorber mayores cantidades de radiación solar, llegando a un estimado de elevar la temperatura del trabajo del biodigestor hasta 2 y 3°C, pero para ello, es recomendable utilizar un material que resista dichos niveles de radiación solar, siendo dicho material, la geomembrana de polietileno.

- Se puede construir un invernadero alrededor del biodigestor, con la finalidad de que, además de que sirva para aumentar la temperatura en el biodigestor, este también lo proteja; este invernadero podrá ser construido del propio plástico o también de paredes de ladrillo o adobe, y además deberá ser compacto y con una superficie disminuida para evitar pérdidas de calor; siendo que la utilización de dicho invernadero pueda aumentar la temperatura del trabajo del biodigestor hasta 6 y 10°C.

3.4 Parámetros a tener en cuenta con respecto al biogás

La producción del biogás depende de tres factores principales, el primer factor es la temperatura con la que va a trabajar el biodigestor, el segundo factor es el tiempo de retención, es decir, el tiempo con el que la materia orgánica permanece dentro del biodigestor, y el tercer factor a considerar para una óptima producción del biogás, es el tipo de material orgánico con el que se va a trabajar.

La temperatura y el TRH tienen una estrecha relación, ya que, como se observó en la *tabla 7*, mientras menor temperatura posea el biodigestor, mayor será el tiempo de retención, y viceversa, Se debe tomar muy en cuenta el tiempo de retención para que el biogás producido sea de buena calidad, ya que, si se mantiene más tiempo del necesario a cierta carga de material orgánico dentro del biodigestor, este material ya no producirá más biogás y ocupará un espacio importante, impidiendo ingresar una nueva carga de material orgánico.

Cada materia orgánica posee mayor potencial de producción de biogás que otros como se puede observar en la *tabla 9*.

Tabla 9*Producción estimada de biogás*

Material orgánico	Producción de biogás (m ³ /kg de material orgánico)
Estiércol de bovino	0.04
Estiércol Porcino	0.06
Estiércol Equino	0.04
Estiércol Ovino	0.05
Estiércol de aves	0.08
Estiércol humano	0.06
Estiércol de conejo	0.06
Estiércol caprino	0.05
Desechos orgánicos	Producción de biogás (m ³ /kg de desechos orgánico)
Paja de arroz	0.35
Paja de trigo	0.36
Paja de maíz	0.51
Paja de cebada	0.38
Hojas de papa	0.6
Hojas de tomate	0.6
Desechos orgánicos de verdura	0.35
Desechos orgánicos de cocina	0.25

Nota. En la tabla se representa el biogás estimado que se produce con respecto a distintos tipos de material orgánico. Tomado de (FAO, 2011)

Como se puede observar en la tabla, no todo material orgánico es óptimo para producir biogás, siendo por ejemplo la basura orgánica urbana, esto puede deberse a

que dicha basura posee pocas cantidades de materiales orgánicos, y el material orgánico que posee tarda mucho en descomponerse, como sería el caso de elementos como el papel y cartón, componentes que requieren un proceso especial para poder descomponerlos, además, se recomienda no utilizar residuos cítricos ya que pueden acidificar la digestión anaeróbica.

En base a la *tabla 9*, se puede calcular un estimado de cuanta producción diaria de biogás se puede obtener enfocándose en la materia orgánica diaria (o disponible en el caso de tomar en cuenta la estabulación de los animales) que se dispone, esto se refleja mediante la ecuación:

Ecuación 1

Producción diaria del biogás

$$\text{Producción diaria de biogás} = \text{Estiércol diario} \times \text{Equivalente producción de biogas}$$

Donde:

Producción diaria de biogás= (m^3/dia)

Estiércol diario=(kg/dia)

Equivalente producción de biogás= (m^3/kg)

Ecuación 2

Volumen del biogás

$$VB = \frac{VL}{3}$$

Donde:

VL= volumen liquido (m^3 o L)

VB= volumen del biogás (m^3 o L)

3.4.1 Conducción del biogás

3.4.1.1 Tubería de conducción del biogás

Esta tubería se encuentra en la parte superior del biodigestor, que, en el caso del biodigestor del diseño tubular, se encuentra en la parte superior de la bolsa del almacenamiento del biogás.

Esta tubería suele estar compuesta de una tubería de PVC o por una manguera PET, y es la encargada de transportar el biogás desde el biodigestor hasta el reservorio de gas, y en el trayecto se encontrarán válvulas de seguridad y filtros de purificación del biogás.

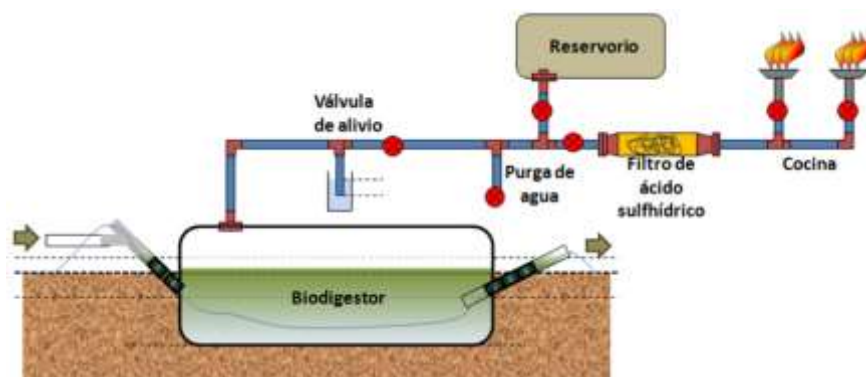
En biodigestores domésticos, se suele trabajar con tuberías de 1/2" de diámetro, mientras que en biodigestores con mayor tamaño (mayor a 10 m³), se suele trabajar con tuberías de 3/4" de diámetro.

Se debe tomar en cuenta que las tuberías se encuentren en una altura elevada, para que no existan obstrucciones de animales y personas.

Se debe evitar el uso excesivo de codos en la conducción de biogás, ya que causan una considerable pérdida de biogás en el trayecto.

Figura 18

Conducción del biogás



Nota. En el gráfico se ilustra el sistema de tuberías, válvulas y filtros por donde el biogás va a conducir. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

3.4.1.2 Salida del biogás

En el caso de un biodigestor de diseño tubular, la salida del biogás deberá ser ubicada a dos metros del extremo de donde se encuentre la entrada del biodigestor, se debe realizar una pequeña abertura en la geomembrana del biodigestor, en donde luego se colocará un adaptador de tanque.

Figura 19

Instalación de la Salida de Biogás en un Biodigestor de Diseño Tubular



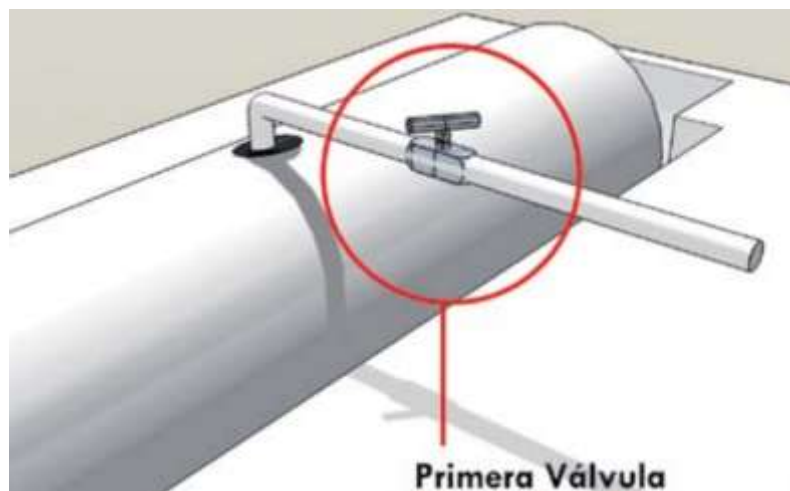
Nota. En la secuencia de imágenes se observa la instalación de la salida de biogás en un biodigestor de diseño tubular. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

3.4.1.3 Primera válvula de control

Esta válvula de control se ubicará a pocas pulgadas de la salida del biogás y será la encargada de controlar el flujo de biogás que provenga del biodigestor.

Figura 20

Primera Válvula de Control



Nota. En el gráfico se observa la primera válvula que debe ser colocada al inicio de la tubería de la conducción del biogás. Tomado de (Machorro & Méndez, 2011)

3.4.1.4 Válvula de alivio del biogás

Como ya se había mencionado en el *capítulo 2.2.1.8*, esta válvula de alivio tiene una forma T, en donde, en la parte superior de la T va a circular el gas, mientras que la parte inferior de la T se compondrá de una tubería de aproximadamente 30 cm, en dicha tubería se colocará un recipiente lleno de agua, actuando como un sello hidráulico.

La válvula de alivio posee dos funciones primordiales, la primera función es dejar escapar una cierta cantidad de biogás en el caso de que exista una alta presión en el reactor del biodigestor, y la otra función (en menor medida) es que sirve para capturar el agua que se condensa en las tuberías.

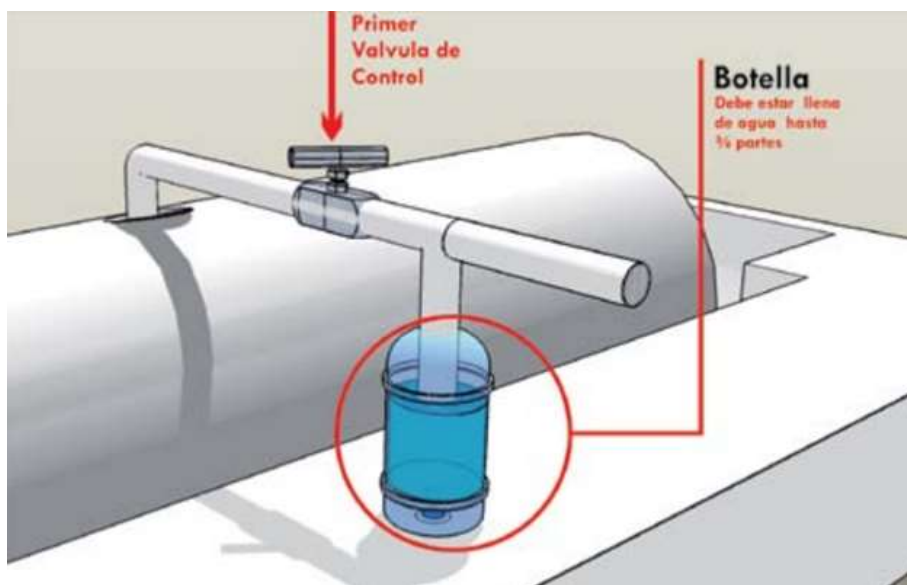
Con respecto a las presiones máximas que puede soportar un biodigestor, en el caso de un biodigestor de diseño tubular, depende de que material este construido dicho biodigestor, es decir:

- Biodigestores contruidos con plástico de invernadero pueden soportar una presión de hasta 12 a 15 cm de columna de agua.
- Biodigestores contruidos de geomembrana de PVC pueden soportar una presión de hasta 5 a 8 cm de columna de agua.
- Biodigestores contruidos de geomembrana de polietileno pueden soportar una presión de hasta 20 cm de columna de agua.

Para saber en cuantos centímetros se debe hundir la tubería de 30cm en el agua, se debe tomar en cuenta la presión máxima que posee nuestro biodigestor.

Figura 21

Válvula de Alivio del Biogás



Nota. En el gráfico se representa la colocación de una válvula de alivio, que se colocara justo después de la primera válvula de control. Tomado de (Machorro & Méndez, 2011)

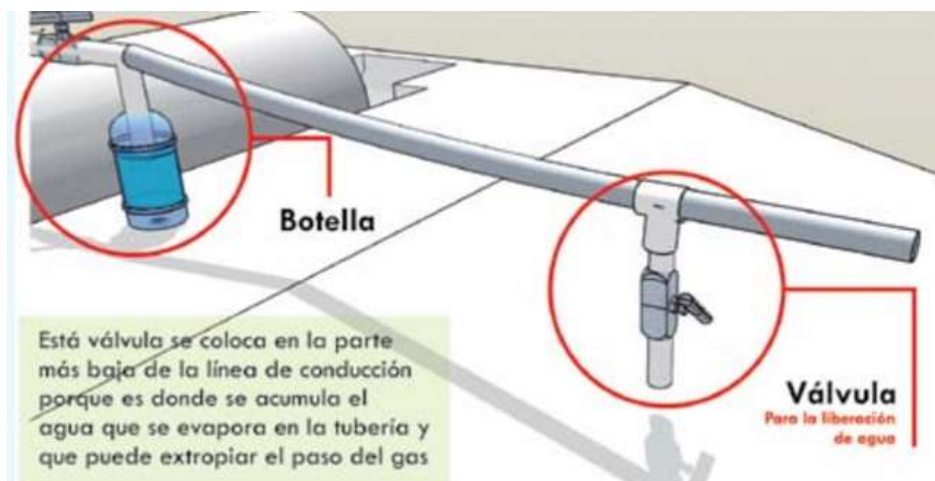
3.4.1.5 Válvula para la liberación de agua

Como ya se había mencionado, el biogás presenta una cierta cantidad de vapor de agua que, al condensarse, impide el paso del biogás por la tubería; esta válvula

ayuda a capturar el agua que se condensa en las tuberías, y está conformada por una tubería en forma de T y una llave de paso.

Figura 22

Válvula para la Liberación de Agua



Nota. En el gráfico se observa la colocación de una válvula de liberación de agua, que se colocara justo después de la válvula de alivio. Tomado de (Machorro & Méndez, 2011)

3.4.1.6 Filtro de ácido sulfhídrico (H_2S)

Como ya se había mencionado, el biogás se compone de varios compuestos, siendo uno de ellos el ácido sulfhídrico, dicho gas, puede ser nocivo para la salud del ser humano; es por esa razón que se debe utilizar un filtro que ayude a eliminar el ácido sulfhídrico del biogás.

El método más convencional para eliminar el (H_2S) de nuestro biogás es la utilización de un filtro, en cuyo interior se colocara lana de hierro oxidada, que absorberá todo el ácido sulfhídrico.

La lana de hierro que se va a utilizar debe pasar por algunos tratamientos para que este pueda absorber todo el ácido sulfhídrico, estos tratamientos son:

- La lana de hierro debe ser lavada con detergente para quitar cualquier residuo de grasa.
- Luego de ser lavada, la lana de hierro debe colocarse en una solución de ácido clorhídrico al 5% por 5 a 10 minutos.
- Finalmente, una vez retirada la lana de hierro del ácido clorhídrico, se la debe colocar en una solución de hidróxido de sodio al 5% por 5 a 10 minutos.

3.4.1.7 Gasómetro

Existen dos maneras de almacenar el biogás, la primera forma es almacenarla a presión con ayuda de un compresor, en tanques (los mismos que se utilizan para almacenar el gas propano), se recomienda que la presión máxima de almacenamiento sea de 14 bar.

La otra manera es almacenarla en un recipiente aparte (puede ser del mismo material del biodigestor o en un tanque), y este será almacenado a una presión baja, de un promedio a 200mm de columna de agua.

3.5 Dimensiones y componentes del biodigestor de diseño tubular

3.5.1 Volumen del biodigestor

El volumen del biodigestor se divide en dos partes, la parte es en donde se encuentra la materia orgánica mezclada con agua (denominada como volumen líquido), y la segunda parte es en donde se encuentra el biogás (volumen del biogás).

El volumen líquido en si está relacionado con el THR y con la carga diaria.

Ecuación 3

Volumen Líquido

$$VL = TR \times CD$$

Donde:

VL= volumen líquido (m^3 o L)

TR= Tiempo de retención (días)

CD= carga diaria ($\frac{m^3}{d}$ o $\frac{L}{d}$)

Ecuación 4

Volumen Total

$$VT = VL + VB$$

Donde:

VL= volumen liquido (m^3 o L)

VT= volumen total (m^3 o L)

VB= volumen del biogás (m^3 o L)

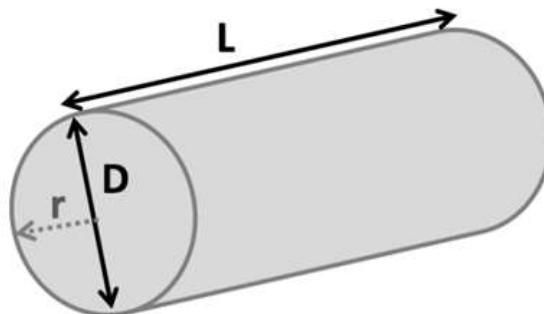
El volumen liquido ocupa mayor espacio con relación al volumen que ocupa el biogás (volumen liquido 80% y volumen del biogás 20%).

Al trabajar con biodigestores contruidos con materiales flexibles (plástico de invernadero, geomembrana de PVC o de polietileno) es necesario darle un recipiente al biodigestor que contenga ese volumen, y ese recipiente es la zanja.

Las dimensiones de la zanja son las que determinan el volumen final del biodigestor pues al final, el volumen líquido deberá estar contenido en la zanja.

(Martí Herrero, 2019, pág. 45).

Los biodigestores con diseño tubular, gracias a su diseño, permiten una mejor comodidad de entrada y salida de materiales, además a que se asemeja mucho al intestino humano.

Figura 23*Esquema de un Cilindro*

Nota. En la figura se representa el esquema de un cilindro, representando además su radio, longitud y su diámetro. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

Ecuación 5

Circunferencia del Biodigestor Tubular

$$C = 2 \times \pi \times r$$

Donde:

C= circunferencia del plástico (m)

r= radio de la circunferencia del plástico (m)

Ecuación 6

Relación Longitud/Distancia, Para una forma Tubular

$$\frac{L}{D} = 7.5$$

Donde:

L= longitud del biodigestor (m)

D= diámetro de la circunferencia del plástico (m)

La relación entre la longitud del biodigestor y el diámetro de la circunferencia del plástico de 7.5 tiene como finalidad dar un tamaño adecuado al biodigestor.

Si la relación L/D es menor de 5, el biodigestor tendrá una forma muy corta, haciendo que la entrada y salida del biodigestor estén muy apegadas entre sí.

Si el biodigestor tiene una relación L/D mayor a 10, nuestro biodigestor será muy alargado, y la entrada y salida del biodigestor se mantendrán muy alejadas.

Tabla 10

Longitudes en base a las circunferencias del biodigestor

Circunferencia (m)	Ancho de rollo (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Longitud biodigestor tubular		
				Mínima	Máxima	Optima
2	1	0.32	0.64	3.2	6.4	4.8
3	1.5	0.48	0.95	4.8	9.5	7.2
4	2	0.64	1.27	6.4	12.7	9.5
5	2.5	0.80	1.59	8.0	15.9	11.9
6	3	0.95	1.91	9.5	19.1	14.3
7	3.5	1.11	2.23	11.1	22.3	16.7
8	4	1.27	2.55	12.7	25.5	19.1
9	4.5	1.43	2.86	14.3	28.6	21.5
10	5	1.59	3.18	15.9	31.8	23.9
14	7	2.23	4.46	22.3	44.6	33.4

Nota. En la tabla se representan distintas longitudes en base al tamaño de la circunferencia de un biodigestor tubular. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

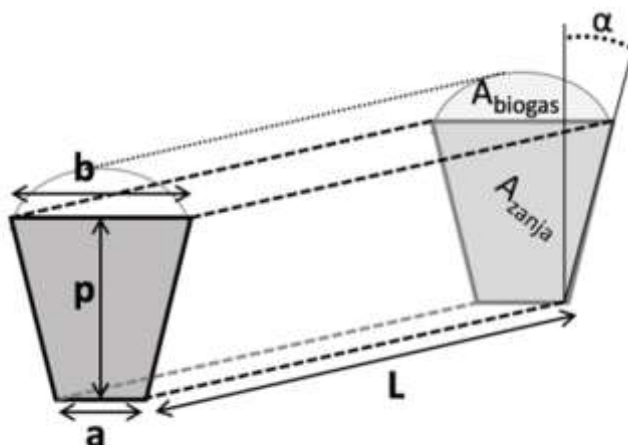
3.5.2 Dimensiones de la zanja de un biodigestor tubular

Como ya se había mencionado, las dimensiones del biodigestor de diseño tubular se centran principalmente en las dimensiones de la zanja, además de que, en esta área, se ubicara el volumen líquido del biodigestor.

La zanja deberá tener un diseño de trapecoide, ya que así se evitan derrumbes en el terreno, así que, basado en el diseño de un trapecoide, la zanja deberá ser construida en base a la *ecuación 7*.

Figura 24

Esquema de una zanja trapezoidal



Nota. En la figura se representa el esquema de una zanja trapezoidal, representando además sus parámetros de medida. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

Ecuación 7

Área de la zanja de un Biodigestor Tubular

$$A_{zanja} = p \times \frac{(a + b)}{2}$$

Donde:

A_{zanja} = área del trapecio de la zanja (m²)

p= profundidad (m)

a= ancho inferior (m)

b=Ancho superior (m)

El volumen líquido del biodigestor será el volumen de la zanja

Ecuación 8

Volumen de la Zanja

$$V_{zanja} = VL = A_{zanja} \times L$$

Donde:

$$V_{zanja} = \text{volumen de la zanja}(m^3)$$

VL= volumen líquido (m^3)

L= longitud de la zanja (m)

Otro aspecto que se debe tomar en consideración es percatarse que el perímetro del área de la zanja debe ser menor a la circunferencia del plástico.

Ecuación 9

Longitud de las paredes inclinadas del Talud

$$\text{Apotema} = \sqrt{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2 + p^2}$$

$$P_{zanja} = a + 2 \times \text{Apotema} + b$$

Donde:

$$P_{zanja} = \text{perímetro de la zanja}$$

3.5.2.1 Consideraciones con respecto al terreno

Usualmente se recomienda que la profundidad de la zanja sea de un estimado de entre 1 a 2 m, siendo 1.5 m, la profundidad óptima para la zanja de un biodigestor de diseño tubular.

Las características del suelo también son un factor importante para construir la zanja del biodigestor, como ya se había mencionada, la zanja posee un diseño

trapezoidal, con el fin de que no existan derrumbes, y dependiendo el tipo de terreno, existirá una inclinación de talud de las paredes.

Los suelos con características arenosas deberán tener una inclinación (α) de 30° a 45°, mientras que suelos con características arcillosas deberán tener una inclinación (α) de 7.5° a 30°.

Tabla 11

Dimensiones a , b , p , óptimas con respecto a la inclinación del talud

α (°) desde vertical	% VL	%VB	a(m)	b(m)	p(m)	$A_{zanja}(m^2)$
0	88	12	$1.49 \times r$	$1.49 \times r$	$1.57 \times r$	$2.34 \times r^2$
0	83	17	$1.41 \times r$	$1.41 \times r$	$1.57 \times r$	$2.22 \times r^2$
0	80	20	$1.34 \times r$	$1.34 \times r$	$1.57 \times r$	$2.10 \times r^2$
7.5	80	20	$1.23 \times r$	$1.63 \times r$	$1.54 \times r$	$2.20 \times r^2$
15	76	24	$1.02 \times r$	$1.82 \times r$	$1.49 \times r$	$2.12 \times r^2$
30	75	25	$0.72 \times r$	$2.26 \times r$	$1.33 \times r$	$1.98 \times r^2$
45	65	35	$0.43 \times r$	$2.57 \times r$	$1.07 \times r$	$1.61 \times r^2$

Nota. En la tabla se observan las dimensiones a , b , p , óptimas con respecto a la inclinación del talud. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

3.5.3 Ecuaciones generales con respecto a la materia orgánica

Ecuación 10

Carga Diaria

$$CD = \frac{VL}{TR}$$

Donde:

CD= carga diaria

VL=volumen líquido

TR= tiempo de retención

Ecuación 11

Estiércol disponible

$$\text{Estiércol disponible} = \left(\frac{n^\circ \text{ horas estabulando}}{24 \text{ horas}} \right) \times \text{estiércol diario}$$

Ecuación 12

Estiércol diario

$$\text{Estiércol diario} = \left(\frac{24 \text{ horas}}{n^\circ \text{ horas estabulando}} \right) \times \text{estiércol disponible}$$

3.6 Parámetros para un biodigestor de diseño tubular óptimo

3.6.1 Características de la bolsa del biodigestor

Como ya se había mencionado con anterioridad, el biodigestor de diseño tubular puede ser elaborado de plástico o geomembrana, siendo estos, materiales muy eficientes para la descomposición de materia orgánica.

Sin embargo, se considera que, entre estos dos materiales el más óptimo para ser utilizado es la geomembrana de polietileno, a continuación, se presentaran las ventajas que presenta utilizar dicho material para nuestro biodigestor:

- La geomembrana de polietileno es muy resistente, a comparación del plástico de invernadero.
- La geomembrana de polietileno al ser un material resistente, puede soportar una presión del biogás de hasta 20 cm de columna de agua.
- Finalmente, al utilizar dicho material de color negro, se puede lograr una mejor calefacción solar pasiva, ya que al utilizar este material de dicho color se puede lograr absorber mayores cantidades de radiación solar.

3.6.2 Agitadores

El uso de agitadores en el biodigestor es de gran utilidad, estos se encargan de agitar los desechos orgánicos que se encuentra dentro del biodigestor, evitando así que se generen costras de materia orgánica dentro del biodigestor, además, al mantener en movimiento a dicha materia, ayudará a que exista una mejor descomposición anaeróbica, y por ende existirá un menor tiempo de retención.

Figura 25

Agitador para Biodigestor Tubular



Nota. En el gráfico se observa un a un agitador, instalado en un biodigestor de diseño tubular. Tomado de (Aqualimpia, 2020)

Tabla 12

Características del Motor de un Agitador de Biodigestor

Características del motor del agitador de Biodigestor	
Motor	Trifásico
RPM	1750 rpm
Voltaje	220/440 V
Potencia	7.5 hp (5.59 kW)

Nota. En la tabla se observa un ejemplo de las características que presentaría el motor de un agitador de biodigestor de gran tamaño.

3.6.3 *Electrobomba estercolera*

La electrobomba estercolera va a ser la encargada de succionar todo el material orgánico mezclado con agua que se va a encontrar dentro del biodigestor.

Dicha electrobomba va a ser colocada en la tubería de la salida del efluente del biodigestor.

Figura 26

Electrobomba Estercolera



Nota. En el gráfico se observa una electrobomba estercolera de 10hp. Tomado de (Ignacio Gómez IHM, 2021)

Tabla 13

Características de una Electrobomba Estercolera

Características de electrobomba estercolera	
Caudal medio	130 GPM
Motor	Trifásico
Potencia	10 hp (7.5 kW)
Voltaje	220/440 V
Peso	69 kg
Dimensiones	0.54/0.35/0.38 m
Altura (ADT)	58 m

Nota. En la tabla se observa el ejemplo de las características que presenta una electrobomba estercolera. Tomado de (Ignacio Gómez IHM, 2021)

3.6.4 Sensores CH₄

Este sensor nos ayudara a medir la cantidad de metano que se encuentra en el biogás.

Dicho sensor además puede ser colocado en la corriente de biogás, pero sería más recomendable ser colocada en el gasómetro.

3.6.5 Detector de ácido sulfhídrico

Como ya se había mencionado con anterioridad, el biogás posee varios componentes siendo los más principales el metano y el dióxido de carbono, pero dicho gas también presenta un componente que resulta nocivo para el ser humano, y además provoca que el biogás emane un olor desagradable, siendo dicho componente el ácido sulfhídrico.

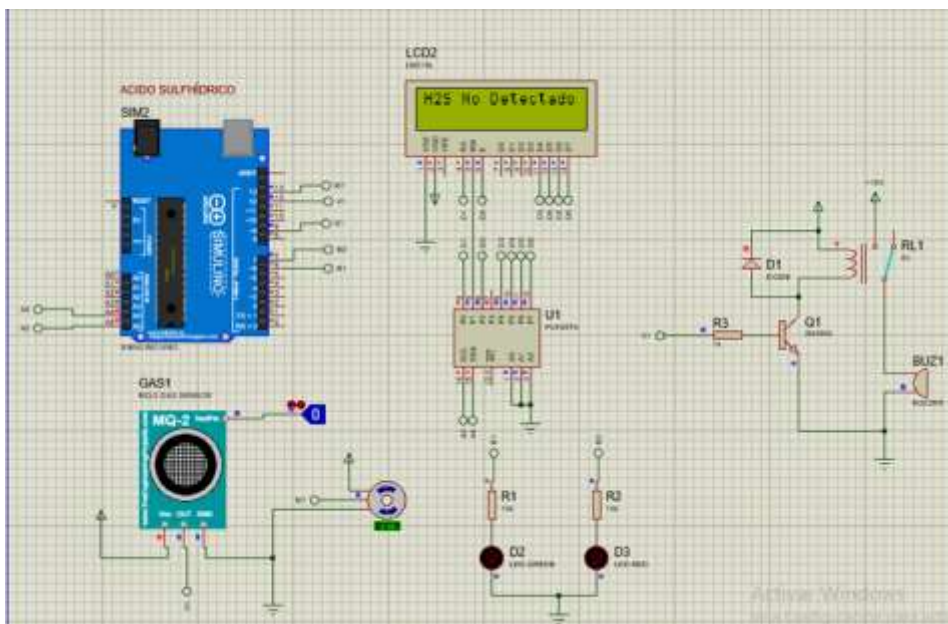
Ya existe un método para la eliminación de dicho componente que consiste en la utilización de un filtro que en su interior posee lana de hierro.

Sin embargo, existe un cierto riesgo de que dicho componente no sea erradicado por completo, luego de que el biogás atravesase el filtro, causando que el gas contaminado sea utilizado por las personas, y, por ende, afecte a la salud de estos.

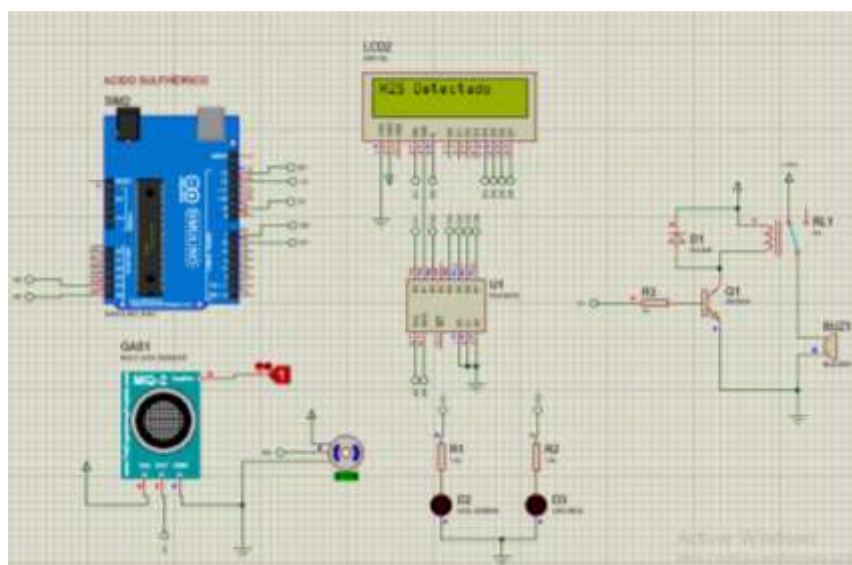
Al observar dicha problemática, se es recomendable utilizar un detector de ácido sulfhídrico, que ayude a informar a la persona en el caso de que el biogás no se encuentre completamente libre de dicho compuesto.

Un detector óptimo, consiste en la utilización de un arduino y un sensor MQ-136 de 5V, que va a detectar a dicho ácido sulfhídrico.

Dicho detector estará acompañado de una electroválvula, y cuando exista la presencia de dicho compuesto, la electroválvula se cerrará impidiendo el paso del biogás contaminado.

Figura 27*Detector de Ácido Sulfhídrico*

Nota. En el gráfico se observa el funcionamiento de un detector de ácido sulfhídrico, en el caso de que no exista la presencia de dicho componente en el biogás.

Figura 28*Detector de Ácido Sulfhídrico en Presencia de Dicho Compuesto*

Nota. En el gráfico se observa el funcionamiento de un detector de ácido sulfhídrico, en el caso de que exista la presencia de dicho componente en el biogás.

3.7 Usos del biogás

Como ya se había mencionado, el biogás es una fuente alternativa de generación de energía y calor, haciendo que dicho gas tenga muchas aplicaciones y beneficios.

En sí, el biogás es mucho más común utilizarlo y aprovecharlo a nivel térmico, es decir, puede ser utilizado para calefacción, para cocinar o calentar agua usándolo como sustituto de gas de cocina, o puede servir para calentar sitios o espacios como establos o casas.

En sí, el biogás posee varios usos, algunos de estos serían:

- Secado de grano
- Cocción de alimentos (cocina)
- Calefacción de ambientes
- Iluminación

Además, existen varios equipos que trabajan y aprovechan la energía térmica que produce el biogás, siendo entre los más comunes los calefones, lámparas y calentadores.

Figura 29

Equipos que Aprovechan la Energía Térmica del Biogás



Nota. En el gráfico se representa los distintos tipos de equipos que trabajan y aprovechan al biogás, y el consumo estimado de cada componenete. Tomado de (Academia de las renovables. Santa Fe, 2019)

A continuación, se observaran a algunos equipos que trabajan con biogás y se presentara la cantidad de consumo de biogás que tiene cada uno.

Tabla 14*Consumo del biogás por hora (l/h)*

Uso biogás	Consumo de biogás por hora (l/h)
Cocina doméstica	300
Cocina industrial	450
Calefactor lechones	300
Lámpara (equivalente a 60w)	120
Olla arrocera (2l)	140
Calefón de agua (14kW)	2500
Calefón de agua (26kW)	5000
Refrigeradora (100L)	30 (en zona fría) 75 (en zona caliente)
Motor <5hp (por cada 1hp)	400
Motor >5hp (por cada 1hp)	250
Ordeñadora (15hp)	2500
Generador (1.2kW)	600
Generador (3kW)	2100
1kWh eléctrico (5-20 kW)	1600

Nota. En la tabla se observa los valores de consumo de biogás por hora de distintos elementos. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

Tabla 15*Consumo de Biogás/ Hora de Algunos Equipos*

Uso	Consumidor	Razón de consumo
Cocina	Hornilla de 5cm de diámetro	0.32 $m^3/hora$
Cocina	Hornilla de 10cm de diámetro	0.46 $m^3/hora$
Cocina	Hornilla de 15cm de diámetro	0.63 $m^3/hora$
Cocina	Ebullición del agua (100°C)	0.08 $m^3/hora$
Iluminación	Una lámpara	0.07 $m^3/hora$
Iluminación	Dos lámparas	0.14 $m^3/hora$
Iluminación	Tres lámparas	0.21 $m^3/hora$

Nota. En la tabla se presenta la cantida de biogás que consumen algunos equipos por hora. Tomado de (Leon Cifuentes, 1991)

3.7.1 Equipos que Aprovechan la Energía Térmica del Biogás

Como ya se había mencionado con anterioridad existen muchos equipos que aprovechan el biogás y funcionan con este a través de una combustión directa, siendo los equipos más comunes las cocinas, lámparas, calefactores y refrigeradores

Se considera que para que exista una correcta combustión del biogás, se necesita que dicho gas posea una presión que oscile entre los 7 a 20 mbar.

Para calefactores, cocinas, lámparas a gas, calefactores y refrigeradores residenciales, tan solo se requiere una presión promedio de 7 a 9,8 mbar, sin embargo, para equipos considerablemente más grandes como calderas industriales o para la calefacción de galpones zootécnicos, se requerirá de una presión mayor.

Ya que dichos equipos grandes necesitan de por si una presión mayor de biogás, se utilizan sopladores de canal lateral o turbinas, que ayudan a aumentar la presión de biogás hasta unos 200 mbar, pero además dichos equipos añadidos también ayudan a tener un caudal constante de dicho gas.

3.7.1.1 Cocina a biogás

Como ya se había mencionado, las cocinas de biogás tan solo necesitan una presión promedio de 7 a 9,8 mbar para una correcta combustión, y ya que el biogás proveniente del biodigestor no posee una presión muy alta, se es recomendable realizar una conexión directa del biodigestor hacia las hornillas de la cocina (con sus respectivas válvulas de control).

3.7.1.2 Calefactores a biogás

Actualmente existen calefactores que funcionan por medio de la utilización del biogás y mayormente estos son utilizados para calefacción de animales como lechones.

3.7.1.3 Lámparas a biogás

Trabajan de manera muy similar a las lámparas de gas, mediante la combustión, estas lámparas a biogás tienen la capacidad de poseer una iluminación semejante a un foco de 60 Watts.

Figura 30

Lámpara a Biogás



Nota. En el gráfico se observa una lámpara que funciona con el biogás, a través de una combustión directa. Tomado de (Alibaba, 2021)

3.7.1.4 Refrigerador a biogás

Los refrigeradores a biogás, son refrigeradores que trabajan mediante el sistema de refrigeración por absorción, que similarmente al sistema de refrigeración por compresión, este aprovecha que las sustancias absorben todo el calor al cambiar de estado (de líquido a gaseoso).

3.7.2 Propiedades y características del biogás

A continuación, se presentaran algunas comparaciones que posee 1000 litros de biogás con respecto a otros combustibles y fuentes de energía alterna.

Tabla 16

Equivalencias energéticas con respecto 1000 litros de biogás

1000 litros ($1m^3$) de biogás equivalen a:	
5647 kcal	Energía (65% CH_4)
6.56 kWh	Energía (65% CH_4)
1.6 kg	Madera
1.2 kg	Bosta seca
1.1 litros	Alcohol
0.75 litros	Gasolina
0.65 litros	Gas-oíl
0.76 m^3	Gas natural
0.7 kg	Carbón
3.3 kWh_t	Calor útil (65% CH_4 ; rendimiento 50%)
2 kWh_t	Electricidad útil (65% CH_4 ; rendimiento 30%)

Nota. En la tabla se muestran algunas comparaciones que posee el biogás con respecto a otros combustibles y fuentes de energía. Tomado de (Martí Herrero, 2019)

Como ya se había mencionado con anterioridad, el biogás tiene muchas aplicaciones y puede ser utilizado en varios campos, sirviendo tanto como una fuente de energía eléctrica, como también una fuente de generación de calor.

Tabla 17

Características que presenta el biogás

Valores	Biogás	Gas Natural	Gas propano	Gas metano	Hidrogeno
Valor					
calorífico(kWh/m ³)	7.0	10	26	10	3
Densidad (t/m ³)	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de explosión (% de gas en el aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura de encendido	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43

Nota. En la tabla se observan las características que presentan los distintos tipos de gases combustibles en comparación con el biogás. Tomado de (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016)

Tabla 18*Valor Energético que presenta el biogás*

Combustible	Unidad (U)	Poder Calorífico en kWh/u	Rendimiento η en %			
			Cocinar	Fuerza Motriz	Luz	Calefacción
Corriente eléctrica	kWh	1	60%	90%	5%	-
Propano	Kg	13,9	60%	20%	3%	-
Gasolina	Lt.	13,0	-	25%	-	-
Petróleo	Lt.	12,0	-	-	-	60%
A.C.P.M (Diésel)	Lt.	12,0	-	30%	-	-
Carbón Mineral	Kg	9	30%	-	-	-
Madera	Kg	5	12%	-	-	-
Biogás	m^3	6	60%	20%	3%	1%

Nota. En la tabla se muestra el valor energético que presenta el biogás, frente a otros combustibles, observando de como el biogás es muy eficiente y trabaja a la par de los demás combustibles, resaltando su efectividad en el ámbito de la cocina y fuerza motriz.

Tomado de (Leon Cifuentes, 1991)

3.8 Estudio para la selección correcta del biodigestor con respecto a la necesidad de biogás

3.8.1 Estimado de biogás que se requiere diariamente

Como ya se había mencionado con anterioridad, el biogás puede ser utilizados en una variedad de equipos, y su uso abarca muchos ámbitos como son la iluminación, la calefacción, la cocción de alimentos, la generación de electricidad, etc.

Enfocándose en cuanto biogás diario se requiere en un hogar y además enfocándose en cuanta cantidad de desechos orgánicos se dispone, podemos determinar las dimensiones que va tener nuestro biodigestor.

3.8.2 Estudio enfocado en una zona climática cálida (Costa Ecuatoriana)

Nos enfocaremos primeramente en la necesidad de biogás que puede existir en una casa promedio habitada por seis personas, y centrándonos en una locación con un clima cálido que oscile entre los 24 a 26 °C (Costa Ecuatoriana), además, nos enfocaremos primordialmente en cubrir las necesidades de la cocción de alimentos e iluminación, exceptuando el ámbito de la calefacción, ya que en estas zonas cálidas no es muy común utilizar calefactores.

Para el estudio de biogás requerido, nos enfocaremos en las *tablas 14 y 15*.

Tabla 19

Consumo de biogás diario de distintos equipos

Equipos	Consumo del biogás por hora (m^3/h)	Número de equipos	Horas requeridas por día	Consumo del biogás requerido por día
		3 hornillas de		
Cocina	$0.46 m^3/h$	10cm de diámetro	7 horas	$9.66 m^3/día$
Lámpara	$0.07 m^3/h$	6 lámparas	6 horas	$2.52 m^3/día$
Refrigerador	$0.075 m^3/h$	1 Refrigerador	24 horas	$1.8 m^3/día$

Equipos	Consumo del biogás por hora (m^3/h)	Número de equipos	Horas requeridas por día	Consumo del biogás requerido por día
Calentador instantáneo de agua	$2 m^3/h$	1 calentador instantáneo de agua de 7L/min	1 hora	$2 m^3/día$
Generador	$0.6 m^3/h$	Generador (1.2kW)	2 horas	$1.2 m^3/día$
Total del biogás requerido por día				$17.18 m^3/día$

Nota. En la tabla se observa la cantidad de biogás que consume cada equipo de manera diaria, dándonos como resultado que se requiere diariamente un total de $17.18 m^3/día$ de biogás.

3.8.2.1 Cantidad de material orgánico requerido

Una vez ya determinada cuánta cantidad de biogás se requiere de manera diaria ($17.18 m^3/día$), se procederá a determinar cuánta cantidad de materia orgánica se requiere para cubrir dicha necesidad de biogás.

Hay que considerar que cada tipo de material orgánico produce distinta cantidad de biogás al día, como se puede observar en la z 9, es decir, algunos desechos orgánicos son más eficientes para producir biogás que otros.

En el caso del estiércol de los animales, el más eficiente es el estiércol de las aves, seguido por el estiércol del cerdo, y finalmente seguido por el estiércol de las vacas.

En el caso de los desechos de origen vegetal, estos son muy eficientes en producir biogás, sin embargo, estos residuos existen en menor cantidad a diferencia del estiércol de los animales, y su recolección en grandes cantidades resulta un poco más complicado.

Para nuestro estudio se consideró un número promedio de animales y personas que comúnmente existen en una granja.

Tabla 20

Cantidad de Biogás Diario Producido por Estiércol de Animales

N de animales	Tipo de animal	Estiércol producido (Kg/día)	Biogás producido ($m^3/día$)
21	Vaca (500 kg)	210 kg/día	8.4 $m^3/día$
20	Cerdo (90 kg)	81 kg/día	4.86 $m^3/día$
6	Personas	2.4 kg /día	0.144 $m^3/día$
10	Caballo (450 kg)	100 kg /día	4 $m^3/día$
20	Gallinas (2kg)	3.6 kg /día	0.228 $m^3/día$
Total de estiércol de animal disponible		397 kg/día	
Total de biogás diario disponible de estiércol de animal			17.632 $m^3/día$

Nota. En la tabla se observa que, en un total de 72 animales distintos y 6 personas, y una cantidad total de 397 kg de estiércol diario se produce 17.632 m^3 de biogás al día.

Tabla 21*Cantidad de Biogás Diario Producido por Residuos Vegetales*

Residuos	Cantidad de residuos kg/día	Biogás producido ($m^3/día$)
Paja de arroz	2 kg/día	0.7 $m^3/día$
Desechos orgánicos vegetales	3 kg/día	1.05 $m^3/día$
Total de residuos vegetales disponibles	5 kg/día	
Total de biogás diario disponible de residuos vegetales		1.75 $m^3/día$

Nota. En la tabla se observa que, en un total de 5kg de residuos de origen vegetal, se produce 1.75 m^3 de biogás al día.

Tabla 22*Total, de Biogás Diario Disponible*

Total de biogás diario disponible de estiércol de animal	17.632 $m^3/día$
Total de biogás diario disponible de residuos vegetales	1.75 $m^3/día$
Total de biogás diario disponible	19.382 $m^3/día$

Nota. En la tabla se observa el total del biogás diario producido por estiércol de animales y de personas y el total del biogás diario producido por residuos vegetales da un total de 19.382 $m^3/día$, siendo biogás suficiente para cubrir la necesidad de biogás de 17.18 $m^3/día$.

3.8.2.2 Dimensiones del biodigestor en una zona cálida

Una vez ya conocida la cantidad de materia orgánica que se dispone y que va a ser colocada en el biodigestor, procederemos a determinar el volumen óptimo que nuestro biodigestor deberá tener para que tenga capacidad de almacenar toda la materia orgánica.

Además, se debe considerar que la materia orgánica que va a ingresar en el biodigestor debe ser mezclada con agua, para ello existen porciones exactas como se observan en la *tabla 6*.

Tabla 23

Carga Diaria de Biodigestor

Animal / residuo	Kg estiércol/residuos + litros de agua	Mezcla litros/día (Carga diaria)
Vaca	210 + 210	420 litros/día
Cerdo	81 + 243	324 litros/día
Personas	2.4 + 7.2	9.6 litros/día
Caballos	100 + 300	400 litros/día
Gallinas	3.6 + 10.8	14.4 litros/día
Paja de arroz	2 + 4	6 litros/día
Desechos orgánicos vegetales	3 + 9	12 litros/día
Total de la mezcla		1186 litros/día

Nota. En la tabla se observa el total de la mezcla que va a ser colocada en el biodigestor.

Una vez ya determinada el total de la mezcla que va a ser colocada en el biodigestor (carga diaria), procederemos a determinar el volumen líquido o el volumen que el biodigestor, y para ello, utilizaremos la *ecuación 3*.

Como ya lo habíamos mencionado con anterioridad, nuestro biodigestor estará enfocado en ser utilizado en una locación de clima cálido (24 a 26 °C), así que, en base en la *tabla 7* nuestro tiempo de retención deberá ser de aproximadamente 37 días.

$$VL = CD \times TR$$

$$VL = 1186 \frac{L}{día} \times 37 \text{ días}$$

$$VL = 43882 L$$

$$VL = 43.882 m^3$$

Luego con ayuda de la *ecuación 2* procederemos a encontrar el volumen del biogás

$$VB = \frac{VL}{3}$$

$$VB = \frac{43.882 m^3}{3}$$

$$VB = 14.63 m^3$$

Finalmente, y con ayuda de la *ecuación 4*, procederemos a saber el volumen total del biodigestor

$$VT = VL + VB$$

$$VT = 43.882 m^3 + 14.63 m^3$$

$$VT = 58.51 m^3$$

Se debe considerar que el volumen líquido es en donde se encontrará la mezcla de material orgánico, así que hay que enfocarse netamente en dicho volumen para determinar las dimensiones que posee nuestro biodigestor.

Basándose en el volumen líquido requerido (43.882 m^3), y basándose en la *tabla 10* para la dimensión de la bolsa del biodigestor y en la *tabla 11* para las dimensiones de la zanja del biodigestor, podremos determinar el dimensionamiento óptimo que debe tener nuestro biodigestor.

En el caso de la bolsa del biodigestor, seleccionaremos una bolsa de 2.23m de diámetro y una longitud optima de 16.7m.

Tabla 24

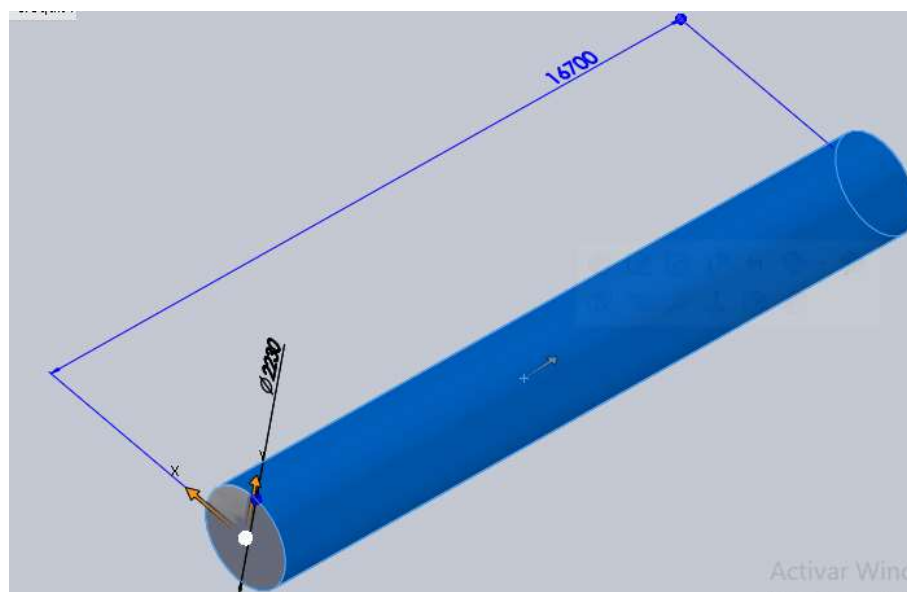
Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor (en una zona cálida)

Circunferencia (m)	Ancho de rollo (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Longitud biodigestor tubular		
				Mínima	Máxima	Optima
7	3.5	1.11	2.23	11.1	22.3	16.7

Nota. En la tabla se observa todas las dimensiones que tendrá nuestra bolsa de biodigestor.

Figura 31

Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor (en una zona cálida)



Nota. En el gráfico se representan las dimensiones que tendrá la bolsa del biodigestor tubular.

Tabla 25

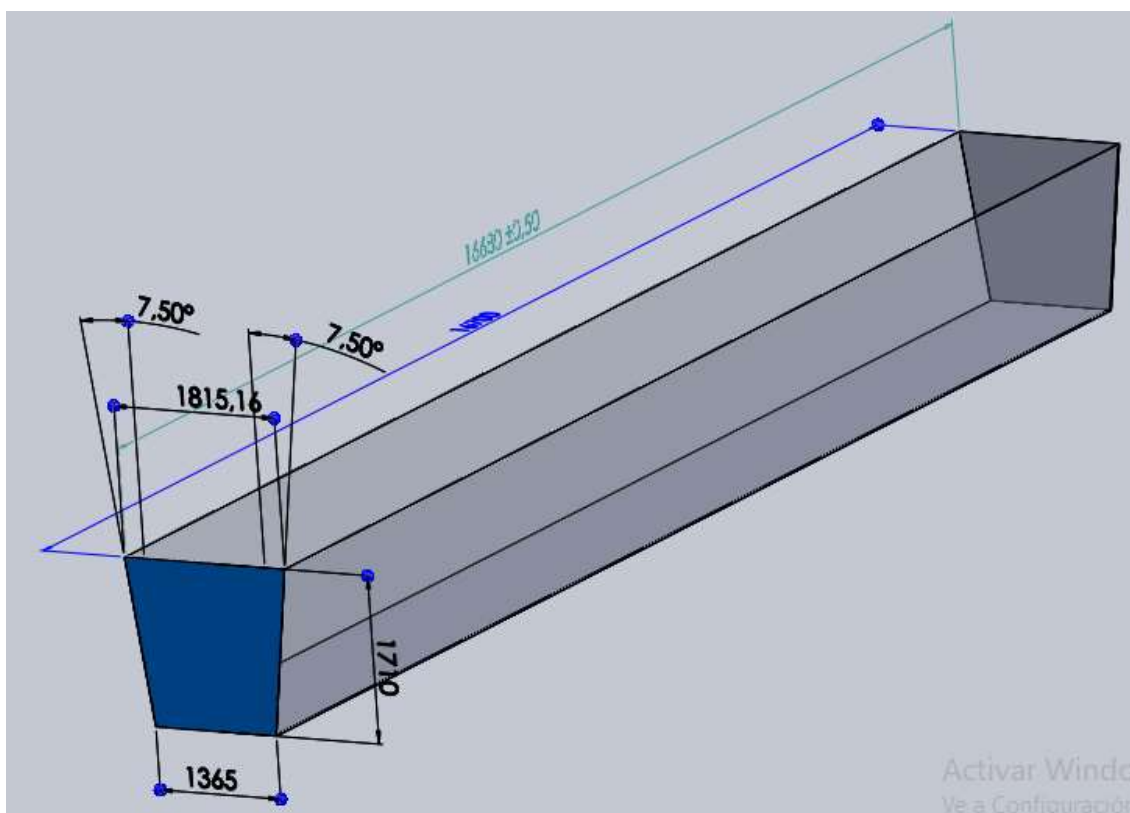
Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor (en una zona cálida).

α (°)						
desde	% VL	%VB	a(m)	b(m)	p(m)	$A_{zanja}(m^2)$
vertical						
7.5	80	20	1.365 m	1.81 m	1.71 m	2.71 m ²

Nota. En la tabla se observa las dimensiones que tendrá la zanja del biodigestor.

Figura 32

Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor (en una zona cálida).



Nota. En el gráfico se representan las dimensiones que tendrá la zanja del biodigestor tubular

Para saber si seleccionamos de manera correcta las dimensiones de nuestro biodigestor, utilizaremos la *ecuación 8*, que sirve para determinar el volumen líquido de un biodigestor, conociendo la longitud y el área de la zanja del biodigestor.

$$VL = A_{zanja} \times L$$

$$VL = 2.71 \text{ m}^2 \times 16.7\text{m}$$

$$VL = 45.26 \text{ m}^3$$

El biodigestor seleccionado tiene una capacidad de almacenar 45.26 m^3 de volumen líquido, es decir que puede almacenar sin problema los 43.882 m^3 de volumen líquido que requerimos que almacene el biodigestor.

3.8.3 Estudio enfocado en una zona climática templada

Como ya se había mencionado con anterioridad, la temperatura es un factor importante que va a influir en el proceso de descomposición de la materia orgánica, ya que, si se realiza la descomposición en una zona con altas temperaturas, existirá un menor tiempo de retención, y el dimensionamiento del biodigestor será de una longitud menor; en cambio, si el biodigestor esa ubicado en una zona templada, existirá un mayor tiempo de retención, y la longitud del biodigestor será mayor.

Ahora nos enfocaremos en la necesidad de biogás que puede existir en una casa promedio habitada por seis personas, y centrándonos en una locación con un clima templado que oscile entre los 12 a $17 \text{ }^\circ\text{C}$ (semejante al clima del Valle del Carchi).

Nos enfocaremos primordialmente en cubrir las necesidades de la cocción de alimentos, iluminación y calefacción, ya que, en estas zonas a diferencia de las zonas cálidas, si se requiere utilizar calefactores.

Para el estudio de biogás requerido, nos enfocaremos en las *tablas 14 y 15*.

Tabla 26*Consumo de Biogás Diario de Distintos Equipos*

Equipos	Consumo del biogás por hora (m^3/h)	Número de equipos	Horas requeridas por día	Consumo del biogás requerido por día
		3 hornillas de		
Cocina	$0.46 m^3/h$	10cm de diámetro	7 horas	$9.66 m^3/día$
Lámpara	$0.07 m^3/h$	6 lámparas	6 horas	$2.52 m^3/día$
Calefactor	$0.03 m^3/h$	7 Calefactores	5 horas	$1.05 m^3/día$
Calentador instantáneo de agua	$2 m^3/h$	1 calentador instantáneo de agua de 7L/min	1 hora	$2 m^3/día$
Refrigerador	$0.075 m^3/h$	1 Refrigerador	24 horas	$1.8 m^3/día$
Generador	$0.6 m^3/h$	1 generador (1.2kW)	2 horas	$1.2 m^3/día$
Total del biogás requerido por día				$18.23 m^3/día$

Nota. En la tabla se observa la cantidad de biogás que consume cada equipo de manera diaria, incluido equipos de calefacción, dándonos como resultado que se requiere diariamente un total de $18.23 m^3/día$ de biogás.

3.8.3.1 Cantidad de material orgánico requerido

En este caso podemos hacer uso de los datos de las *tablas 20, 21 y 22*, ya que, como se había mencionado con anterioridad, para el desarrollo de esas tablas se

consideró un número promedio de animales y personas que comúnmente existen en una granja, y con respecto a los residuos de origen vegetal, el único factor a cambiar es la utilización de la paja de trigo en vez de la paja de arroz, ya que en climas templados es más común la cosecha de trigo que de arroz, y el trigo, además, produce la misma cantidad de biogás al día.

Se considerara finalmente que con el material orgánico diario que se produce, se dispone de 19.382 m^3 de biogás al día.

3.8.3.2 Dimensiones del biodigestor en una zona fría

Al utilizar los mismos datos del material orgánico disponible (ya vistos en el estudio enfocado en zonas cálidas), utilizaremos la misma cantidad de mezcla que va a ser colocada en el biodigestor de manera diaria (basándonos en la *tabla 23*) que es de 1186 litros al día.

Como ya lo habíamos mencionado con anterioridad, nuestro biodigestor estará enfocado en ser utilizado en una locación de clima templado (12 a 17 °C), así que, en base en la *tabla 7* nuestro tiempo de retención deberá ser superior a 65 días.

Sin embargo y basándonos en la *tabla 8*, el biodigestor al encontrarse en una zona con temperaturas más bajas al promedio de 20 °C, se es recomendable la utilización de un diseño de calefacción solar pasiva, en este caso se es recomendable la construcción de un invernadero (construido de ladrillo o de la propia geomembrana), que ayude a un aumento de la temperatura del biodigestor de 6 a 10 °C, haciendo que finalmente el biodigestor trabaje con una temperatura de 18 a 23 °C y un tiempo de retención de aproximadamente 54 días.

$$VL = CD \times TR$$

$$VL = 1186 \frac{L}{\text{día}} \times 54 \text{ dias}$$

$$VL = 64.04 \text{ m}^3$$

Luego con ayuda de la *ecuación 2* procederemos a encontrar el volumen del biogás

$$VB = \frac{VL}{3}$$

$$VB = \frac{64.04m^3}{3}$$

$$VB = 21.34 m^3$$

Finalmente, y con ayuda de la *ecuación 4*, procederemos a saber el volumen total del biodigestor

$$VT = VL + VB$$

$$VT = 64.04 m^3 + 21.34 m^3$$

$$VT = 85.38 m^3$$

Basándose en el volumen líquido requerido ($64.04 m^3$), y basándose en la *tabla 10* para la dimensión de la bolsa del biodigestor y en la *tabla 11* para las dimensiones de la zanja del biodigestor, podremos determinar el dimensionamiento óptimo que debe tener nuestro biodigestor.

En el caso de la bolsa del biodigestor, seleccionaremos una bolsa de 2.55m de diámetro y una longitud optima de 19.1m.

Tabla 27

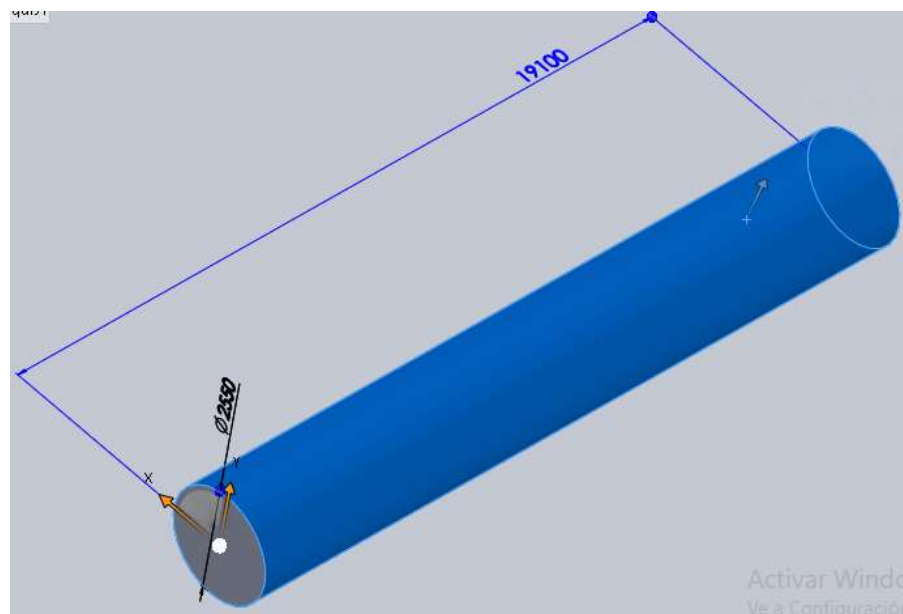
Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor (en una zona templada)

Circunferencia (m)	Ancho de rollo (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Longitud biodigestor tubular		
				Mínima	Máxima	Optima
8	4	1.27	2.55	12.7	25.5	19.1

Nota. En la tabla se observa todas las dimensiones que tendrá nuestra bolsa de biodigestor.

Figura 33

Dimensionamiento de la Bolsa del Biodigestor (en una zona templada)



Nota. En el gráfico se representan las dimensiones que tendrá la bolsa del biodigestor tubular.

Tabla 28

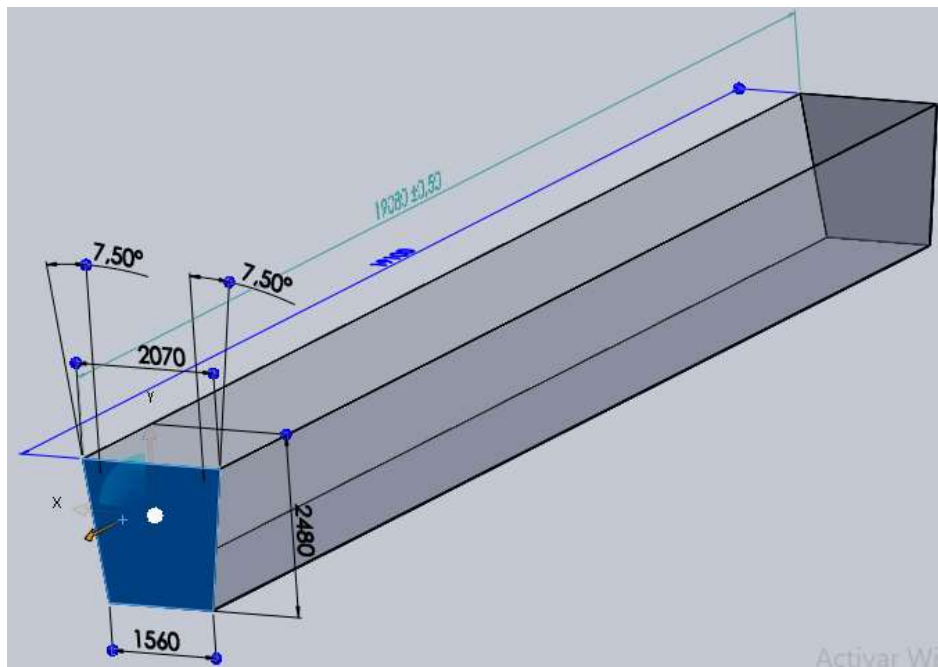
Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor (en una zona templada).

α (°)	% VL	%VB	a(m)	b(m)	p(m)	A_{zanja} (m ²)
desde vertical						
7.5	80	20	1.56 m	2.07 m	1.95 m	3.548 m ²

Nota. En la tabla se observa las dimensiones que tendrá la zanja del biodigestor.

Figura 34

Dimensionamiento de la Zanja del Biodigestor (en una zona templada)



Nota. En el gráfico se representan las dimensiones que tendrá la zanja del biodigestor tubular.

Como lo realizamos anteriormente, verificaremos si seleccionamos de manera correcta las dimensiones de nuestro biodigestor utilizando la *ecuación 8*.

$$VL = A_{zanja} \times L$$

$$VL = 3.548 \text{ m}^2 \times 19.1 \text{ m}$$

$$VL = 67.76 \text{ m}^3$$

El biodigestor seleccionado tiene una capacidad de almacenar 67.76 m^3 de volumen líquido, es decir que puede almacenar sin problema los 64.04 m^3 de volumen líquido que requerimos que almacene el biodigestor.

Tabla 29*Comparación de los Biodigestores en Base a su Ubicación*

Ubicación	Carga diaria	Diseño de calefacción solar pasiva	Temperatura	Tiempo de retención	Longitud/diámetro de la bolsa del biodigestor
Zona cálida	1186 litros/día	No requiere	24 a 26 °C	37 días	L=16.7 m D=2.23 m
Zona templada	1186 litros/día	Uso de un invernadero (construido de ladrillo o geomembrana)	12 a 17 °C	68 días	L=21.5 m D=2.86 m
			Con diseño 18 a 23 °C	Con diseño 54 días	Con diseño L=19.1 m D=2.55 m

Nota. Como se observa en la tabla, uno de los factores que más influyen en los biodigestores es la temperatura, ya que si existe una mayor temperatura el tiempo de retención será menor y por ende nuestro biodigestor será de un menor tamaño, pero, si nuestro biodigestor trabaja en un clima templado, su tiempo de retención será mucho mayor y por ende el biodigestor será de mayor tamaño (añadiendo además de que si existen temperaturas menores a las de 20 °C, se debe realizar un sistema de calefacción pasiva).

3.9 Biogás enfocado para la generación de calor

Como ya se había mencionado con anterioridad, el biogás posee varias aplicaciones en ámbitos como la cocina, iluminación y calefacción.

En si el biogás es comúnmente utilizado a través de una combustión directa, el poder calorífico del biogás es de 4.700 a 5.500 kcal/m³ o 6.27 kWh/m³, puede generar

una cantidad de calor equivalente a $22.000 \text{ btu}/\text{m}^3$, y su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y varía de $650 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.9.1 Calefacción enfocada en la crianza de animales

El biogás es comúnmente utilizado en calefactores para establos o corrales, ayudando a proporcionar un entorno cálido, confortable y óptimo para la crianza de los animales, pero más específicamente para la crianza de cerdos, ya que estos animales son los que más requieren de calefacción, pues estos, no han desarrollado en si un mecanismo regulador de temperatura.

El lechón, para su crecimiento óptimo, requiere un estimado de temperatura de entre 30 a $35 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que sus madres requieren tan solo temperaturas de entre 15 a $21 \text{ }^\circ\text{C}$, esto implica que se deben crear microclimas en los establos de los cerdos, y esto se puede realizar mediante calefactores.

Tabla 30

Lista de modelos de calefactores a biogás

Fabricante	Modelo	Capacidad (btu/hr)	Consumo teórico ($\text{m}^3 \text{ biogás}/\text{hr}$)
Gasolec	G12	42000	2.03
Gasolec	M8	17200	0.83
Gasolec	S8	12000	0.58
Gasolec	M3	5000	0.24
Space-Ray	SHP2	4200	0.20
Space-Ray	SHP3	7000	0.34
Puxin	Room Heater	2500	0.12

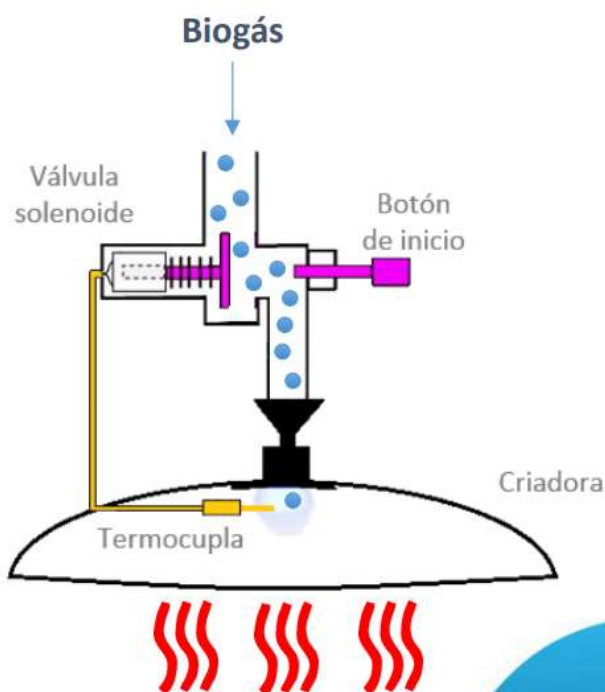
Nota. En la tabla se observan las listas de otros modelos de calefactores a biogás, donde se muestran su capacidad y el consumo teórico de biogás ($1 \text{ btu}/\text{hora} = 0.0002931 \text{ kilovatio}$). Tomado de (Viquez Arias J. A., 2015)

3.9.1.1 Funcionamiento de un calefactor a biogás

Como se puede observar en la figura a continuación, los calefactores a biogás (para calefacción de lechones) presentan de una termo cúpula, quien será la encargada de detectar si la llama en la criadora se apaga, si está se apaga, inmediatamente la termo cúpula se enfriará y la válvula solenoide se cerrará, impidiendo el paso del biogás hacia la criadora.

Figura 35

Funcionamiento de un Calefactor a Biogás



Nota. En el gráfico se puede observar el funcionamiento de un calefactor que trabaja mediante biogás. Tomado de (Viquez, 2014)

Figura 36

Calefactor a biogás



Nota. En el gráfico se observa las dimensiones y partes de un calefactor que funciona a biogás. Tomado de (Alibaba, 2021).

Figura 37

Calefactor a Biogás enfocado para Gallinas



Nota. En el grafico se observa un calefactor a biogas enfocado para gallinas.Tomado de (QINGDAO WRANGLER, 2019)

3.9.1.2 Factibilidad de calefactores a biogás

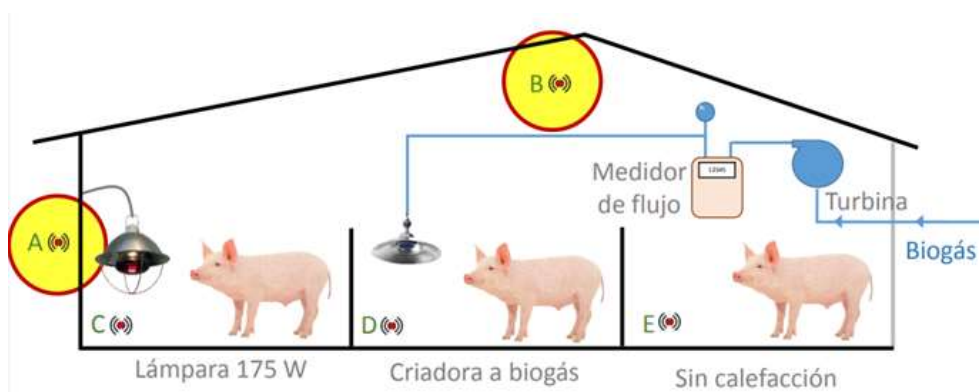
Se recomienda el uso de una turbina regenerativa, para aumentar el flujo de presión del biogás que ingresara en el calefactor, debido a que la presión de biogás que genera el biodigestor suele ser considerablemente baja.

De acuerdo con (Viquez Arias J. A., 2015), con la utilización de una turbina regenerativa de 220V, 60Hz, 0.6hp, y con una capacidad de $1.6 \text{ m}^3/h$, se puede aumentar la presión de biogás considerablemente, sin embargo, se hará que dicho calefactor trabaje a 28 mbar, existiendo un consumo de 0.12 m^3 de biogás por hora.

Para determinar la eficiencia que presenta un calefactor de lechones a biogás, nos enfocaremos en el estudio realizado por (Viquez Arias J. A., 2015), en donde durante 13 días se realiza una comparación de tres parideras con sistemas de calefacción diferentes: la primera paridera con calefacción de una lámpara de 175W, la segunda paridera con calefacción de un calefactor a biogás, y la tercera paridera sin calefacción.

Figura 38

Sistema de Calefacción e Iluminación en un Criadero de Cerdos

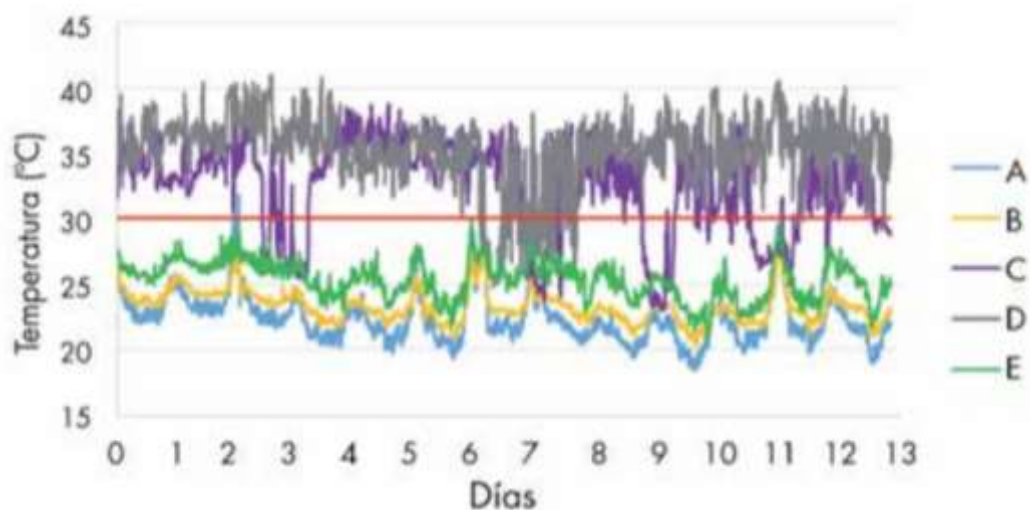


Nota. En el gráfico se observan tres parideras de cerdos con sistemas de calefacción diferentes, siendo la primera ayudada con una lámpara de 175 W, la segunda con un calefactor a biogás y la tercera paridera sin calefacción. Tomado de (Viquez, 2014)

El estudio planteado por (Viquez Arias J. A., 2015), dio como resultado que la paridera sin calefacción, luego de los 13 días, mantuvo una temperatura promedio a los 25 °C sin lograr llegar a los 30 °C requeridos, mientras, la paridera con lámpara de 175 W logró mantener una temperatura de 31 °C, pero en un 31% del tiempo, su temperatura estuvo por debajo de los 30 °C, y finalmente, la paridera de calefactor a biogás logró mantener una temperatura promedio de 35 °C, y tan solo en un 6.3% de tiempo, su temperatura estuvo por debajo de los 30 °C, dando como resultado, que un calefactor de lechones a biogás presenta menores fluctuaciones de temperatura que la lámpara eléctrica, y por ende es más efectivo, añadiendo además que el uso del calefactor a biogás presenta un mayor ahorro energético.

Figura 39

Mediciones de Temperatura de Tres Parideras con Calefacción Distinta



Nota. En el gráfico se observan las mediciones de temperatura que se presentaron en las tres parideras, luego de los 13 días, en donde E corresponde a la paridera sin calefacción, C corresponde a la paridera con la lámpara de 175 W, y D corresponde a la paridera con calefactor a biogás. Tomado de (Viquez Arias J. A., 2015)

Tabla 31*Comparación de las Tres Parideras con Distintos Tipos de Calefacción*

Tipo de calefacción	Temperatura promedio	Constancia de temperatura
Paridera sin calefacción	25 °C	25 °C constantes sin variar
Paridera con lámpara de 175 W	31 °C	31% del tiempo, se mantuvo por debajo de los 30 °C
Paridera de calefactor a biogás	35 °C	6.3% del tiempo se mantuvo por debajo de los 30 °C

Nota. En la tabla se observa la temperatura promedio y las variaciones que se presentaron en las tres parideras con calefacción diferente, siendo la paridera con calefactor a biogás siendo la más efectiva. Tomado de (Viquez Arias J. A., 2015)

Según (Viquez Arias J. A., 2015) al basarse en la proyección de índices de reproducción típica de los cerdos, se determina que en una granja con ciclo completo se requiere de un 16 a 68 % de estiércol disponible, para la producción de biogás necesario para cubrir la demanda de calefacción de los lechones (este rango depende si la calefacción se la realiza de 12 a 24 horas o de 10 a 21 días); mientras que en una granja de reproducción (que vende los lechones al destete), demanda una mayor cantidad de estiércol para producir el biogás necesario (50 % a 100%), y si en dicha granja se realiza una calefacción de 24 horas por 21 días seguidos, el material orgánico disponible no alcanzara a producir suficiente biogás.

3.9.2 Calefacción enfocada en domicilios

Actualmente, si existen en el mercado calefactores domiciliarios que funcionen a gas metano, y estos trabajan a una potencia promedio de 4 kW, sin embargo, la

mayoría de los calefactores comerciales trabajan con propano, pero se puede trabajar con estos calefactores a propano, y modificarlos para que puedan trabajar con biogás.

Figura 40

Calefactor a Gas Metano (Biogás)



Nota. En el gráfico se observa un calefactor de interiores, que funciona a gas metano, y que posee una potencia de 4 kW. Tomado de (Acantara, 2021)

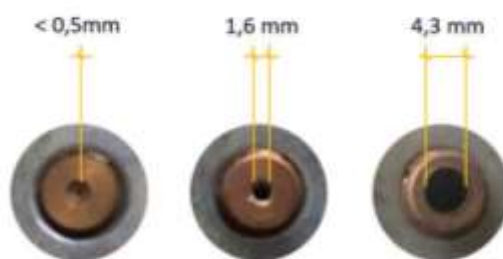
Los calefactores de gas trabajan de manera similar a con una estufa, ya que dichos poseen un quemador, y para que un calefactor a propano trabaje con biogás, se necesita modificar el quemador de dicho calefactor, es decir, se debe modificar aspectos esenciales en el quemador, para que este pueda funcionar de propano a biogás.

El primer punto a modificar, es que se debe aumentar el diámetro del inyector del quemador a propano, con la finalidad de que exista un mayor ingreso de biogás, se

realiza esta modificación debido a que el propano posee un mayor poder calorífico (26 kWh/m³) con respecto al biogás (6.27 kWh/m³), y por ende, se necesita más cantidad de biogás (a diferencia del propano) para que el calefactor trabaje de manera correcta.

Figura 41

Modificación del Diámetro del Inyector de un Quemador



Nota. En el gráfico se muestra la modificación del inyector de un quemador a propano, para que este pueda funcionar a biogás. Tomado de (Viquez Arias, Caydiid , & Adhiambo Omondi, 2018)

Se puede determinar el diámetro óptimo que debe tener el inyector del quemador para que este pueda trabajar a biogás, mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 13

Diámetro del inyector

$$d_i = \sqrt{\frac{Q_{biogás}}{(0.036)Cd}} \times \sqrt[4]{\frac{s}{p}}$$

Donde:

d_i = Diámetro del inyector del quemador en mm

Cd = Coeficiente de flujo (valores entre 0.8 y 0.9)

s = Gravedad específica, usualmente de 0,94 kg/m³

p = Presión del biogás en mbar

$Q_{biogás}$ = caudal del biogás en $\left(\frac{m^3}{hr}\right)$

Se puede determinar el caudal del biogás (consumo del biogás en el calefactor) mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 14

Consumo de biogás en (m^3/h)

$$Q_{biogás} = \frac{P}{PC}$$

$$Q_{biogás} = \frac{P}{PC}$$

Donde:

PC = Poder calorífico del biogás (6.27 kWh/m³)

P = Potencia en kW

$Q_{biogás}$ = caudal del biogás en $\left(\frac{m^3}{hr}\right)$

Se puede determinar la potencia térmica mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 15

Potencia térmica

$$P = Q_{biogás} \times PC$$

Donde:

PC = Poder calorífico del biogás (6.27 kWh/m³)

P = Potencia en kW

$Q_{biogás}$ = caudal del biogás en $\left(\frac{m^3}{hr}\right)$

eficiencia = Eficiencia térmica en %

Una vez tomado en cuenta el diámetro del inyector del quemador, otro factor que se debe considerar es el aire que ingresa al quemador.

Se debe modificar al quemador con la finalidad de que ingrese menos aire, esto es debido a que el biogás requiere de menos aire para su combustión ($6.6 \text{ m}^3/\text{m}^3$), a diferencia del gas propano ($23.9 \text{ m}^3/\text{m}^3$).

Figura 42

Funcionamiento de un Quemador a Biogás



Nota. En el gráfico se observa el funcionamiento básico de un quemador a biogás.

Tomado de (RedBioLAC, 2019).

3.9.2.1 Factibilidad de calefactores domiciliarios

Se puede calcular el consumo de biogás (en $\text{m}^3/\text{día}$) de un calefactor mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 16

Consumo de biogás en ($\text{m}^3/\text{día}$)

$$\text{consumo} = \left(\frac{P}{PC} \right) \times t$$

Donde:

Consumo= consumo del calefactor en ($\text{m}^3/\text{día}$)

P= Potencia del aparato en kW

PC=Poder calorífico del gas (kWh/m^3)

t= tiempo del funcionamiento del aparato en el día (hr/día)

A continuación, se realizará una comparación con respecto al consumo de gas que tendrían los calefactores domiciliarios, si estos son utilizados con gas propano o si estos son utilizados con biogás.

Tabla 32

Consumo de Calefactores Utilizando Biogás

Potencia del calefactor	Poder calorífico del biogás en (kWh/m ³)	Horas de consumo promedio	Consumo del biogás
4.2 kW	6.27 kWh/m ³	5 horas	3.3 (m ³ /día)
4 kW		5 horas	3.18 (m ³ /día)
3 kW		5 horas	2.39 (m ³ /día)

Nota. En la tabla se observa el consumo teórico de biogás de tres calefactores domiciliarios con potencias diferentes.

Tabla 33*Consumo de Calefactores Utilizando Propano*

Potencia del calefactor	Poder calorífico del propano en (kWh/m ³)	Horas de consumo promedio	Consumo del propano
4.2 kW	26 kWh/m ³	5 horas	0.80 (m ³ /día)
4 kW		5 horas	0.76 (m ³ /día)
3 kW		5 horas	0.57 (m ³ /día)

Nota. En la tabla se observa el consumo teórico de propano de tres calefactores domiciliarios con potencias diferentes.

Como se puede observar en las tablas anteriores, los calefactores a propano consumen una menor cantidad de gas a diferencia de un calefactor a biogás, esto (como ya se había visto anteriormente) es debido a que el propano posee un mayor poder calorífico.

3.9.3 Equipos necesarios para la utilización del biogás en la calefacción

En si se requieren de ciertos equipos o aparatos para que el biogás proveniente del biodigestor pueda ser utilizada de manera óptima en los diferentes equipos de calefacción que vayamos a requerir.

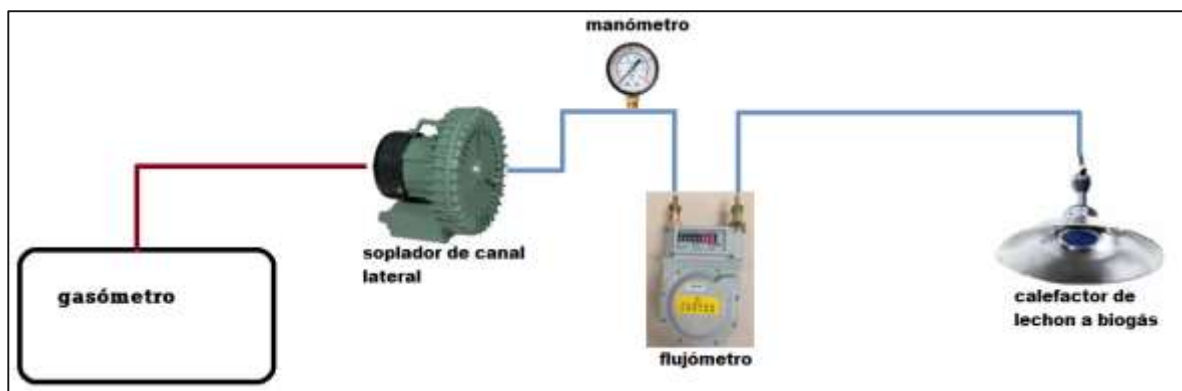
Primeramente, nos enfocaremos en el aspecto de la presión necesaria que debe tener el biogás para que pueda trabajar de manera eficiente en los distintos equipos de calefacción.

Como ya se había mencionado con anterioridad, para una combustión óptima del biogás, tan solo se requiere de una presión de entre 7 a 20 mbar, sin embargo, el biodigestor produce biogás a una presión considerablemente baja, por esta razón, se

recomienda el uso de una turbina regenerativa, para aumentar el flujo de presión del biogás que ingresará en nuestros equipos de calefacción, y para que así, estos puedan trabajar de manera más eficiente.

Figura 43

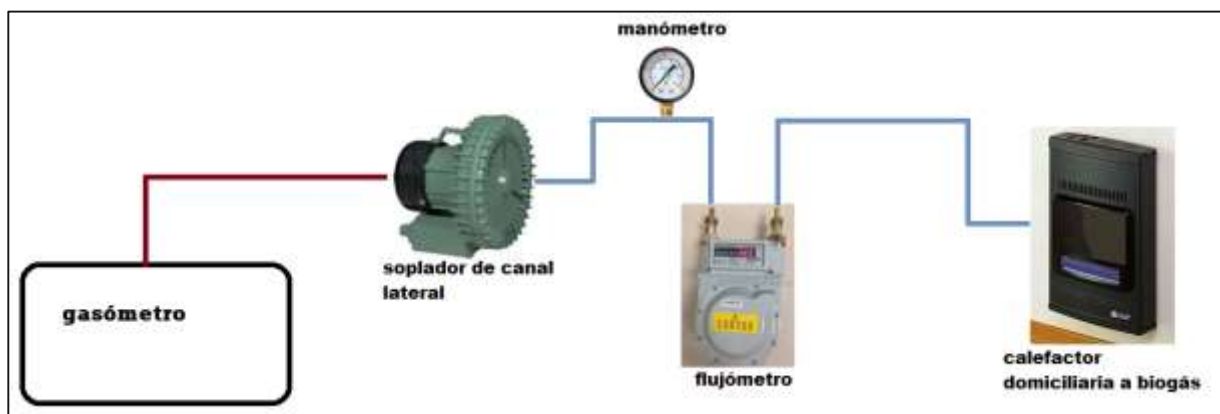
Conducción de Biogás para un Calefactor



Nota. En el gráfico se observan los equipos primordiales que se requieren para una distribución del biogás óptima y a una presión considerable, todo con la finalidad de alimentar un calefactor.

Figura 44

Conducción de Biogás para un Calefactor Domiciliario



Nota. En el gráfico se observan los equipos primordiales que se requieren para una distribución del biogás óptima y a una presión considerable, todo con la finalidad de alimentar un calefactor domiciliario.

Como se observa en las *figuras 43 y 44*, para distribuir el biogás desde el biodigestor o gasómetro hasta nuestros equipos de calefacción, se requerirán de algunos artefactos que permitan una correcta y óptima distribución de biogás:

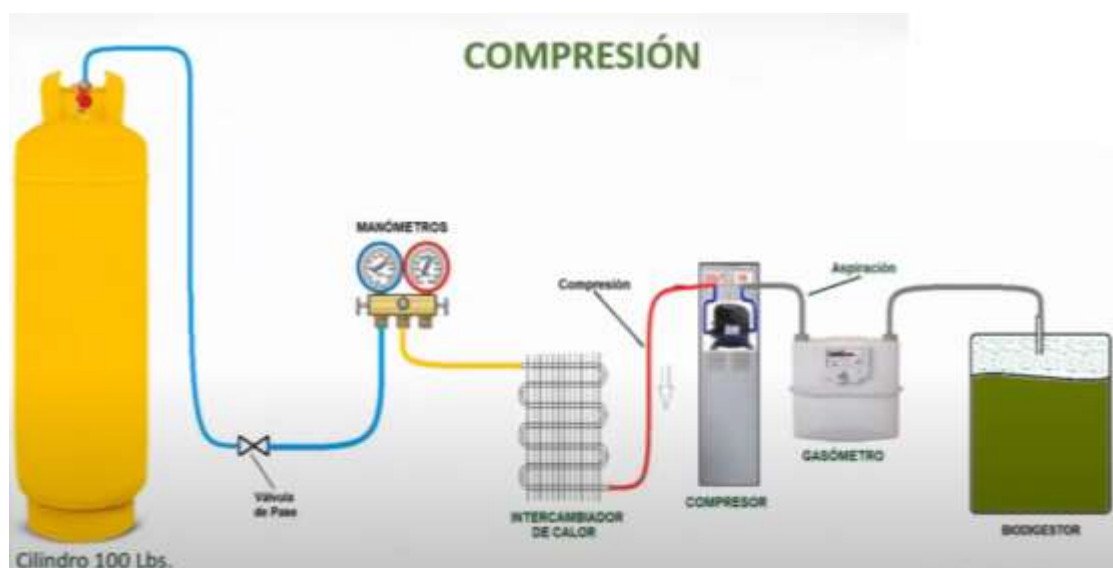
- Podemos transportar nuestro gas, almacenándolo en una bolsa compuesta del mismo material del que está echo el biodigestor (geomembrana de polietileno), dicha bolsa se denomina como gasómetro, (el gasómetro también puede estar compuesto por otro material como un tanque de cubierta fija) y está almacena al gas a una presión promedio de 20 cm de columna de agua (19 mbar)
- El soplador de canal lateral, como ya se había mencionado ayuda a aumentar la presión del biogás, debido a que el biogás proveniente del gasómetro se conduce a una baja presión, ayudando así, a que ingrese una presión considerable a nuestros equipos de calefacción.
- Seguido de nuestro soplador, se deberán colocar manómetros de baja presión, seguidos de un flujómetro que se encargará de medir el volumen de biogás utilizado.
- En toda la red de distribución de nuestro biogás, se colocarán válvulas, para el ingreso y cierre de la conducción del biogás, además se recomienda la utilización de manguera PET, para la conexión del gasómetro al soplador y la conexión del flujómetro hasta nuestros equipos de calefacción, mientras que se recomienda una conexión con tubería PVC de ½ pulgada desde el soplador hasta nuestro flujómetro, aunque si también existe una extensa distancia entre el flujómetro y el equipo de calefacción, puede también utilizarse tuberías PVC.

3.9.4 Factibilidad del almacenamiento de biogás

Como ya se había visto con anterioridad, existen dos maneras de almacenamiento de biogás, la primera es almacenar el gas a presión con ayuda de un compresor, en cilindros que comúnmente son utilizados para el gas propano, y la otra forma es almacenar el gas en tanques fijos o gasómetros a baja presión.

Figura 45

Almacenamiento del Biogás a Presión



Nota. En el gráfico se observa el proceso de compresión por el que pasa el biogás para poder ser almacenado en un cilindro. Tomado de (Leiva, 2021).

Tabla 34

Características de un Cilindro de Gas Estandarizado

Descripción	Valores
Capacidad	100 Lbs (45.36 kg)
Diámetro	35.5 cm (0.375 m)
Longitud	125 cm (1.25 m)
Espesor	2 mm (0.02 m)

Descripción	Valores
Presión	250 psi (1723689.77 Pa)

Nota. En la tabla se observa la información de un cilindro normalizado para almacenar propano. Tomado de (Leiva, 2021)

Enfocándonos en el almacenamiento de biogás a presión en un cilindro (utilizado comúnmente para gas propano), si quisiéramos ver la factibilidad de almacenar biogás en tanques, podríamos determinarlo, obteniendo la cantidad de energía que el biogás tendría al ser almacenado en el tanque y compararlo con la cantidad de energía que tendría otro tipo de gas (en este caso propano) almacenándolo en un tanque con las mismas dimensiones.

Ecuación 17

Cantidad de Energía (en Joules)

$$Q = PCI \times m$$

Donde:

Q = cantidad de energía (joule)

PCI = poder calorífico inferior

m = masa

Primeramente, determinaremos la cantidad de energía del metano considerando que el biogás posee un porcentaje de 65% de metano.

Basándonos en los valores de la *tabla 34* (diámetro 0.375m), podemos determinar que el volumen del tanque a utilizar es de 0.138 m^3 .

Luego con el uso de la fórmula de los gases ideales y enfocándonos en la *tabla 34* podemos determinar el número de moles del metano.

$$n_{biogás} = \frac{PV}{RT}$$

$$n_{\text{biogás}} = \frac{(1723689)(0.138\text{m}^3)}{(8.3144 \frac{\text{J}}{\text{mol}\cdot\text{K}})(303.15\text{K})}$$

$$n_{\text{biogás}} = 94.37 \times 65\% = 61.34 \text{ mol}$$

$m = \text{masa molar } CH_4 \times \text{cantidad de moles}$

$$m = \left(0.01604 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}\right) \times 61.34 \text{ mol}$$

$$m = 0.9839 \text{ kg de } CH_4$$

Finalmente, con ayuda de la ecuación 17, determinaremos la cantidad de energía del CH_4 almacenado en el tanque.

$$Q = PCI \times m$$

$$Q = \left(50050 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}\right) \times (0.9839 \text{ kg})$$

$$Q = 49244 \text{ KJ}$$

A continuación, determinaremos la cantidad de energía del propano

Según (Leiva, 2021), la cantidad de energía de propano en nuestro tanque sería de 2101982.4 KJ.

$$Q = PCI \times m$$

$$Q = \left(46340 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}\right) \times (45.36 \text{ kg})$$

$$Q = 2101982.4 \text{ KJ}$$

Se puede observar de como el cilindro cargado de propano posee una energía considerablemente mayor con respecto al cilindro cargado con biogás (propano 42 veces mayor al biogás), haciendo que resulte muy poco factible el almacenamiento de biogás a presión en un cilindro.

De acuerdo con (Leiva, 2021), no resulta factible el almacenar el biogás en este tipo de cilindros, puesto a que estos cilindros ofrecerían una muy baja cantidad de

energía, resultando más factible la utilización del propano tradicional, además, se recomienda que el consumo de biogás se lo realice muy cerca del biodigestor (no superior a 100 m del biodigestor y utilizando tubos PVC de aproximadamente $\frac{3}{4}$ de pulgada), debido a que dicho biogás no resulta factible su transporte ni almacenamiento en dichos tanques.

3.10 Factibilidad del uso de un biodigestor para generar calor

Como ya lo habíamos visto con anterioridad, el biogás producido por el almacenamiento de material orgánico en un biodigestor, provee muchos beneficios, tanto económicos como ambientales.

Ya hemos observado de como dicho gas metano (biogás), puede ser utilizado en muchos campos (calefacción, cocina, iluminación, refrigeración) y en muchos equipos (estufas, refrigeradores, calefactores, lámparas), y siendo la manera más común de darle uso, a través de la combustión directa.

Los calefactores son uno de los equipos que más comúnmente trabajan con biogás, existiendo en el mercado una variedad de calefactores a biogás (especialmente calefactores para lechones y aves), y como se puede observar en el *punto 3.9.1.2*, dichos calefactores poseen una mejor eficiencia con respecto a otras fuentes de calefacción (lámparas eléctricas) en el aspecto de crianza de animales.

Para nuestro estudio, nos enfocaremos en el costo de energía eléctrica que puede presentar un sistema de calefacción (en un domicilio y un establo) utilizando un biodigestor, y lo compararemos con respecto al costo eléctrico que presentaría un sistema de calefacción convencional (utilizando equipos eléctricos).

Para dicho estudio no enfocaremos en un biodigestor ubicado en una zona templada (sierra ecuatoriana), en donde existan temperaturas que oscilen los 12 a 17 °C.

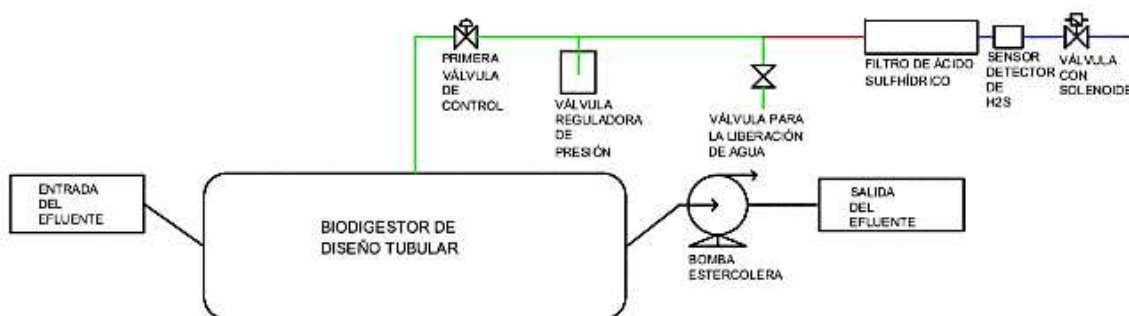
Nos enfocaremos en una zona templada, debido a que aquí resultaría eficiente la utilización de calefactores.

Con respecto al tamaño del biodigestor, nos enfocaremos en las dimensiones del biodigestor de las *tablas 27 y 28* (bolsa de 2.55 m de diámetro con una longitud de 19.1 y una zanja de 3.548 m^2 de área).

Con respecto a la carga diaria y producción de biogás diaria de dicho biodigestor, nos enfocaremos en la *tabla 22 y 23* (carga diaria de 1186 litros/día y producción de biogás de 19.382 $\frac{m^3}{día}$).

Figura 46

Características del Biodigestor a Estudiar



Nota. En la figura se observa las características generales del biodigestor.

A continuación, realizaremos nuestro estudio de factibilidad, enfocándonos primeramente en el consumo eléctrico que gastaría nuestro biodigestor.

Para dicho biodigestor utilizaremos dos equipos eléctricos, el primero será un agitador de 6 palas (que nos ayudara a mezclar el material orgánico que se encuentra

dentro del biodigestor) y el segundo equipo será una bomba estercolera (que nos ayudara a extraer el material orgánico del biodigestor).

Primero seleccionaremos la potencia teórica que tendría nuestro agitador.

Según (Perez Medel, 2010), el material orgánico con el que trabajaríamos tendría una densidad de 1160 kg/m^3 .

Ecuación 18

Potencia de un agitador

$$P_{agitador} = K_T \times (N)^3 \times (Da)^5 \times \rho$$

Donde:

$$P_{agitador} = \text{Potencia del agitador}$$

$$K_T = \text{Constante de flujo turbulento (5.75)}$$

$$N = \text{número de revoluciones (0.8515 rps)}$$

$$Da = \text{diámetro del agitador (0.85m)}$$

$$\rho = \text{densidad del fluido (1160 } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\text{)}$$

Dándonos una potencia de:

$$P_{agitador} = 5.75 \times (0.8515\text{rps})^3 \times (0.85)^5 \times 1160 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{agitador} = 1827 \text{ Watts} = 1.82 \text{ kW}$$

La mayoría de biodigestores de diseño tubular no suelen utilizar bombas para la extracción del material orgánico del biodigestor, pues estos tipos de biodigestores trabajan en forma de flujo continuo, es decir, el biodigestor al cargarlo diariamente de materia orgánica, empuja a la materia orgánica que ya se encontraba anteriormente dentro del biodigestor, haciendo que esta poco a poco sea empujada y expulsada del biodigestor, sin embargo, dicho material orgánico podría taparse en la tubería de salida del efluente del biodigestor, impidiendo que el material orgánico que ya paso por su tiempo de retención, pueda salir.

Ecuación 19

Cálculo de la bomba

$$P_{bomba} = \frac{Q \cdot H}{(n \cdot 450)}$$

Donde:

P_{bomba} = Potencia de la bomba (hp)

Q = caudal del biogás ($\frac{l}{min}$)

H = carga (2 bar)

n = eficiencia (0.70)

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{1186 L}{15 min} = 79.06 \left(\frac{L}{min} \right)$$

$$P_{bomba} = \frac{Q \cdot H}{(n \times 450)}$$

$$P_{bomba} = \frac{79.06 \left(\frac{L}{min} \right) \cdot 4bar}{(0.70 \times 450)}$$

$$P_{bomba} = 1 hp$$

A continuación, se realizará un estimado del consumo energético en kW, que presentaría nuestro biodigestor con respecto a un estimado de un mes, y considerando que dicho biodigestor ya estuvo anteriormente cargado y ya requiere extraer material orgánico.

Además, se incluirá la utilización de una turbina regenerativa de 0.6 hp (0.45kW) que es la encargada de aumentar el flujo del biogás.

Tabla 35*Consumo Energético con Respecto a los Equipos del Biodigestor*

Equipos	Potencia	Horas utilizadas	Consumo mensual
Agitador	1.8 Kw	0.5 horas x 30 días	27 kWh/mes
Bomba estercolera	0.75 Kw	0.25 horas x 30 días	5.62 kWh/ mes
Turbina regenerativa	0.45 Kw	12 horas x 30 días	162 kWh/mes
Turbina regenerativa	0.45 Kw	5 horas x 30 días	67.5 kWh/mes
Total del consumo mensual			262.12 kWh/mes
Total del consumo anual			3145.44 kWh/año
Total de pago anual (USD 0,1047 centavos por kilovatio hora)			329.33 \$

Nota. En la tabla se observa el consumo energético mensual proveniente de los equipos que componen un biodigestor.

Como ya lo habíamos mencionado, nuestro biodigestor tiene una carga diaria de 1186 litros/día y una producción de biogás de $19.382 \frac{m^3}{día}$ diarios, y enfocándonos en que trabajaremos con calefactores para animales, que consumen $0.12 m^3$ de biogás por hora y con calefactores domiciliarios de 3 kW (y con uso de la *ecuación 14*, dando un consumo de $0.47 \frac{m^3}{h}$, podemos decir que con la cantidad de biogás que disponemos diariamente, nos da capacidad de utilizar 7 calefactores para animales por aproximadamente 13 horas y además, nos da la capacidad de utilizar 3 calefactores domiciliarios de 3 kW por aproximadamente 5 horas.

Tabla 36*Consumo de Biogás Diario de Equipos de Calefacción*

Equipos	Consumo del biogás por hora (m^3/h)	Número de equipos	Horas requeridas por día	Consumo del biogás requerido por día
Calefactor para animal	$0.12 m^3/h$	7 calefactores	13 horas	$10.92 m^3/día$
Calefactor domiciliario (3kW)	$0.47 m^3/h$	3 calefactores	5 horas	$7.05 m^3/día$
Total del biogás requerido por día				$18 m^3/día$

Nota. En la tabla se observa la cantidad de biogás diario que consumen nuestros equipos de calefacción dándonos como resultado que requerimos un total de $18 m^3/día$ de biogás.

Se podría decirse que con ayuda del biodigestor y utilización del biogás se logró utilizar un total de 7 calefactores para animales y 3 calefactores domiciliarios, consumiendo un total de 262.12 kWh de energía eléctrica al mes.

Ahora, si queremos cubrir la misma necesidad de número de equipos, utilizando calefactores eléctricos, nuestro consumo de energía sería la siguiente:

Tabla 37*Consumo Energético con Respecto a los Equipos de Calefacción*

Equipos	Potencia	Número de equipos	Horas utilizadas	Consumo mensual
Calefacción mediante una lámpara eléctrica	0.175 kW	7 equipos	13 horas x 30 días	477.75 kWh/mes
Calefactor eléctrico domiciliario	1 kW	3 equipos	5 horas x 30 días	450 kWh/ mes
Total del consumo mensual				927.75 kWh/mes
Total del consumo anual				11,133 kWh/año
Total de pago anual (USD 0,1047 centavos por kilovatio hora)				1165.62 \$

Nota. En la tabla se observa el consumo energético mensual proveniente de equipos de calefacción, y el costo anual.

Observamos de como al utilizar calefactores eléctricos, nuestro consumo energético mensual es mucho mayor, con respecto al consumo eléctrico que tuvo nuestro biodigestor (a pesar de que utilizan el mismo número de equipos), dándonos como conclusión lo factible y económico que resulta utilizar el biogás, como una fuente de energía alternativa.

3.10.1 Costos de los implementos del biodigestor

A continuación, se presentará el costo estimado que presentaría implementar dicho Biodigestor.

Tabla 38

Costo estimado de un Biodigestor de Diseño Tubular

Cantidad	Descripción	Costo unitario	Subtotal (USD)
Conducción del biogás (estimado de distancia entre el biodigestor y el punto de consumo, 20 m).			
9	Tubería PVC $\frac{3}{4}$ " (5 metros)	11 \$	99 \$
11	Tee roscable para PVC $\frac{3}{4}$ "	1 \$	11 \$
10	Manguera para gas	1\$ por metro	10 \$
10	Adaptador PVC para manguera	0.50 \$	5 \$
11	Unión roscable para PVC $\frac{3}{4}$ "	0.50 \$	5.5 \$
7	Codo roscable PVC $\frac{3}{4}$ "	0.55 \$	3.85 \$
1	Pegamento para tubería PVC	5 \$	5 \$
5	Teflón	0.60 \$	3 \$
Bolsa del biodigestor (a= 4 m, l= 19.1 m), Tuberías de entrada y salida (2m cada una) y Gasómetro (a= 2 m, l= 9.5 m).			

Cantidad	Descripción	Costo unitario	Subtotal (USD)
	Rollo de		
1	geomembrana de polietileno (76.4 m ² +19 m ²) = 95.4 m ²	1.60 \$ por metro cuadrado.	152.64 \$
1	Tubería PVC 8" de 4 metros.	11\$ por metro	44 \$
Invernadero (dimensiones 3m de ancho x 3m de alto x 19 m de largo)			
	Rollo de plástico		
1	para invernadero (152.8 m ²)	1\$ por metro cuadrado	152.8 \$
	Tubo metálico ¾" de		
9	5 metros	3.60 \$ por metro	162 \$
Válvulas y equipos de medición			
3	Flujómetro	40 \$	120 \$
1	Electroválvula	24 \$	24 \$
	Sensor para gas		
1	ácido sulfhídrico (arduino)	20 \$	20 \$
	Filtro de ácido		
1	sulfhídrico	8 \$	8 \$
	Válvula esfera para		
1	gas ¾"	10 \$	10 \$

Cantidad	Descripción	Costo unitario	Subtotal (USD)
10	Válvula de bola de rosca hembra cierre industrial para gas $\frac{3}{4}$ "	5 \$	50 \$
2	Válvula Esférica de Paso PVC, Pegables $\frac{3}{4}$ "	1 \$	2 \$
Equipos eléctricos (bombas, agitadores y sopladores)			
2	Soplador lateral (0.45 kW, 220V)	102.00 \$	204 \$
1	Agitador 6 palas (motor trifásico 220V, 2.5 hp)	90 \$	90 \$
1	Bomba Centrífuga (1hp, 220V)	230 \$	230 \$
Depósito de entrada del efluente y salida del efluente (1m de ancho x 1 m de largo x 1.5 m de largo) y depósito de salida del efluente (2m de ancho x 2 m de largo x 2 m de largo)			
195	Bloques	0.30 \$	58.5 \$
2	Bolsas de cemento	7 \$	14 \$
Total del costo			1484.29 \$

Nota. En la tabla se observa el costo estimado que conlleva la implementación de nuestro biodigestor de diseño tubular.

3.10.2 Ahorro monetario

Con la necesidad de 7 calefactores para animales que funcionen por 13 horas y 3 calefactores domiciliarios que funcionen por 5 horas, ya se pudo observar que con el uso de nuestro biodigestor logramos obtener un ahorro considerable de energía.

Tabla 39

Ahorro monetario

Tipo de implementación	Total de pago mensual	Total de pago anual
Uso de calefactores eléctricos	97.13 \$	1165.62 \$
Uso del biodigestor	27.44 \$	329.33 \$
Ahorro monetario	69.69 \$	836.29 \$

Nota. En la tabla se observa el ahorro monetario que presenta la utilización del biodigestor de diseño tubular.

3.10.3 Recuperación de inversión

Tabla 40

Recuperación de Inversión del Biodigestor de Diseño Tubular

	Capital	Ahorro de luz
Primer día de inversión	- 1484.29 \$	
Después 1er año	696.9 \$	696.9 \$
Después 1er mes- 2do año	766.59 \$	69.69 \$
Después 2do mes - 2do año	836.28 \$	69.69 \$
Después 3er mes- 2do año	905.97 \$	69.69 \$
Después 4 mes- 2do año	975.66 \$	69.69 \$
Después 5to mes- 2do año	1045.35 \$	69.69 \$
Después 6to mes- 2do año	1115.04 \$	69.69 \$

	Capital	Ahorro de luz
Después 7mo mes- 2do año	1184.73 \$	69.69 \$
Después 8vo mes- 2do año	1254.42 \$	69.69 \$
Después 9no mes- 2do año	1324.11 \$	69.69 \$
Después 10mo mes- 2do año	1393.8 \$	69.69 \$
Después 11avo mes- 2do año	1463.49 \$	69.69 \$

Nota. En la tabla se observa el tiempo estimado para la recuperación del capital invertido en el biodigestor.

Se observa que 1 año y 11 meses es el tiempo estimado que se requiere para recuperar el capital que se invirtió en el biodigestor, y el estimado de durabilidad del biodigestor es de 20 años.

Capítulo IV

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- El biodigestor de diseño tubular, a diferencia de los demás tipos de biodigestores, es el que menos tecnología utiliza, sin embargo, se suelen implementar equipos como agitadores y bombas estercoleras, que ayudan a que el biodigestor produzca biogás de una manera más eficiente.
- A diferencia de otras fuentes de energía alterna, el biodigestor de diseño tubular presenta un corto tiempo de recuperación de inversión.
- El tamaño de un biodigestor de diseño tubular va a depender del nivel de temperatura en el que este se encuentre, es decir, si el biodigestor trabaja en una zona donde exista una elevada temperatura, el tamaño de este será menor y su tiempo de retención de igual manera será menor, pero, si el biodigestor trabaja en una zona donde existan bajas temperaturas, su tamaño será mucho mayor, y de igual forma su tiempo de retención será mayor.
- No todo material orgánico es recomendable ser utilizado en el biodigestor, como es el caso de cítricos (ya que podría acidificar el proceso de descomposición del material orgánico) o el cartón (ya que este material demora más de lo común en descomponerse).
- No todos los materiales orgánicos producen la misma cantidad de biogás, pues en el caso del estiércol de animales, el de aves y de cerdos producen una mayor cantidad de biogás, y en el caso de desechos vegetales, la hoja de papa y la paja de maíz producen mayor biogás.

- La manera más común de dar uso al biogás, es a través de una combustión directa, siendo dicho gas, comúnmente utilizado en ámbitos como la cocina, calefacción e iluminación.
- Con respecto a la purificación del biogás, el eliminar el ácido sulfhídrico del biogás es uno de los puntos más primordiales a tomar en cuenta para poder utilizar nuestro biogás sin problemas, debido a que el H₂S es un componente nocivo para el ser humano, además de ser el causante de que el biogás posea un olor a huevo podrido.
- En el ámbito del almacenamiento y del transporte del biogás, no resulta factible que dicho gas sea almacenado del mismo modo que el gas propano (a presión en cilindros), debido a que, al almacenar el biogás de dicha forma, esta entrega una muy baja cantidad de energía, a diferencia del gas propano, que provee una mayor cantidad de energía, resultando más factible, que el biogás sea almacenado en un gasómetro o en un tanque fijo a baja presión.
- Con respecto al uso del biogás, resulta más factible y eficiente utilizar dicho biogás, extrayéndolo directamente del biodigestor o del gasómetro (a través de una conexión con tuberías PVC o con manguera PET).
- El uso del biogás representa un considerable ahorro energético, ya que dicho gas puede ser empleado tanto para la generación de energía eléctrica como térmica, logrando sustituir a otras fuentes de energías convencionales.
- Si deseamos implementar un sistema de calefacción en una granja o establo, la utilización de calefactores a biogás resulta considerablemente más factible que la utilización de calefactores eléctricos convencionales,

además que el consumo energético proveniente del uso de un biodigestor es considerablemente bajo, a comparación de la utilización de calefactores eléctricos, presentándonos un considerable ahorro energético.

- El poder calorífico del biogás es considerablemente bajo, en comparación a otro tipo de gases como el propano (teniendo un poder calorífico tres veces mayor al del biogás).
- Se puede utilizar equipos como calefactores que funcionen mediante gas propano y modificarlos para que estos puedan funcionar a biogás, dicha modificación deberá enfocarse en aumentar el diámetro del inyector del quemador del calefactor.
- Un equipo de calefacción que funcione mediante gas propano o butano posee un menor consumo a comparación de un calefactor que funcione a gas metano.
- El poder calorífico del biogás va a depender del porcentaje de gas metano que este posea.
- Existen tratamientos para eliminar el CO₂ del biogás para aumentar el porcentaje de metano, sin embargo, este tipo de purificación solo se recomienda si se requiere utilizar al biogás en aplicaciones más complejas (como para uso en vehículos), mientras para usos como calefactores y cocinas, no es recomendable remover el CO₂, pues este simplemente pasa a través del quemador o motor.

4.2 Recomendaciones

- Para el dimensionamiento de un biodigestor, se recomienda enfocarse primeramente en la cantidad de desechos y material orgánico que se disponga, para luego, enfocado en eso ver la capacidad y el tamaño del biodigestor.
- Si se desea implementar un biodigestor de diseño tubular, se recomienda utilizar geomembrana de polietileno, pues este material posee una mayor resistencia a diferencia de otros materiales como plástico de invernadero.
- Si se desea implementar un biodigestor de diseño tubular, se recomienda el utilizar un invernadero, con la finalidad de que este brinde protección y además aumente la temperatura dentro del biodigestor.
- Se recomienda que el lugar donde será instalado el biodigestor, sea un sitio amplio y despejado, y que además este cerca de una fuente de residuos y desechos orgánicos.
- Se recomienda la utilización de detectores de ácido sulfhídrico, que serán colocados luego del filtro de eliminación de H_2S , esto se realizaría para verificar que el biogás, luego de pasar por el filtro, se encuentre totalmente libre de H_2S , y si ese no es el caso, el detector se encargara en notificarlo.
- Se recomienda el uso de una turbina regenerativa, para aumentar el flujo de presión del biogás que ingresará en nuestros equipos de calefacción.

Bibliografía

- Viquez Arias, J., Caydiid , M., & Adhiambo Omondi, P. (2018). Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás. *RedBioLAC*, 8-13. Recuperado el 14 de Enero de 2022, de https://energypedia.info/images/1/1b/31._Eficiencia_termica_de_estufas_a_biogas.pdf
- 2000agro. (17 de Agosto de 2020). *2000agro. Revista Industrial del Campo*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de 2000agro. Revista Industrial del Campo: <http://www.2000agro.com.mx/tecnologia/residuos-de-cosecha-con-bioinsumos-agricolas-alternativa-a-quimicos/>
- Academia de las renovables. Santa Fe. (27 de Agosto de 2019). *santafe.gov.ar/energia*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de Gobierno de Santa Fe Website: <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-3-Biodigesti%C3%B3n-componentes-del-sistema.pdf>
- Acantara, M. (2021). *¿Cuál es el mejor calefactor de gas?* Recuperado el 15 de Enero de 2022, de CALEFACTORES ONLINE: <https://calefactores.online/gas/>
- Alibaba. (2021). *Alibaba.com*. Recuperado el 31 de Diciembre de 2021, de Alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/energy-saving-biogas-lamp-60517980427.html>
- Alibaba. (2021). *Alibaba.com*. Recuperado el 15 de Enero de 2022, de Alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/the-best-price-factory-wholesale-stainless-steel-lamparas-de-biogas-biogas-lamp-biogas-room-heater-1600289517702.html?spm=a2700.8699010.29.61.7d0e5be89xzHBI>

- Aqualimpia. (1 de Septiembre de 2020). *Aqualimpia*. Recuperado el 21 de Diciembre de 2021, de Aqualimpia website: <https://www.aqualimpia.com/biodigestores-agitadores/>
- Aqualimpia. (1 de Septiembre de 2020). *Aqualimpia*. Recuperado el 31 de Diciembre de 2021, de Aqualimpia.com: <https://www.aqualimpia.com/equipos-biodigestores/sensores-ch4/>
- Arce Cabrera, J. J. (2011). *Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral*. Guayaquil . Recuperado el 13 de 11 de 2021, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1593/15/UPS-GT000209.pdf>
- Arnabat, I. (22 de Octubre de 2008). *caloryfrio el portal sectorial de las instalaciones*. Recuperado el 31 de Diciembre de 2021, de [caloryfrio.com: https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-instalaciones-componentes/sistema-de-refrigeracion-por-absorcion.html](https://www.caloryfrio.com/aire-acondicionado/aire-instalaciones-componentes/sistema-de-refrigeracion-por-absorcion.html)
- Baculima Pintado, M. V., & Rocano Tenezaca, G. C. (2015). *Estudio para la determinación de la producción de energía eléctrica a partir del aprovechamiento del biogás de una granja porcina ubicada en la ciudad de Azogues*. Cuenca. Recuperado el 3 de Noviembre de 2021, de https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7907/1/UPS-CT004750.pdf?fbclid=IwAR0QwCdb-_XjhhXBNz3_wCt67wqJnpjoyFSFFPQleHt8bjqaj16gFDWTnfc
- Calvo, A. (Marzo de 2018). *ResearchGate*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Funcionamiento-de-un-biodigestor-Tomado-y-modificado-de-Energizar-2017_fig10_323704103
- Crisanto Perrazo, L. A. (2013). *Estudio de factibilidad para implementar una central eléctrica aprovechando el biogás generado por el relleno sanitario del Inga*.

- Quito. Recuperado el 3 de Noviembre de 2021, de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6350>
- Factor energia. (14 de Junio de 2017). *Factor energia* . Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de Factor energia : <https://www.factorenergia.com/es/blog/eficiencia-energetica/energias-alternativas-biomasa-biogas/>
- FAO. (2011). *Manual de biogás*. Global Environment Facility. Recuperado el 18 de Diciembre de 2021, de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- FAO. (2019). *probiomasa.gob.ec*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2021, de [probiomasa.gob.ec](http://www.probiomasa.gob.ec): http://www.probiomasa.gob.ec/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf
- García Rodriguez, A. M., & Gómez Franco, J. D. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. págs. 29-29. Recuperado el 20 de Noviembre de 2021, de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/667/1/6112733-2016-2-IQ.pdf>
- García Zabaleta, R., Alamo Viera, M. V., & Marcelo Aldana, M. D. (2017). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR PARA ZONAS RURALES DE LA REGIÓN PIURA*. Recuperado el 25 de Enero de 2022, de http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael_biodigestor.pdf
- Garzón Cuji, M. F. (2011). *Estudio de un biodigestor generador de gas metano mediante abono orgánico para prácticas de energías alternativas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2021, de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/1344/1/Tesis%20I.%20M.%2095%20-%20Garz%C3%B3n%20Cuji%20Marco%20Fabricio.pdf>

- Ignacio Gómez IHM. (2021). *Ignacio Gómez IHM*. Recuperado el 23 de Diciembre de 2021, de Ignacio Gómez IHM:
<https://www.igihm.com/bombas/centrifugas/?codigo=63991ET0A2>
- Leiva, Á. (03 de Junio de 2021). *Estudio de factibilidad para el almacenamiento y traslado de biogás*. Recuperado el 16 de Enero de 2022, de Archivo de Video:
<https://www.youtube.com/watch?v=XcXxekygUxg>
- Leon Cifuentes, R. M. (1991). *Diseños, cálculos y evaluación de biodigestores*. Cali .
Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/4773/T0002583.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Machorro, J. M., & Méndez, E. (Diciembre de 2011). *Construcción y Uso de Biodigestor de Producción Energética y Reducción de Emisión de Gases de Efecto Invernadero*. . Recuperado el 14 de Diciembre de 2021, de
https://casmcopenenglish.weebly.com/uploads/1/5/8/0/15803634/_biodigestor.pdf
- Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Ecuador: Redbiolac. Recuperado el 3 de Noviembre de 2021, de
<file:///C:/Users/USER/Downloads/L-IKIAM-000006.pdf>
- Moncayo Romero, G. (2017). *¿QUE ES EL BIOGÁS? AQUALIMPIA*. Recuperado el 15 de Enero de 2022, de <file:///C:/Users/USER/Downloads/QUE-ES-EL-BIOGAS.pdf>
- Morán, S. (23 de Junio de 2020). Ecuador, ahogado en basura, está lejos de cumplir las metas de los ODS al 2030. Recuperado el 14 de Noviembre de 2021, de
<https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/ecuador-ahogado-basura-esta-lejos-cumplir-metas-ods-al-2030>
- Perez Medel, J. (2010). *ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA APLICACION EN PEQUEÑOS GANADEROS Y LECHEROS*. Santiago de Chile.

Recuperado el 21 de Enero de 2022, de

https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103926/cf-perez_jm.pdf

QINGDAO WRANGLER. (2019). *Made-in-China*. Obtenido de Made-in-China:

[https://es.made-in-china.com/amp/co_qingdaowrangler/product_Ceramic-](https://es.made-in-china.com/amp/co_qingdaowrangler/product_Ceramic-Irradiant-Poultry-Biogás-Heater-Gas-Brooder-Infrared-Lamp_ehuynhgy.html?fbclid=IwAR2qXkGtiTqh4wyYeg2rKu2kUyp2GOtEzu5NcYsvtvDNpOvi_PCnMopgX2A)

[Irradiant-Poultry-Biogás-Heater-Gas-Brooder-Infrared-](https://es.made-in-china.com/amp/co_qingdaowrangler/product_Ceramic-Irradiant-Poultry-Biogás-Heater-Gas-Brooder-Infrared-Lamp_ehuynhgy.html?fbclid=IwAR2qXkGtiTqh4wyYeg2rKu2kUyp2GOtEzu5NcYsvtvDNpOvi_PCnMopgX2A)

[Lamp_ehuynhgy.html?fbclid=IwAR2qXkGtiTqh4wyYeg2rKu2kUyp2GOtEzu5NcY](https://es.made-in-china.com/amp/co_qingdaowrangler/product_Ceramic-Irradiant-Poultry-Biogás-Heater-Gas-Brooder-Infrared-Lamp_ehuynhgy.html?fbclid=IwAR2qXkGtiTqh4wyYeg2rKu2kUyp2GOtEzu5NcYsvtvDNpOvi_PCnMopgX2A)

[svtvDNpOvi_PCnMopgX2A](https://es.made-in-china.com/amp/co_qingdaowrangler/product_Ceramic-Irradiant-Poultry-Biogás-Heater-Gas-Brooder-Infrared-Lamp_ehuynhgy.html?fbclid=IwAR2qXkGtiTqh4wyYeg2rKu2kUyp2GOtEzu5NcYsvtvDNpOvi_PCnMopgX2A)

RedBioLAC. (23 de Abril de 2019). *Curso de biogás: Parte 6 - Uso del biogás*.

Recuperado el 12 de Enero de 2022, de Archivo de video:

<https://www.youtube.com/watch?v=14jMT2Z5a4E>

Sandoval Carrasco, M. (Mayo de 2016). Diseño de un biodigestor para la generación de

energía eléctrica sustentable. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de

<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/21568/1/Tesis.pdf>

Vargas Lehner, F. (13 de Septiembre de 2014). *slideshare*. Recuperado el 21 de

Noviembre de 2021, de slideshare:

[https://es.slideshare.net/fvargaslehner/construccion-e-instalacion-de-un-](https://es.slideshare.net/fvargaslehner/construccion-e-instalacion-de-un-biodigestor-tubular)

[biodigestor-tubular](https://es.slideshare.net/fvargaslehner/construccion-e-instalacion-de-un-biodigestor-tubular)

Viquez Arias, J. A. (2015). Calefacción de lechones con biogás. *UTN Informa al Sector*

Agropecuaria, 1-5. Recuperado el 7 de Enero de 2022, de

[http://nebula.wsimg.com/379819339e95a49254263120f6ad5ae8?AccessKeyId=](http://nebula.wsimg.com/379819339e95a49254263120f6ad5ae8?AccessKeyId=11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1)

[11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1](http://nebula.wsimg.com/379819339e95a49254263120f6ad5ae8?AccessKeyId=11F7CE3E4517D29E4C81&disposition=0&alloworigin=1)

Viquez, J. (2014). *energypedia*. Recuperado el 31 de Diciembre de 2021, de

energypedia.info:

[https://energypedia.info/images/f/fb/Calefacci%C3%B3n_de_lechones_con_biog](https://energypedia.info/images/f/fb/Calefacci%C3%B3n_de_lechones_con_biog%C3%A1s.pdf?fbclid=IwAR1Nx1Eflj3Apq1Nsuit8b9nU6U5njq_UVoP_QJFf-FYMzFQYqLvtqRGLOI)

[%C3%A1s.pdf?fbclid=IwAR1Nx1Eflj3Apq1Nsuit8b9nU6U5njq_UVoP_QJFf-](https://energypedia.info/images/f/fb/Calefacci%C3%B3n_de_lechones_con_biog%C3%A1s.pdf?fbclid=IwAR1Nx1Eflj3Apq1Nsuit8b9nU6U5njq_UVoP_QJFf-FYMzFQYqLvtqRGLOI)

[FYMzFQYqLvtqRGLOI](https://energypedia.info/images/f/fb/Calefacci%C3%B3n_de_lechones_con_biog%C3%A1s.pdf?fbclid=IwAR1Nx1Eflj3Apq1Nsuit8b9nU6U5njq_UVoP_QJFf-FYMzFQYqLvtqRGLOI)

ANEXOS