

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA LA OBTENCIÓN DE
FERTILIZANTE Y BIOGÁS A PARTIR DE MATERIA FECAL DE ANIMALES DE
COMPAÑÍA

SERGIO ANDRÉS GÓMEZ MATAJIRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA LA OBTENCIÓN DE
FERTILIZANTE Y BIOGÁS A PARTIR DE MATERIA FECAL DE ANIMALES DE
COMPAÑÍA

SERGIO ANDRÉS GÓMEZ MATAJIRA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

MSc. JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACION.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos especificos.	17
2. BIOGAS	18
2.1 DEFINICION DE BIOGAS.....	18
2.2 CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL BIOGAS	18
2.3 DIGESTION ANAEROBICA.....	19
2.3.1 Hidrolisis.	19
2.3.2 Acidogenesis.....	19
2.3.3 Acetogenesis.	19
2.3.4 Metanogenesis.....	19
2.4 FACTORES DETERMINANTES EN LA PRODUCCION DE BIOGAS	21
2.4.1 Tipo de materia prima.	21
2.4.2 Temperatura del sustrato.....	22
2.4.3 Tiempo de retención hidraulico.	22
2.4.4 PH.....	24
2.4.5 Relacion C/N.....	24
2.4.6 Contenido de solidos.	25
2.4.7 Inoculantes.....	26
2.4.8 Inhibidores.	27

2.4.9 Agitacion.....	27
2.5 USOS DEL BIOGAS	28
2.5.1 Cocina.....	28
2.5.2 Motores de combustion interna.....	28
2.5.3 Iluminacion.....	29
2.5.4 Unidades de refrigeracion.....	29
2.5.5 Calefaccion.....	29
2.6 ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGAS	31
2.6.1 Secado.....	32
2.6.2 Filtracion del dióxido de carbono	33
2.6.3 Filtracion del sulfuro de hidrogeno.....	33
3. FERTILIZANTE	34
3.1 DEFINICION DE BIOL	34
3.2 FORMA DE APLICAR EL FERTILIZANTE	36
4. BIODIGESTORES	37
4.1 DEFINICION	37
4.2 FUNCIONAMIENTO	37
4.3 TIPOS	38
4.3.1 Continuos.....	38
4.3.2 Semicontinuos.....	38
4.3.3 Discontinuos.....	39
4.4 MODELOS MAS USADOS EN EL SECTOR RURAL	39
4.4.1 De campana flotante.....	39
4.4.2 De campana fija.....	40
4.4.3 Tubular.....	41
5. JUSTIFICACION DE LA SOLUCION	43
5.1 CARACTERISTICAS CLIMATICAS DEL LUGAR DE IMPLEMENTACION.....	43

5.2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	44
5.2.1 Alternativa 1	44
5.2.2 Alternativa 2	45
5.2.3 Alternativa 3	46
5.3 FUNCION DE CALIDAD	47
5.3.1 Requerimientos del consumidor.....	47
5.3.2 Requerimientos de diseño.	47
5.4 MATRIZ DE CALIDAD	48
5.5 EVALUACION DE ALTERNATIVAS	48
5.6 DISEÑO ELEGIDO	50
6. DISEÑO DEL SISTEMA	51
6.1 CARACTERIZACION DE LA MASA	51
6.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	53
6.3 COMPONENTES DEL SISTEMA	56
6.3.1 Transmision de potencia	56
6.3.1.1 Turbina.....	57
6.3.1.2 Espesor de paletas.	59
6.3.1.3 Motorreductor.....	62
6.3.1.4 Eje.....	67
6.3.1.5 Perno Eje - Turbina.....	69
6.3.1.6 Acople Reductor - Eje.	73
6.3.2 Estructural.....	77
6.3.3 Control de presion.....	78
6.3.4 Conduccion.....	79
6.3.5 Almacenamiento de biogas.....	80
6.3.6 Tratamiento de biogas.	81
6.3.6.1 Filtro de dióxido de carbono.....	81
6.3.6.2 Filtro de sulfuro de hidrogeno.	83

7. CONSTRUCCION, ENSAMBLE Y ARRANQUE DEL SISTEMA	85
7.1 CONSTRUCCION DE SUBSISTEMAS	85
7.2 ENSAMBLE	90
7.3 ETAPA DE ARRANQUE	90
7.3.1 Primera carga.	90
7.3.2 Sellamiento de fugas.	91
7.4 ALIMENTACION DEL SISTEMA	91
7.5 MEDICION DEL BIOGAS	93
8. PRODUCCION	94
8.1 BIOGAS	94
8.2 FERTILIZANTE	96
9. ANALISIS DE RESULTADOS.....	99
9.1 BIOGAS	99
9.2 FERTILIZANTE	102
9.3 ESTIMACION DE PRODUCCION	103
10. PRESUPUESTO.....	104
11. CONCLUSIONES	106
BIBLIOGRAFÍA.....	108
ANEXOS	116

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Composición química del biogás.....	18
Cuadro 2. Producción de metano de algunos tipos de biomasa.....	21
Cuadro 3. Rangos de temperatura del sustrato	22
Cuadro 4. Relación C/N de algunas biomosas	24
Cuadro 5. Porcentaje de solidos totales en algunas biomosas.....	25
Cuadro 6. Concentración de inhibidores.....	27
Cuadro 7. Equipos para consumo de biogás	30
Cuadro 8. Composición del bioabono.....	34
Cuadro 9. Matriz de calidad	49
Cuadro 10. Relevancia de requerimientos.....	50
Cuadro 11. Evaluacion de alternativas	50
Cuadro 12. Densidad experimental de la biomasa	52
Cuadro 13. Propiedades físicas de la mezcla.....	57
Cuadro 14. Constantes a y b	64
Cuadro 15. Factor de servicio motorreductor.....	65
Cuadro 16. Selección de motorreductor	66
Cuadro 17. Propiedades de metales ferrosos.....	67
Cuadro 18. Resistencia de pernos de acero.....	70
Cuadro 19. Factor de servicio para el acoplamiento.....	74
Cuadro 20. Resistencia a la presión de tubos de pvc.....	79
Cuadro 21. Subsistemas y materiales	85
Cuadro 22. Producción de biogás durante 40 días.....	94
Cuadro 23. Resultado del análisis cromatográfico.....	96
Cuadro 24. Resultado del análisis NKP	98
Cuadro 25. Comparación de composición del biogás.....	100
Cuadro 26. Comparación de composición del bioabono.....	102

Cuadro 27. Potencial de producción.....103
Cuadro 28. Presupuesto104

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Etapas de la digestión anaeróbica	20
Figura 2. Relación entre la temperatura y el factor de corrección del TR	23
Figura 3. Crecimiento microbiano en un biodigestor anaeróbico	26
Figura 4. Alternativas para el uso de biogás	31
Figura 5. Drenaje subterráneo	32
Figura 6. Reducción de las sustancias provocadoras de mal olor	35
Figura 7. Esquema básico de un biodigestor	37
Figura 8. Biodigestor tipo hindú o de campana flotante	40
Figura 9. Biodigestor tipo chino o de campana fija	41
Figura 10. Biodigestor tubular	42
Figura 11. Lugar de implementación del sistema.....	43
Figura 12. Tanque con sistema de transmisión de potencia.....	44
Figura 13. Tanque con sistema de transmisión de potencia en disposición horizontal	45
Figura 14. Tanque con flujo tipo pistón	46
Figura 15. Selección del factor de corrección del TR.....	53
Figura 16. Caneca plástica de referencia	56
Figura 17. Medidas de un agitador de turbina	58
Figura 18. Coeficiente de arrastre para una placa plana	60
Figura 19. Número de potencia para turbina de seis palas.....	63
Figura 20. Factor de seguridad	68
Figura 21. Selección de tornillo.....	72
Figura 22. Selección de tuerca	73
Figura 23. Dimensiones del motorreductor	75
Figura 24. Dimensiones estándar del acople.....	76
Figura 25. Dimensiones del tanque	77

Figura 26. Válvula de seguridad	78
Figura 27. Equipo de venoclisis	80
Figura 28. Suero fisiológico	81
Figura 29. Filtro de CO2	82
Figura 30. Filtro de H2S.....	84
Figura 31. Ensamble del sistema.....	90
Figura 32. Primera carga y sello hidráulico.....	91
Figura 33. Sellamiento de fugas de gas.....	92
Figura 34. Gramera digital y Recipiente de llenado	92
Figura 35. Jeringa de 20 cm3	93
Figura 36. Entradas de la bolsa de suero fisiológico.....	93
Figura 37. Válvulas de descarga y extracción de lodos	97
Figura 38. Comportamiento de la producción de biogás.....	99
Figura 39. Dimensiones del nivel de mezcla.....	116

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Recalculo del volumen	116
Anexo B. Análisis NKP	119
Anexo C. Análisis Cromatográfico	121

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA LA OBTENCIÓN DE FERTILIZANTE Y BIOGÁS A PARTIR DE MATERIA FECAL DE ANIMALES DE COMPAÑÍA*

AUTOR: SERGIO ANDRÉS GÓMEZ MATAJIRA**

PALABRAS CLAVE: BIOGAS, BIOL, BIODIGESTOR, FERTILIZANTE, ANIMALES, DIGESTION ANAEROBICA.

DESCRIPCIÓN: Con el problema de manejo de basuras y de buscar nuevas formas de energía en el país, se busca la manera de aprovechar la energía presente en las heces de los animales, en este caso en las de las mascotas, es por esto que haciendo uso de la digestión anaeróbica se buscó obtener un fertilizante liquido adecuado para los campos de cultivo y biogás como fuente valiosa de energía gracias a su contenido de metano. Para llevar esto a cabo debió hacerse el uso de biodigestores, los más conocidos son los modelos de campana flotante, campana fija o el tubular, sin embargo, debido a que en este proyecto se deseó conocer la calidad y el potencial de la producción de biogás y fertilizante a partir de las heces de animales de compañía, se realizó el diseño y construcción de un biodigestor a pequeña escala el cual se puso en funcionamiento y monitoreó diariamente durante 40 días en los cuales hubo picos altos y bajos debido a la dependencia del sistema a la temperatura ambiente. Finalmente se estudiaron los resultados y se hicieron análisis en laboratorio para conocer las cantidades de los componentes tanto en el biogás como en el biol y poder comparar estos resultados con los expuestos por otros autores y llegar a conclusiones acerca de la viabilidad de proyectos de este tipo a mayor escala.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. MSc.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BIODIGESTER TO OBTAIN FERTILIZER AND BIOGAS FROM PET FECAL MATTER*

AUTHOR: SERGIO ANDRÉS GÓMEZ MATAJIRA**

KEY WORDS: BIOGAS, BIOL, BIODIGESTER, FERTILIZER, ANIMALS, ANAEROBIC DIGESTION.

DESCRIPTION: With the problem of waste management and looking for new forms of energy in the country, the way to take advantage of the energy present in the feces of animals, in this case in those of pets, this is why making use of anaerobic digestion sought to obtain a liquid fertilizer for farmlands and biogas as a valuable source of energy due to its methane content. It was necessary to use biodigesters to reach this goal, the best known are the floating bell, fixed bell or tubular models; however, in this project it was desired to know the quality and potential of biogas and fertilizer production from the feces of pets, the design and construction of a small-scale biodigester was made, which was put into operation and monitored daily for 40 days, in which there were high and low peaks due to the dependency of the system at environmental temperature. Finally, the results were studied and laboratory analyzes were made to determine the quantities of the components in both biogas and biol, to be able to compare these results with those presented by other authors and reach conclusions about the viability of projects of this type on a larger scale.

*Degree work

**Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering.
Director: Jaid Eduardo Quiroga Méndez. MSc.

INTRODUCCIÓN

La obtención de fertilizante y biogás por medio de la digestión anaeróbica no es algo nuevo para el mundo ya que esta práctica se ha reproducido durante mucho tiempo, sin embargo, hoy día cobra relevancia debido a la búsqueda de nuevas fuentes de energía alternativa en búsqueda de alejarse de las fuentes de energía fósiles, es por eso que proyectos como el presentado toman importancia ya que ofrecen formas de ser llevados a la práctica por parte de las poblaciones que por necesidad o progreso requieren explotar el potencial energético de los desechos animales, en este particular se busca conocer el potencial energético de las heces de la población canina por medio del diseño e implementación de un sistema biodigestor para la obtención y posterior análisis de fertilizante líquido y biogás con el fin de conocer sus características y la posibilidad de aprovechamiento futuro.

La principal aplicación de los resultados de este proyecto va dirigida los lugares donde existe población canina reunida ya sean perreras, guarderías o refugios en los que la cantidad de biomasa que se produce es alta, sin embargo, los resultados no se limitan solo a esta población, sino que puede ser reproducida con biomasa de otros animales en especial animales del campo como bovinos, porcinos o granjas avícolas.

A medida que estas fuentes de energía tomen más relevancia, sus formas de implementación evolucionarán y tendrán su impacto en la mitigación de los problemas ambientales que actualmente afectan al país y al planeta.

1. PLANTEAMIENTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las heces de los caninos poseen gran potencial para ser transformadas en energía aprovechable, ya que puede ser utilizada como abono y como biogás, a través de su tratamiento especial para poder ser degradado hasta tener productos que puedan ser utilizados en los campos de cultivo y en los hogares para su uso.

El problema radica en el desaprovechamiento de este recurso ya que las heces no son acaparadas para su tratamiento, en su lugar, las heces producidas en los hogares con mascotas y los refugios animales son arrojadas a la basura y terminan en el sitio de disposición final; las heces que son producidas por perros sin hogar o por tenedores de mascotas poco responsables son dejadas en las calles y parques de la ciudad, generando incomodidad y malestar en la comunidad.

Las heces que son abandonadas en las calles, parques y demás entornos expuestos al aire libre, son un riesgo para la salud de las personas ya que al descomponerse liberan virus, bacterias y parásitos al aire libre que son inhalados por las personas, tales como el *Toxocara* que ataca el globo ocular y genera estrabismo, pérdida gradual de la visión e inclusive ceguera; *Giardia* que provoca infección intestinal o el *Toxoplasma gondii* que acarrea problemas oculares como ceguera o encefalitis en niños nonatos. Estos desechos permanecen hasta que son removidos por factores ambientales como las lluvias agravando el problema ya que estas heces son dispersadas dificultando aún más su recolección.

Con la finalidad de aportar en la disminución de la cantidad de desechos orgánicos animales que no son recogidos y los que son arrojados al sitio de disposición final, apremia la necesidad de procesar de manera distinta estos desechos por medio del compostaje, con el fin de deteriorar esta materia hasta convertirla en fertilizantes

idóneos para ser aprovechados en la siembra de cultivos y biogás para la cocción de alimentos en los hogares del municipio.

Por otro lado, existe el constante consumo de madera por parte de las comunidades que se encuentran alejadas del casco urbano, las cuales se ven afectadas por no contar con un suministro constante de gas para la cocción de sus alimentos y se ven orilladas a conseguir madera por medio de la tala de árboles debido a que en muchos hogares no se cuenta con el dinero suficiente para adquirir un cilindro de gas, generando además de deterioro y contaminación ambiental, enfermedades pulmonares asociadas a la inhalación de humo emanado al momento de preparar los alimentos, como la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC)

1.2 JUSTIFICACION

Partiendo desde el cuidado socioambiental es importante hacer un uso adecuado de los residuos sólidos de los animales de compañía con el fin de mantener el ambiente en la ciudad limpio y libre de patógenos causantes de proliferación de enfermedades en los humanos, otros animales y que deterioran la calidad del ecosistema.

Es importante remarcar que este proyecto contribuye a la disminución de la contaminación visual, odorífera y del entorno en el núcleo urbano donde se está permanentemente expuesto a las heces, de igual forma brinda una solución eficaz a las necesidades de los refugios animales, los cuales se ven obligados a arrojar las heces directamente a la basura debido a la constante producción de materia que llega a producirse.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Diseñar y construir un biodigestor para la producción de fertilizante con el objeto de brindar a la comunidad agricultora un producto natural y sin aditivos químicos que degraden el sustrato, paralelamente a esto producir gas metano mediante la explotación del potencial energético del biogás, a partir del aprovechamiento del estiércol de animales de compañía.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Realizar el diseño de cada uno de los subsistemas; Transmisión de potencia, Estructural, Control de presión, Conducción y almacenamiento de biogás; a partir de los requerimientos del sistema.
- Elaborar el modelo del sistema con todos los elementos y subsistemas que lo componen, que cumpla con las dimensiones físicas especificadas y no presente fallas estructurales.
- Evaluar el desempeño del sistema a partir de la cantidad de materia orgánica procesada y biogás obtenido.

2. BIOGAS

2.1 DEFINICION DE BIOGAS

Es la mezcla de gases producidas al descomponer materia orgánica dentro de un recinto cerrado libre de oxígeno y por medio de la digestión anaeróbica.

“El biogás o gas biológico, es un gas combustible que se produce a partir de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos; en forma natural y espontánea se forma en los lugares en que hay acumulación de esos desechos”¹.

2.2 CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS DEL BIOGAS

Está compuesto por metano, dióxido de carbono, ácido sulfúrico y otros componentes en menor medida, la cantidad de cada componente varía según la materia orgánica utilizada, el siguiente cuadro muestra el porcentaje aproximado de cada componente.

Cuadro 1. Composición química del biogás

Componente		Composición aproximada [%]
Metano	CH ₄	60 - 70
Gas Carbónico	CO ₂	30 - 40
Hidrógeno	H ₂	1.0
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Ácido sulfúrico	H ₂ S	0.1

Fuente: OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. p. 17.

¹ INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Biogás y bioabono aplicaciones. 1985. p. 1.

2.3 DIGESTION ANAEROBICA

Es un proceso mediante el cual se degrada la materia orgánica sin la presencia de oxígeno, esta descomposición se da debido a los microorganismos presentes en las heces de los animales y el material vegetal, este proceso está compuesto por cuatro fases que se dan al mismo tiempo, hidrolisis, acidogénesis, cetogénesis y metanogénesis.

2.3.1 Hidrolisis. En esta fase las macromoléculas son atacadas por bacterias hidrolíticas que las descomponen en compuestos como azúcares y ácidos grasos, más simples y fáciles de asimilar por otros microorganismos.

2.3.2 Acidogénesis. “En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrolisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como atecito, propiónico y butírico fundamentalmente”².

2.3.3 Acetogénesis. “Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrogeno y CO₂”³.

2.3.4 Metanogénesis. “En esta etapa metabólica el CH₄ es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H₂ y CO₂ pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol”⁴.

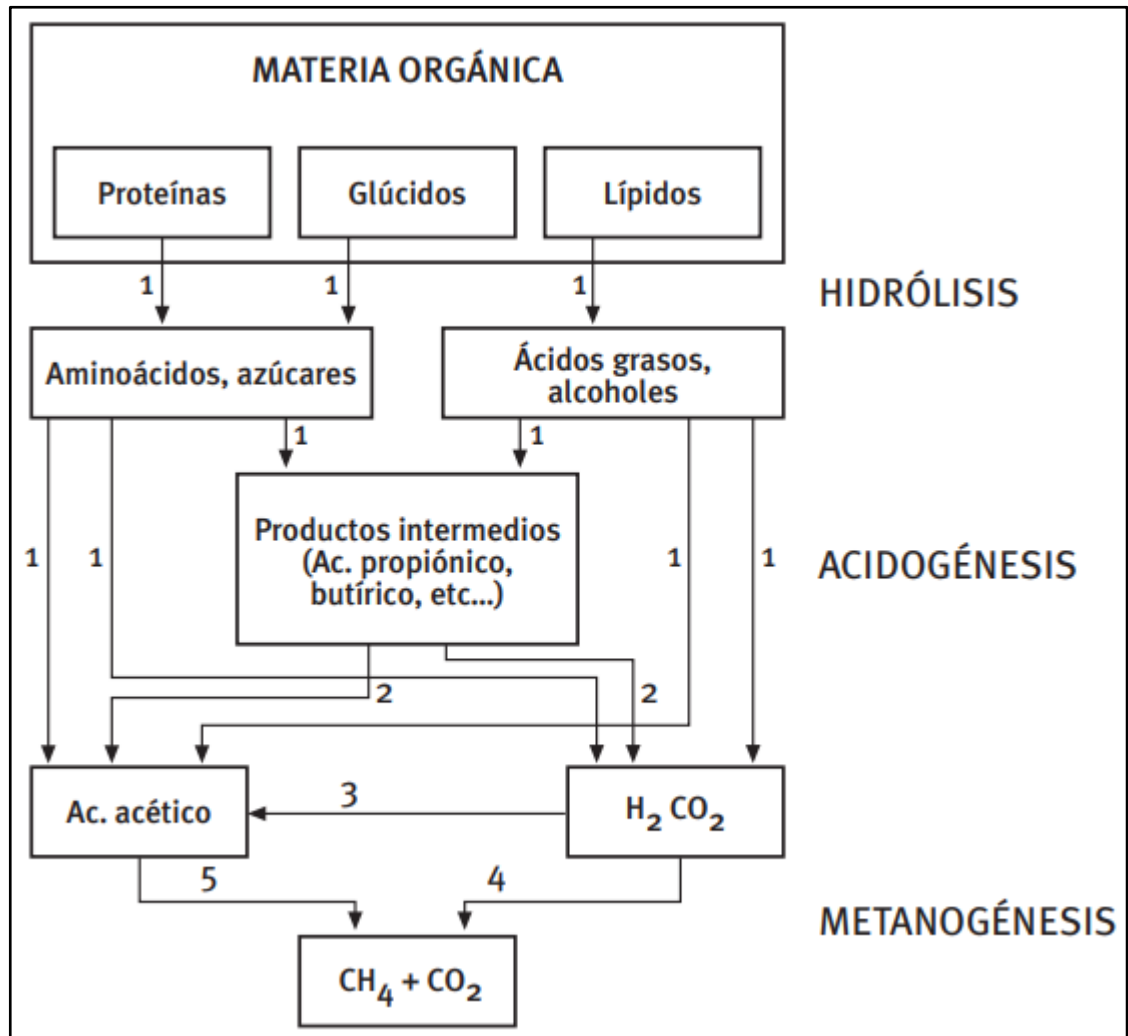
² LORENZO, Acosta y OBAYA, Ma Cristina. La digestión anaerobia, Aspectos teóricos Parte 1. ICIDCA. 2005, vol. XXXIX, nro. 1, p. 37.

³ Ibid., p. 37.

⁴ Ibid., p. 37.

Las etapas que intervienen en el proceso de digestión anaeróbica pueden ser representadas mediante el siguiente esquema.

Figura 1. Etapas de la digestión anaeróbica



Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACION Y AHORRO DE LA ENERGIA. Biomasa, digestores anaerobios. Madrid: IDAE, 2007. p. 12.

2.4 FACTORES DETERMINANTES EN LA PRODUCCION DE BIOGAS

2.4.1 Tipo de materia prima. “Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales”⁵. “Así, por ejemplo, con biomasa como el estiércol de cerdo se obtiene más biogás que con estiércol de ganado vacuno”⁶.

Cuadro 2. Producción de metano de algunos tipos de biomasa

Tipo de biomasa	Contenido orgánico	Relación C/N	ST (%)	SV % de ST	Producción de metano (CH ₄ /kg SV)
Desechos animales y subproductos					
Purín de cerdo	Carbohidratos, proteínas, lípidos	7	5	80	0.3
Estiércol de cerdo (sólido)			20	80	0.3
Purín de vaca		13	8	80	0.2
Estiércol de vaca (sólido)			20	80	0.2
Gallinaza		7	5	80	0.3
Estiércol de gallina (sólido)			20	80	0.3
Contenido de estómago/intestinos de ganado		4	12	80	0.4
Contenido de estómago/intestinos de cerdo		4	12	80	0.46

Fuente: ARRIETA, Winston. Diseño de un biodigestor domestico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico – Eléctrico. Piura. Universidad de Piura. 2016. p. 27

⁵ MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. p. 29.

⁶ ARRIETA, Winston. Diseño de un biodigestor domestico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico – Eléctrico. Piura. Universidad de Piura. 2016. 251 p. 26.

2.4.2 Temperatura del sustrato. “Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4° a 5° C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70°C. Se realiza generalmente una diferenciación en tres rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predominan en cada una de ellas”⁷.

Cuadro 3. Rangos de temperatura del sustrato

BACTERIAS	RANGO DE TEMPERATURAS	SENSIBILIDAD
Psicrofílicas	menos de 20°C	+ - 2°C/hora
Mesofílicas	entre 20°C y 40°C	+ - 1°C/hora
Termofílicas	más de 40°C	+ - 0,5°C/hora

Fuente: HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 8.

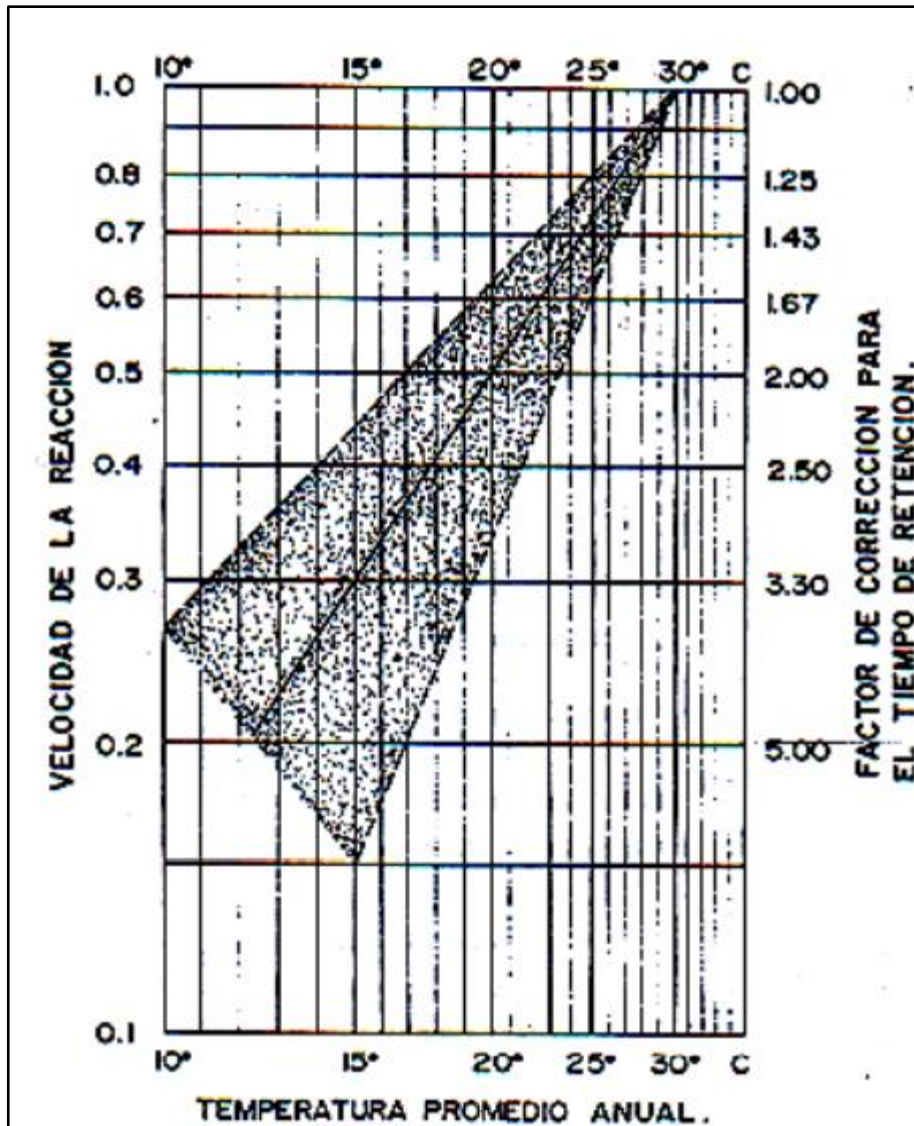
2.4.3 Tiempo de retención hidráulico. Se refiere a la cantidad de días que el material orgánico debe permanecer dentro del biodigestor para lograr la descomposición total. “El tiempo de retención está directamente relacionado con la temperatura ambiente y en condiciones óptimas del proceso, con una temperatura de 30 °C, el tiempo de retención (Tr) debería ser de 20 días”⁸.

Por otro lado, para temperaturas distintas a 30° se debe usar un factor de corrección que se puede determinar a partir del siguiente gráfico.

⁷ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 8.

⁸ OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. p. 11.

Figura 2. Relacion entre la temperatura y el factor de correccion del TR



Fuente: OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. p. 12.

2.4.4 PH. “El pH es un indicador de la acidez de una materia orgánica. El consorcio bacteriano que desarrolla la digestión anaerobia suele gustar de estar en ambientes con pH entre 6.5-7.5. Dentro del consorcio bacteriano, las bacterias que realizan la etapa de acidogénesis y acetogénesis trabajan mejor en pH 5.5 y 6.5, mientras que las metanogénicas lo hacen en un rango 7.8 a 8.2.”⁹.

2.4.5 Relación C/N. “La relación C/N influye sobre la producción de biogás, siendo la relación adecuada entre 20:1 y 30:1”¹⁰.

Cuadro 4. Relación C/N de algunas biomásas

Sustancia	Relación C/N
Orina	0.80
Estiércol equino	25
Estiércol vacuno	18
Alfalfa	16-20
Algas marinas	19
Aserrín	511
Basura	25
Cáscaras de papa	25
Paja seca de trigo	87
Paja seca de arroz	67
Tallo del maíz	53
Hojas secas	41
Estiércol de aves	32
Pasto	27
Estiércol ovino	29
Estiércol de cerdos	13
Excretas frescas humanas	2.90

Fuente: OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. p. 6.

⁹ DIAZ, Sonia y TORRES, Harold. Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural. Bogotá. Universidad Católica de Colombia. 2019. p. 14.

¹⁰ OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. p. 11.

2.4.6 Contenido de sólidos. “La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. En este punto tampoco existen reglas fijas; mediciones realizadas utilizando mezclas de estiércoles animales en agua han determinado que para digestores continuos el porcentaje de sólidos óptimo oscila entre el 8% y el 12%”¹¹.

“La cantidad de agua debe normalmente situarse alrededor de 90% en peso del contenido total. Tanto el exceso como la falta de agua son perjudiciales”¹².

Cuadro 5. Porcentaje de solidos totales en algunas biomosas

Solidos totales en sustratos diferentes	
Estiércol de vacunos	16-20%
Estiércol de cerdos	18%
Estiércol de gallinas	40-50%
Excretas humanas	17%
Rastrojo y hojas de maíz	77%
Pajas de arroz	92.6%
Papel periódico	93%

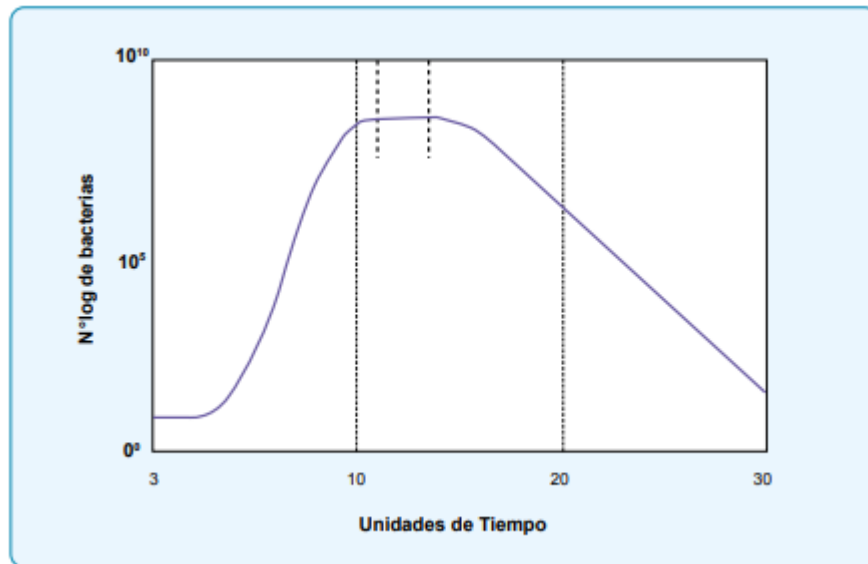
Fuente: TIRADO, Weimar. Diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema integral para el tratamiento y aprovechamiento del potencial energético y fertilizante de las excretas humanas y animales en una vivienda rural. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2015. p. 54.

¹¹ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 12.

¹² CAJAMARCA, Diego. Procedimientos para la elaboración de abonos orgánicos. Cuenca: Universidad de Cuenca, 2012. p. 56.

2.4.7 Inoculantes. En la siguiente grafica puede apreciarse la curva de crecimiento bacteriano en el biodigestor.

Figura 3. Crecimiento microbiano en un biodigestor anaeróbico



Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. p. 50.

“Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor es la proporción en que se agrega y la edad del mismo. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad del inóculo, mayor será la eficacia”¹³.

¹³ MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. 120 p. 50.

2.4.8 Inhibidores. “No permiten que el consorcio bacteriano realice la digestión anaerobia, estos pueden ser muchos, desde presencia de antibióticos en el estiércol, altos niveles de amoníaco (superiores a 3000mg/L), sulfatos (por encima de 5000 ppm), sal (por encima de 40000 ppm), metales pesados, etc. Con estiércoles no son un problema debido a las bajas concentraciones de estas sustancias”¹⁴.

Cuadro 6. Concentración de inhibidores

Inhibidor	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN	25 mg/l
Detergente	20-40 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l

Fuente: OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. p. 27.

2.4.9 Agitación.

La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el THR, esto es básicamente por cuatro razones:

- Distribución uniforme de la temperatura y substrato en el interior del biodigestor.

¹⁴ DIAZ, Sonia y TORRES, Harold. Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural. Bogotá. Universidad Católica de Colombia. 2019. p. 15

- Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- Mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada “nata” o “espuma” que dificulta la salida del biogás¹⁵.

2.5 USOS DEL BIOGAS

2.5.1 Cocina. “El biogás puede usarse para cocinar, en sustitución de la leña, el gas propano o el keroseno. Para hacer estas situaciones se puede proceder de dos diferentes maneras construir una estufa especial o si se cuenta con una estufa comercial de propano o de keroseno, modificarla para usar en ella el biogás”¹⁶.

2.5.2 Motores de combustión interna. “El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto nafteros como diésel, tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido”¹⁷.

¹⁵ MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. 120 p. 51

¹⁶ INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Biogás y bioabono aplicaciones. 1985. p. 5.

¹⁷ DIRECCION DE SUSTENTABILIDAD, MEDIO AMBIENTE Y CAMBIO CLIMATICO. Manual de biogás, conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sub-productos. Buenos Aires. p. 14.

2.5.3 Iluminación. “EL uso del biogás en iluminación, por medio de lámparas, tiene gran aceptación en las regiones urbanas no electrificadas. Se puede usar lámparas hechas especialmente o, bien, lámparas comerciales modificadas a propósito”¹⁸.

2.5.4 Unidades de refrigeración. “Los refrigeradores que funcionan con base en el principio de absorción y que usan gas propano, gas natural o keroseno pueden ser fácilmente adaptados para que funcionen con biogás; la adaptación consiste en sustituir la fuente de calor original por un quemador de biogás que produzca una cantidad equivalente de flujo calorífico”¹⁹.

2.5.5 Calefacción. “Los quemadores infrarrojos comúnmente utilizados en la calefacción de ambientes (especialmente en criaderos y parideras) presentan como ventaja su alta eficiencia lo cual minimiza el consumo de gas para un determinado requerimiento térmico”²⁰.

“Los calentadores de ambiente para criaderos de pollitos o cerditos; en estos casos, los quemadores comerciales han sido modificados para su uso con biogás”²¹.

¹⁸ INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Biogás y bioabono aplicaciones. 1985. p. 17.

¹⁹ Ibid., p. 19.

²⁰ DIRECCION DE SUSTENTABILIDAD, MEDIO AMBIENTE Y CAMBIO CLIMATICO. Manual de biogás, conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sub-productos. Buenos Aires. p. 14.

²¹ INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Op. cit. p. 21.

Cuadro 7. Equipos para consumo de biogás

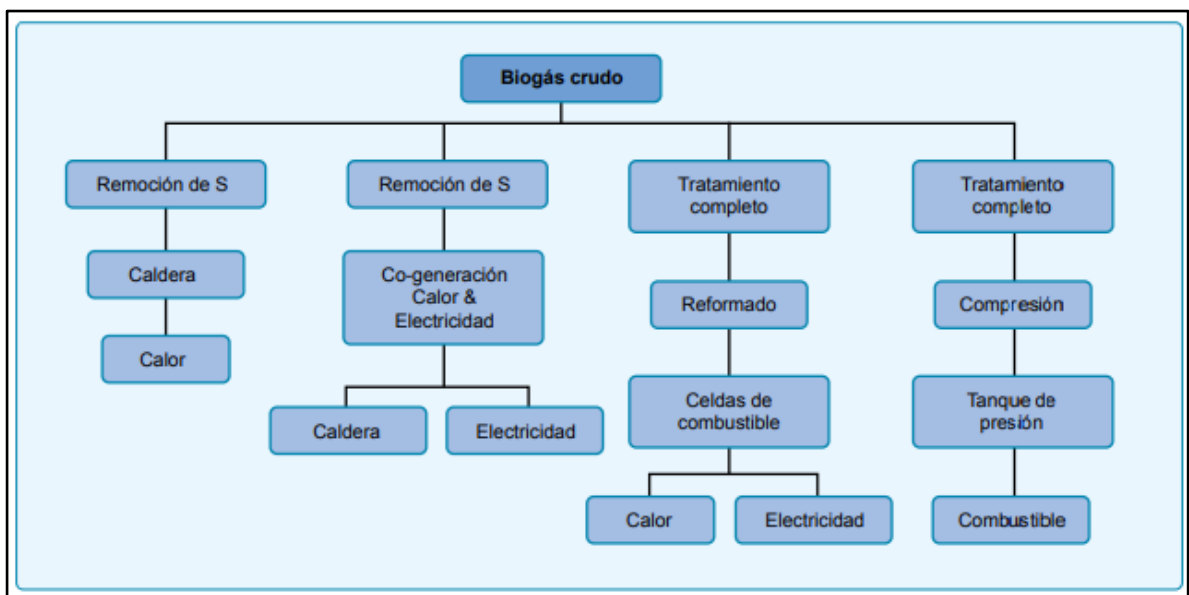
	<p>Lámparas a biogás</p>	<p>Consumo biogás: 0,07 m³/hr</p>
	<p>Cocina a biogás de dos hornillas</p>	<p>Consumo biogás: 0,20 - 0,42m³/hr</p>
	<p>Olla arrocera</p>	<p>Consumo biogás: 0,14m³/hr</p>
	<p>Generador eléctrico (600W)</p>	<p>Consumo de biogás: 0,7 -0,8 m³/kWh</p>
	<p>Calentador de agua</p>	<p>Consumo de biogás: 2,2 m³/hr Presión ingreso del agua: 0,025 - 0,8MPa Presión de gas requerida: 1,6KPa</p>

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. p. 65.

2.6 ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS

“El gas tal cual sale del digestor debe ser acondicionado a fin de asegurar un permanente y buen funcionamiento de los equipos que se alimentan de él. A pesar de que algunos de estos acondicionamientos no son necesarios en todos los casos, otros como el drenaje del agua de condensación deberá realizarse siempre”²².

Figura 4. Alternativas para el uso de biogás



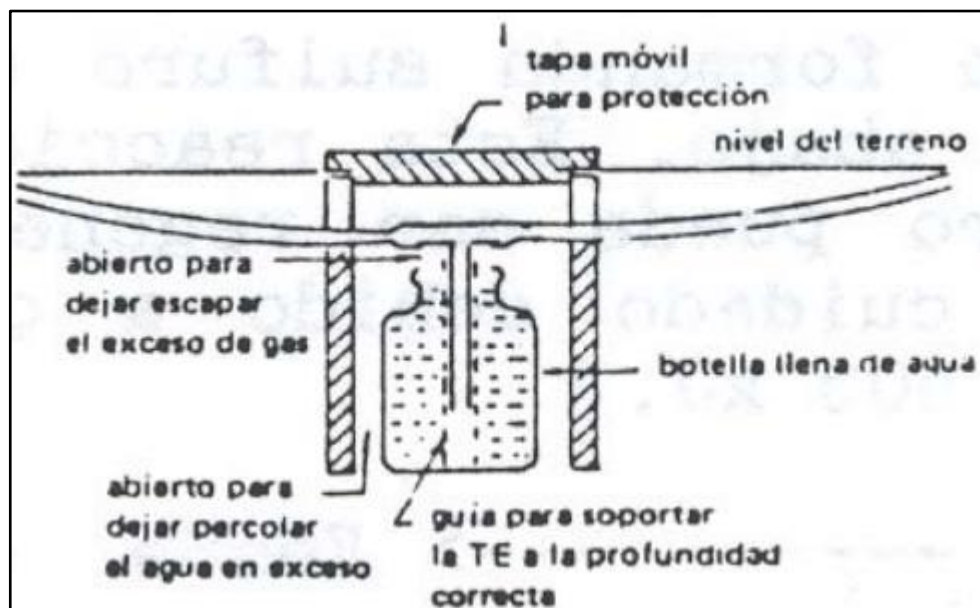
Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. p. 57.

²² HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 39.

2.6.1 Secado. “El biogás que sale del digestor está saturado de vapor de agua, a medida que se enfría el vapor se condensa en las cañerías y si no se lo evacua adecuadamente pueden bloquearse los conductos con agua”²³.

“Para una temperatura del biogás de 35 o C y un contenido de humedad del 100 % se condensan cerca de 35 g de agua por cada m³ de biogás”²⁴.

Figura 5. Drenaje subterráneo



Fuente: HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 39.

²³ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 40.

²⁴ AQUA LIMPIA ENGINEERING. Reducción de condensados. [Sitio web]. [Fecha de consulta: 17 marzo 2022]. Disponible en <<https://www.aqualimpia.com/>>.

2.6.2 Filtración del dióxido de carbono. “El dióxido de carbono no tiene ningún poder calorífico y debe ser calentado en la combustión. Su eliminación no es aconsejable salvo en los casos de almacenaje del biogás a altas presiones debido a que sería inútil gastar energía de compresión y volumen de almacenaje de alto costo en un gas que no daría ningún beneficio adicional”²⁵.

2.6.3 Filtración del sulfuro de hidrogeno. “Determinados equipos requieren que el gas a utilizar se encuentre libre de SO₂, debido a que el mismo combinado con el agua da como resultado ácido sulfhídrico que corroe las partes vitales de algunas instalaciones. El método más utilizado es hacer pasar el gas por un filtro que contiene hidróxido de hierro. El H₂S del gas se combina con el hierro formando sulfuro de hierro”²⁶.

²⁵ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 40.

²⁶ Ibid., p. 40.

3. FERTILIZANTE

3.1 DEFINICION DE BIOL

El biol es el resultado de la descomposición completa de la materia orgánica que se ingresa al biodigestor, “el fertilizante producido tiene un contenido en nitrógeno de 2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio entorno al 1% y entorno a un 85% de materia orgánica con un PH de 7.5”²⁷.

Cuadro 8. Composición del bioabono

Sólidos totales	=	8-9 g/100 g
Sólidos volátiles	=	5.5-6 g/100 g
Nitrógeno total (como N)	=	0.20 %
Fósforo (Como P₂ O₅)	=	0.15 %
Potasio (como K₂ O)	=	0.10 %

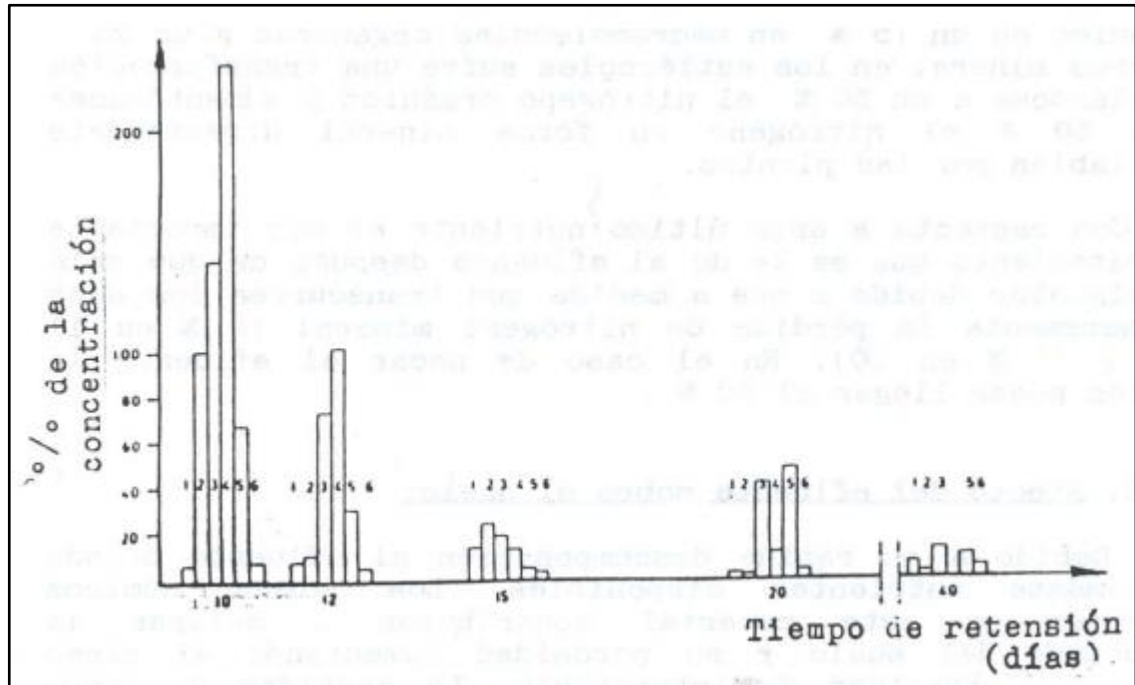
Fuente: INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Biogás y bioabono aplicaciones. 1985. p. 24.

La importancia del biol en su uso en los suelos es debido al incremento de los nutrientes que se depositan en el suelo para ser absorbidos por los cultivos, disminuye la erosión y que se estropeen debido a la explotación, otra gran característica es que “el efluente carece prácticamente de olor debido a que las

²⁷ DIAZ, Sonia y TORRES, Harold. Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural. Bogotá. Universidad Católica de Colombia. 2019. p. 57.

sustancias provocadoras del mal olor son reducidas casi en su totalidad en función al tiempo de retención”²⁸.

Figura 6. Reducción de las sustancias provocadoras de mal olor



Fuente: HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 41.

“Según el tipo de alimentación, raza, manejo, etc.; que tengan los animales y el tratamiento que sufran los estiércoles antes y después de su digestión estos valores pueden variar en forma significativa”²⁹.

²⁸ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 41.

²⁹ Ibid., p. 41.

3.2 FORMA DE APLICAR EL FERTILIZANTE

“En lo que respecta a la forma de aplicarlo y la manera en que acondiciona el suelo y mejora los cultivos, no hay diferencia entre el bioabono y cualquier otro abono orgánico conocido”³⁰.

“Para utilizar el biol, se procede de la siguiente forma:

- Sacar el biol en baldes en el momento necesario.
- Antes de aplicar el biol, mezclar con agua para evitar el posible “quemado” del follaje, de acuerdo a las dosis recomendadas.
- La parte sólida del biol, producto del colado, se usa como abono natural incorporándolo alrededor de las plantas”³¹.

“Las aplicaciones combinadas de bioabono y agua en proporción de 1:1 son las que han dado mejores resultados, debido a que el agua sirve de vehículo a los nutrientes y los lleva cerca del Sistema radicular; además, la mezcla con agua provoca la aireación que el abono necesita antes de ser usado”³².

³⁰ INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL.

Biogás y bioabono aplicaciones. 1985. p. 24.

³¹ CAJAMARCA, Diego. Procedimientos para la elaboración de abonos orgánicos. Cuenca: Universidad de Cuenca, 2012. p. 61.

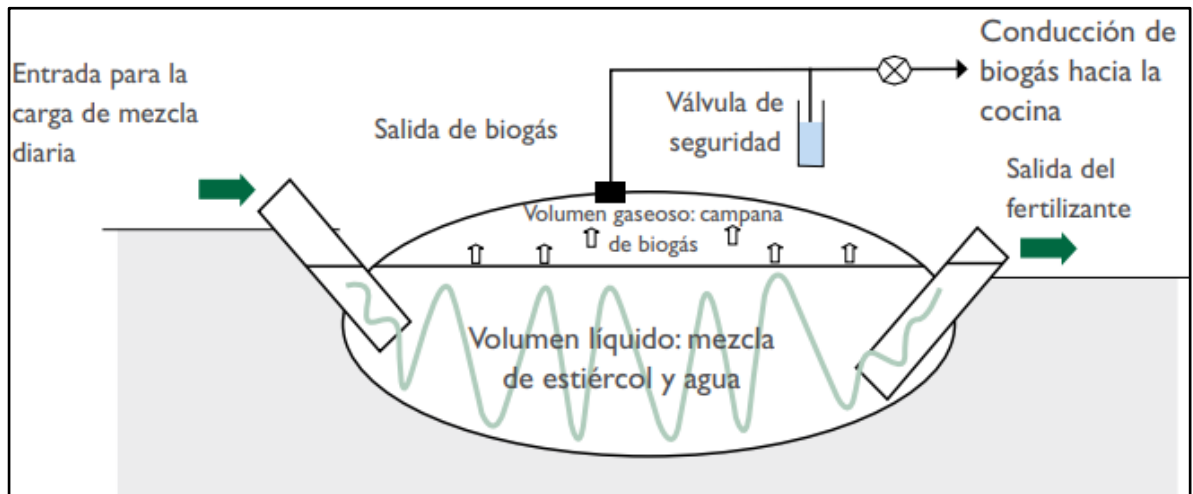
³² INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Op. cit. p. 27.

4. BIODIGESTORES

4.1 DEFINICION

Un biodigestor es un sistema por el cual se transforman los residuos orgánicos en otros tipos de materia utilizable sea biogás como fuente de energía y biol como fertilizante líquido para cultivos.

Figura 7. Esquema básico de un biodigestor



Fuente: HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. La Paz: Cooperación Técnica Alemana – GTZ, 2008. p. 28.

4.2 FUNCIONAMIENTO

Este se compone de un recinto cerrado y hermético con ausencia de aire en el cual la materia orgánica es cargada y posteriormente asimilada por microorganismos anaeróbicos durante determinada cantidad de tiempo llamada TRH (tiempo de retención hidráulico), durante este tiempo los residuos orgánicos entregan su producción total de biogás, al terminar el TRH la materia es retirada del digestor siendo un excelente fertilizante listo para ser utilizado en la siembra o acondicionamiento de suelos, por otro lado el biogás que se produce al ser una

mezcla de distintos gases debe ser “purificado” con el fin de ser utilizado como fuente de calor en distintos usos.

4.3 TIPOS

Los biodigestores pueden tener tecnologías muy variadas, que incluyen desde construcciones caseras con diversos materiales, hasta plantas con tecnología de punta completamente automatizadas. ¿Cuál es mejor? La realidad es que no existe una tecnología mejor que otra, sino tecnologías que se adaptan mejor a una situación que otras, y su elección depende del objetivo que se persiga, de los recursos de que se disponga, del dinero y tipo de financiamiento para realizar la inversión, y de la clase de sustrato que alimentará al biodigestor.³³

4.3.1 Continuos.

Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación, así como para su control. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales.³⁴

4.3.2 Semicontinuos.

Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digestor Indiano y Chino.³⁵

³³ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA AGRICULTURA. Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Buenos Aires, 2019. p. 14.

³⁴ MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. p. 97.

³⁵ *Ibid.*, p. 97.

4.3.3 Discontinuos. “Los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch o Batelada”³⁶.

4.4 MODELOS MAS USADOS EN EL SECTOR RURAL

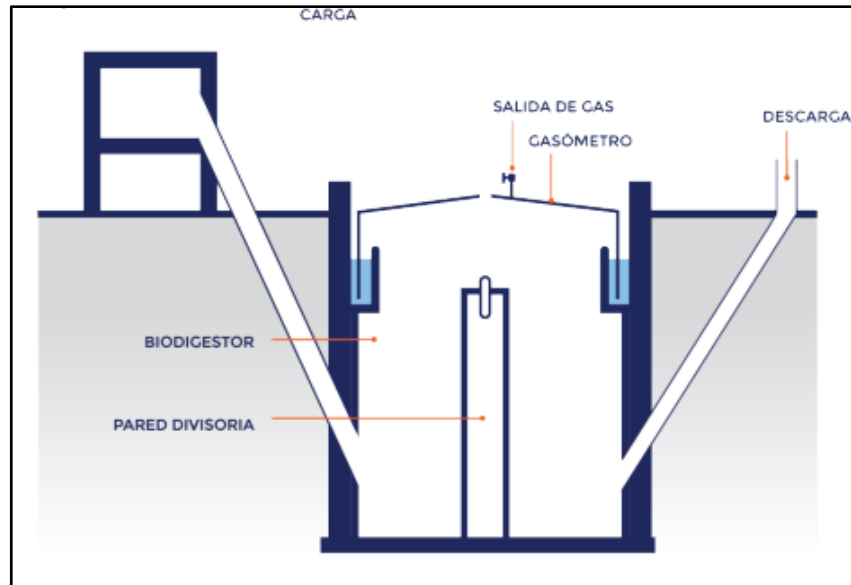
4.4.1 De campana flotante.

Este tipo de digestor del cuál han derivado infinidad de variaciones, posee una cámara de digestión de forma cilíndrica sobre la cual flota la campana gasométrica generalmente construida en hierro. La salida del efluente se efectúa por rebalse. El gas gracias al gasómetro flotante se almacena a presión constante y volumen variable. Esta presión de salida puede ser incrementada con la adición de contrapesos. Este digestor demanda un mayor gasto de materiales y la campana gasométrica es generalmente lo más caro del equipo. Su funcionamiento es muy sencillo y no presenta serios inconvenientes en el área rural.³⁷

³⁶ MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. p. 98.

³⁷ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 24.

Figura 8. Biodigestor tipo hindú o de campana flotante



Fuente: GOBIERNO DE SANTA FE. Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala. [Sitio web]. Santa Fe. [Fecha de consulta: 19 marzo 2022]. p. 5. Disponible en <<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> >.

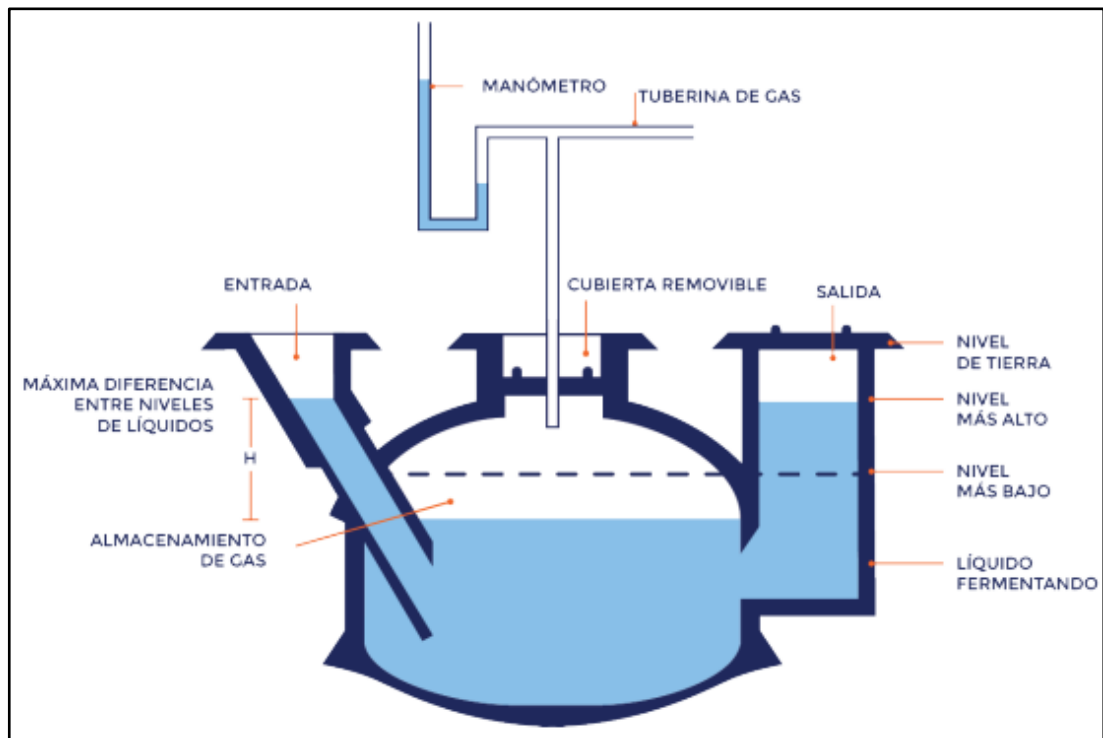
4.4.2 De campana fija.

Su forma se asemeja a una esfera y el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cual se obtiene desplazando el líquido en digestión hacia una cámara llamada de hidropresión. Estos digestores se cargan en forma semicontinua realizándose una primera carga con material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente, hasta un 70% de la capacidad luego se sigue cargando como un digestor continuo; a los 120 a 180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo. Fuera de China generalmente se maneja estos digestores en forma continua.³⁸

³⁸ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 23.

“La suspensión digerida (tiempo mayor de 50 días) más ligera que el lodo fresco, queda a pocos centímetros por encima de las capas de lodo fresco en las tuberías de entrada y salida. Por lo tanto, la suspensión más vieja se desplaza fuera del digester a los tanques de entrada y salida cuando el gas producido se acumula en la cúpula y presiona la suspensión”³⁹.

Figura 9. Biodigester tipo chino o de campana fija



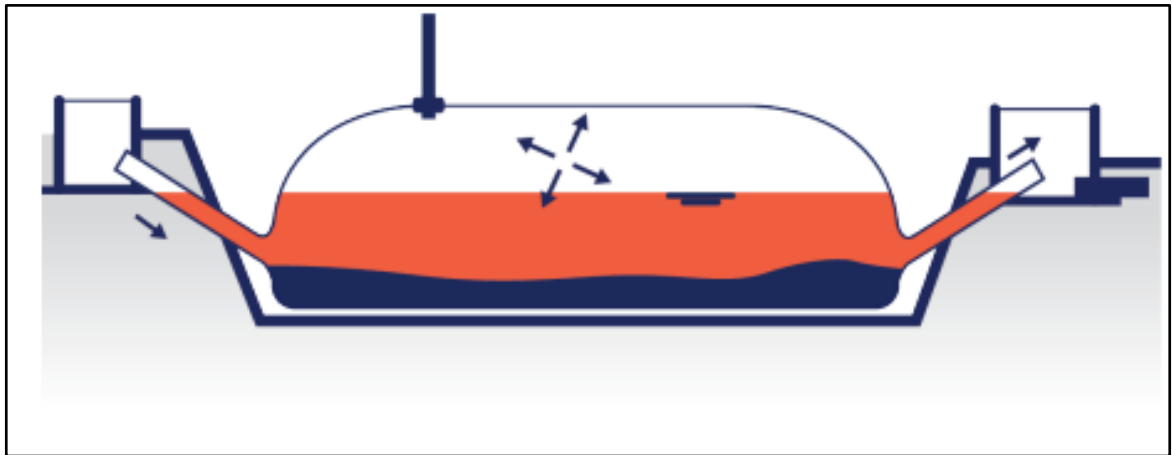
Fuente: GOBIERNO DE SANTA FE. Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala. [Sitio web]. Santa Fe. [Fecha de consulta: 17 marzo 2022]. p. 5. Disponible en <<https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-3-Biodigesti%C3%B3n-componentes-del-sistema.pdf>>.

³⁹ ARRIETA, Winston. Diseño de un biodigester domestico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico – Eléctrico. Piura. Universidad de Piura. 2016. p. 53.

4.4.3 Tubular.

Estos digestores se construyen generalmente enterrados, son poco profundos y alargados, semejando un canal, con relaciones de largo a ancho de 5:1 hasta 8:1 y sección transversal circular, cuadrada o en "V". Se operan a régimen semi continuo, entrando la carga por un extremo del digestor y saliendo los lodos por el extremo opuesto. La cúpula puede ser rígida o de algún material flexible que no presente fugas de gas y que resista las condiciones de la intemperie. Este tipo de digestores se recomiendan cuando se requiere trabajar con volúmenes mayores de 15 m³, para los cuales, la excavación de un pozo vertical comienza a resultar muy problemática.⁴⁰

Figura 10. Biodigestor tubular



Fuente: GOBIERNO DE SANTA FE. Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala. [Sitio web]. Santa Fe. [Fecha de consulta: 17 marzo 2022]. p. 6. Disponible en <<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>>.

⁴⁰ MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. p. 100.

5. JUSTIFICACION DE LA SOLUCION

5.1 CARACTERISTICAS CLIMATICAS DEL LUGAR DE IMPLEMENTACION

Este modelo se construyó y puso a prueba en la parcela Brisas del Rio en la vereda Guatiguará La Vega, Piedecuesta, Santander que consta con una temperatura media anual de 23°C⁴¹ y está a una altura media de 1005 msnm.

Figura 11. Lugar de implementación del sistema



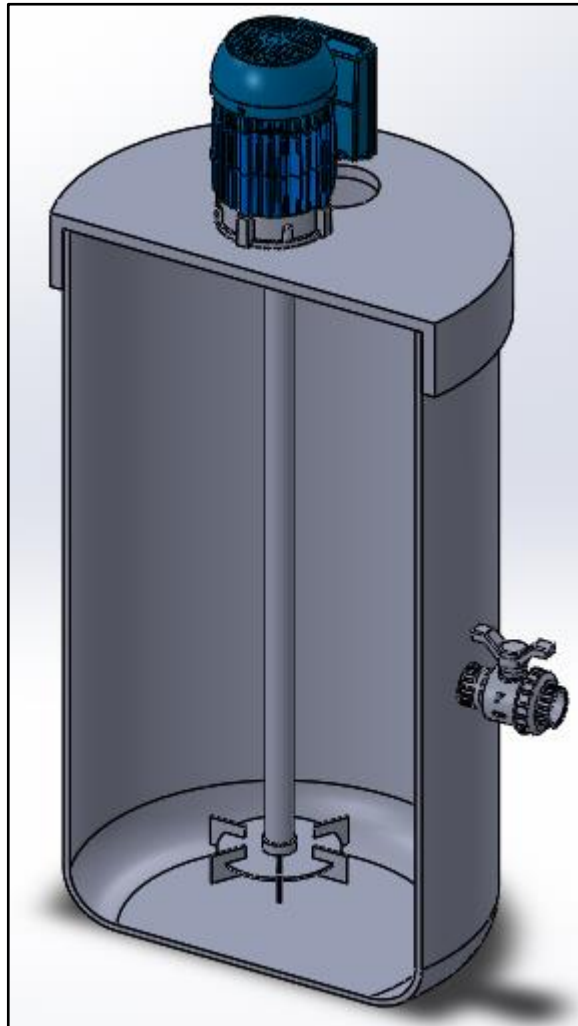
Fuente: Elaboración propia

⁴¹ ALCALDIA DE PIEDECUESTA. Plan de Desarrollo 2020-2023. [Fecha de consulta:17 marzo 2022]. Disponible en <<https://www.obsgestioneducativa.com/download/plan-de-desarrollo-municipal-piedecuesta-2020-2023/>> .

5.2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

5.2.1 Alternativa 1. El tanque cuenta con aspas que mejoran en gran medida la producción de biogás y la distribución más homogénea y rápida de las bacterias anaeróbicas por todo el tanque, sin embargo, sus costos de implementación también se incrementan debido al sistema de transmisión de potencia que se debe implementar.

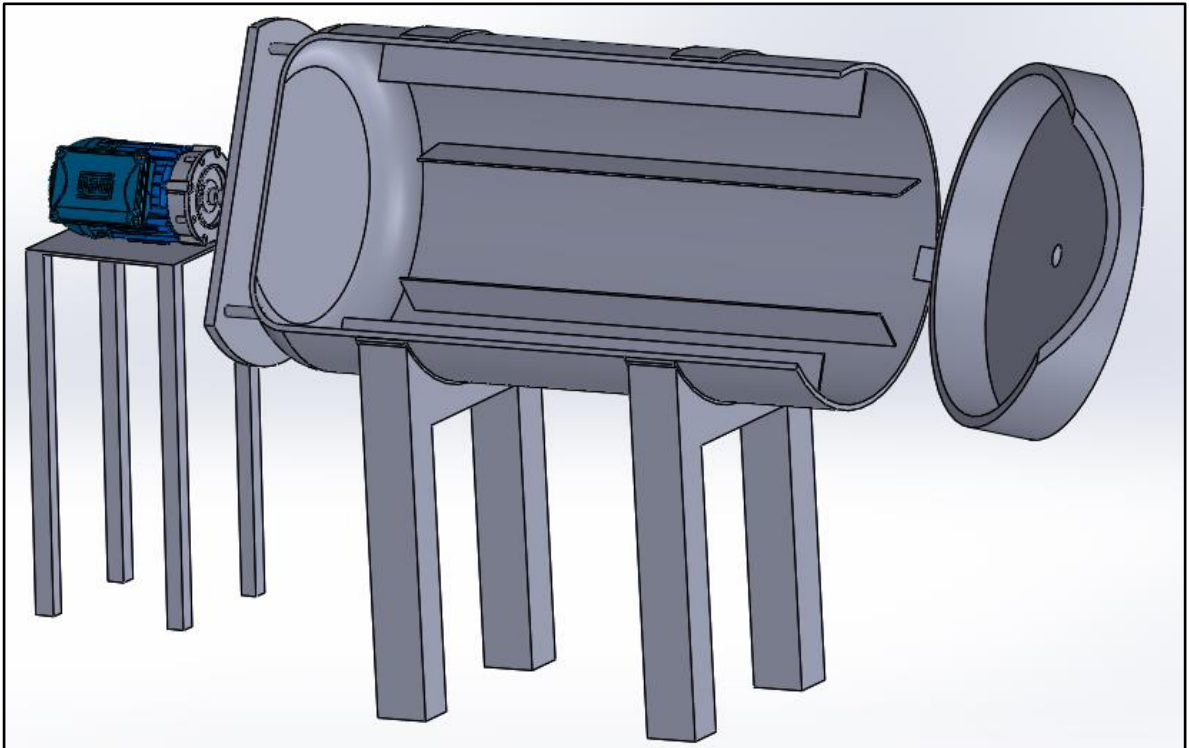
Figura 12. Tanque con sistema de transmisión de potencia



Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Alternativa 2. Con esta configuración se logra una mezcla mas completa gracias a las aspas y la accion de la gravedad, sin embargo el mas grande inconveniente de este modelo además del implemento del sistema de transmision de potencia es que debe funcionar de manera discontinua debido a la configuracion del tanque digestor.

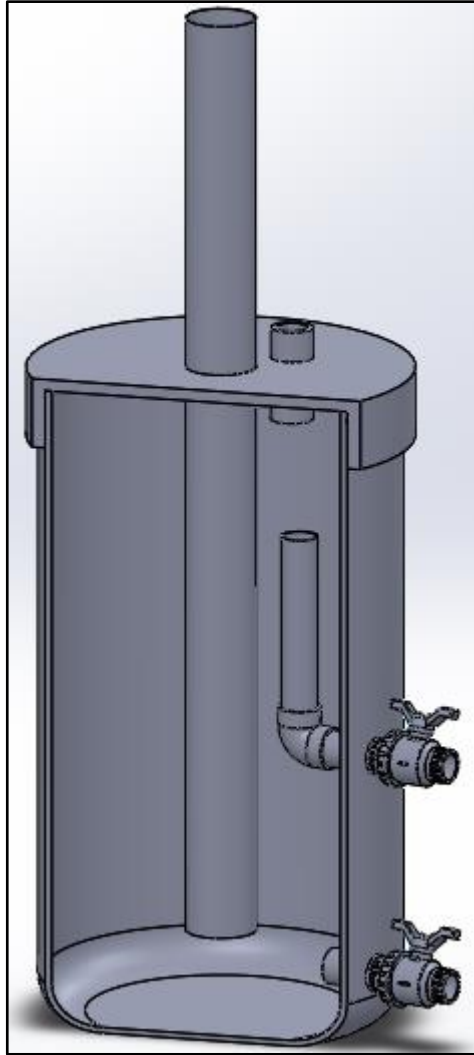
Figura 13. Tanque con sistema de transmisión de potencia en disposición horizontal



Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Alternativa 3. El tanque no posee aspadas para la mezcla rapida del material por lo que su funcionamiento es de flujo pistón, por otro lado una gran ventaja es que al no poseer sistema de transmision de potencia los costos de implementacion y funcionamiento se reducen en gran medida.

Figura 14. Tanque con flujo tipo pistón



Fuente: Elaboración propia

5.3 FUNCION DE CALIDAD

5.3.1 Requerimiento del consumidor

- Bajo consumo de energía
- Económico
- Fácil manejo
- Estética
- Repuestos
- Seguridad
- Tamaño
- Eficiencia
- Capacidad
- Eficacia
- Mantenimiento

5.3.2 Requerimientos de diseño

- Diseño
- Seguridad
- Dimensionamiento

- Economía
- Capacidad de carga
- Material
- Mantenibilidad
- Ergonomía
- Ensamblaje

5.4 MATRIZ DE CALIDAD

De acuerdo con los requerimientos de consumidor y de diseño se eligieron los requerimientos que más importancia tienen a la hora de diseñar el sistema.

Los requerimientos de diseño se ordenaron de mayor importancia a menor importancia y se les asignó un número correspondiente al grado de importancia.

En cuanto a la relación entre los requerimientos de consumidor y de diseño se asignaron valores en cuanto a la relevancia de la relación. Cuadros 9 y 10.

5.5 EVALUACION DE ALTERNATIVAS

En el Cuadro 11 se procedió a ponderar la nota de cada alternativa para tomar la mejor opción.

La nota corresponde a la relevancia de cada alternativa posee en relación a los requerimientos de diseño y está dada de 1 a 5.

Cuadro 9. Matriz de calidad

Requerimientos de consumidor		Requerimientos de diseño																	
	Importancia	Diseño		Seguridad		Mantenimiento		Economía		Capacidad de carga		Materiales		Mezclado		Ergonomía		Ensamblaje	
		Rel	Peso	Rel	Peso	Rel	Peso	Rel	Peso	Rel	Peso	Rel	Peso	Rel	Peso	Rel	Peso	Rel	Peso
Bajo consumo de energía	11	3	33	0	0	3	33	3	33	2	22	0	0	0	0	0	0	0	0
Eficacia	10	3	30	0	0	1	10	3	30	1	10	2	20	2	20	0	0	0	0
Eficiencia	9	3	27	0	0	1	9	3	27	1	9	2	18	2	18	0	0	0	0
Economía	8	2	16	2	16	2	16	3	24	3	24	2	16	3	24	0	0	2	16
Seguridad	7	3	21	3	21	1	7	2	14	2	14	3	21	3	21	1	7	2	14
Fácil manejo	6	2	12	2	12	0	0	1	6	2	12	1	6	1	6	3	18	1	6
Mantenimiento	5	2	10	3	15	1	5	3	15	2	10	1	5	3	15	1	5	0	0
Capacidad	4	3	12	0	0	3	12	3	12	3	12	1	4	2	8	1	4	0	0
Repuestos	3	2	6	2	6	2	6	2	6	2	6	2	6	2	6	2	6	3	9
Tamaño	2	3	6	0	0	2	4	2	4	2	4	2	4	1	2	2	4	3	6
estética	1	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total			175		71		103		171		114		100		120		44		51

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 10. Relevancia de requerimientos

Relevancia	
3	Muy relevante
2	Relevante
1	Poco relevante
0	Nada relevante

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 11. Evaluación de alternativas

	Puntaje QFD	%	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
			Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso
Diseño	175	25.6	5	1.28	2	0.512	4	1.024
Mantenimiento	103	15	4	0.75	3	0.45	2	0.3
Economía	171	25	2	0.5	1	0.25	5	1.25
Capacidad de carga	114	16.69	3	0.5	2	0.33	3	0.5
Mezclado	120	15.56	5	0.778	3	0.46	2	0.31
Total	683			3.8		2		3.38

Fuente: Elaboración propia

5.6 DISEÑO ELEGIDO

De acuerdo con los resultados arrojados por la matriz de calidad la alternativa ganadora fue la número uno, se puede observar que los atributos más importantes de este modelo son el diseño destacado con respecto a los otros, así como su capacidad de mezclado y su mantenibilidad. Sin embargo, debido a que los costos que implica este modelo, correspondientes a la adquisición del motorreductor y de la fabricación del eje y de la turbina se encontraron fuera del presupuesto se optó por implementar el sistema de la alternativa 3. A pesar de esto se realizó el diseño del sistema de transmisión de potencia con el fin de no faltar con los objetivos del proyecto.

6. DISEÑO DEL SISTEMA

6.1 CARACTERIZACION DE LA MASA

Para el diseño se partió de la cantidad de materia orgánica a ser procesada para poder establecer el volumen del tanque. En este modelo se utilizó la materia producida por dos animales con un promedio diario de 200 gramos de excremento. Se calculó de forma experimental la densidad de las heces a usar de acuerdo con la ecuación 1,

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

ρ : Densidad de la biomasa

m : Masa

v : Volumen

Para el cálculo del volumen se usó un pequeño recipiente cilíndrico hueco de diámetro interior $D = 2.75 \text{ cm}$ y altura $h = 2.8 \text{ cm}$, en la ecuación 2 se calculó el volumen del recipiente.

$$v = \frac{\pi}{4} * D^2 * h \quad (2)$$

$$v = \frac{\pi}{4} * 2.75^2 * 2.8$$

$$v = 16.63 \text{ cm}^3$$

v : Volumen del cilindro

D : Diámetro del cilindro

h : Altura del cilindro

En el caso de la masa se introdujeron pequeñas cantidades de heces hasta ocupar todo el volumen del cilindro y posteriormente se pesaron, este procedimiento se repitió durante 7 días, en el Cuadro 12 se muestran los pesos registrados (después de habersele restado el peso del cilindro), y el valor promedio de la densidad.

Cuadro 12. Densidad experimental de la biomasa

Día	Peso [g]	Densidad [g/cm^3]
1	20	1.2026
2	21	1.2627
3	20	1.2026
4	19	1.1425
5	19	1.1425
6	18	1.0823
7	19	1.1425
Promedio		1.168

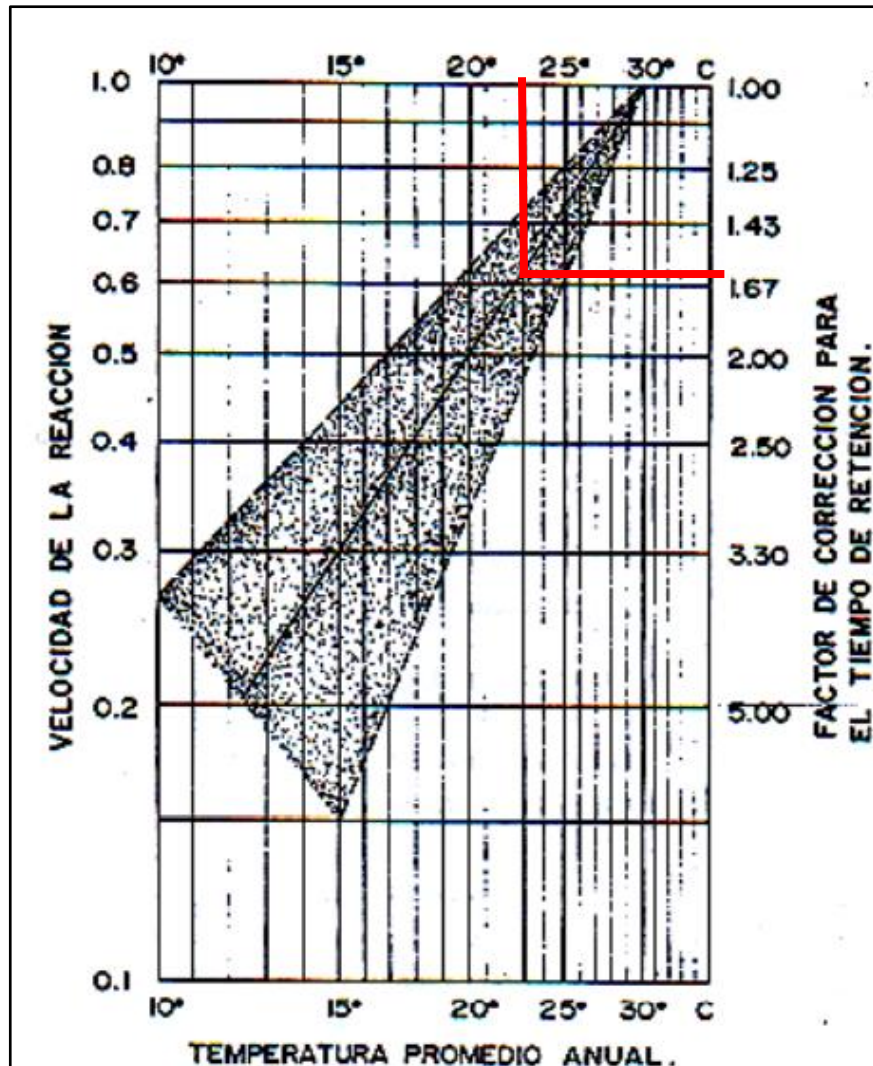
Fuente: Elaboración propia

6.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

A partir de la temperatura media anual de la parcela establecida en el ...apartado 5.1... y de la Figura 15 se tomó el factor de corrección como,

$$F_c = 1.61$$

Figura 15. Selección del factor de corrección del TR



Fuente: OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. p. 12.

Para el cálculo del tiempo de retención hidráulico TRH se utilizó la ecuación 3 como se definió en el ...apartado 2.4.3...

$$TRH = TRI * Fc \quad (3)$$

$$TRI = 20 \text{ días}$$

$$TRH = 20 * 1.61 \approx 32 \text{ días}$$

TRH: Tiempo de retención hidráulico

TRI: Tiempo de retención ideal

Fc: Factor de corrección

A continuación, se procedió a calcular el volumen diario de la mezcla que debe alimentar al digester con respecto a la cantidad de material producido diariamente. Debido a la concentración de materia en la mezcla establecido en el ...apartado 2.4.6... se optó por fijarlo en una concentración del 10% en masa,

$$\frac{m_h}{m_a + m_h} = 0,1 \quad (4)$$

m_h : Masa de heces

m_a : Masa de agua

Ya que el volumen diario está formado por el volumen de agua y el de las heces se estableció que,

$$V_d = V_a + V_h \quad (5)$$

V_d : Volumen diario

V_a : Volumen de agua

V_h : Volumen de heces

Sustituyendo la ecuación 1 en la ecuación 5,

$$V_d = \frac{m_a}{\rho_a} + \frac{m_h}{\rho_h} \quad (6)$$

ρ_a : Densidad del agua

ρ_h : Densidad de heces

Se reemplaza la ecuación 4 en la ecuación 6 y se obtiene,

$$V_d = m_h \left(\frac{9}{\rho_a} + \frac{1}{\rho_h} \right) \quad (7)$$

$$V_d = 200 \left(\frac{9}{0.997} + \frac{1}{1.168} \right)$$

$$V_d = 1976.65 \text{ cm}^3$$

Con el valor del tiempo de retención hidráulico calculado en la ecuación 3 se determinó el volumen total que debe tener el depósito a seleccionar,

$$V_T = V_d * TRH \quad (8)$$

$$V_T = 1976.65 * 32$$

$$V_T = 63252.8 \text{ cm}^3 = 63.27 \text{ l}$$

V_T : Volumen total

TRH : Tiempo de retención hidráulico

Con este volumen se investigó en el mercado y se encontró un tanque de material plástico con el volumen aproximado, en la Figura 16 se muestra un tanque de referencia.

Figura 16. Caneca plástica de referencia



Fuente: AENVASAR. [Sitio web]. Cali. [Fecha de consulta: 18 marzo 2022].
Disponibile en: <http://aenvasar.com/producto/caneca-plastica-60-litros/>.

Debido a las características de funcionamiento y de las dimensiones de algunos accesorios del sistema se tomó la decisión de recalcular la cantidad de masa a ingresar al tanque de 60 litros adquirido y por medio de un proceso iterativo teniendo en cuenta los distintos accesorios se concluyó que la cantidad de materia orgánica a ingresar fuese de 125 g de heces y de 1123.2 g de agua para un total diario de 1234 cm³ de mezcla, en el Anexo A se muestra el proceso de recalculo llevado a cabo.

6.3 COMPONENTES DEL SISTEMA

6.3.1 Transmisión de potencia. Ya que la concentración de la masa en la mezcla es del 10%, se tomaron las características físicas de la mezcla como si fuesen agua.

Cuadro 13. Propiedades físicas de la mezcla

Densidad	997 kg/m ³
Viscosidad dinámica	1.002 mPa*s = 0.001002 Pa*s [kg/(m*s)]

Fuente: Elaboración propia

6.3.1.1 Turbina. De acuerdo con trabajos de otros autores la velocidad a la cual debe ser agitada la mezcla dentro del biodigestor varía desde 33 rpm⁴² y 40 rpm⁴³, hasta 80 y 200 rpm⁴⁴, se estableció entonces una velocidad de rotación del eje de 80 rpm. De acuerdo a los parámetros mostrados en la Figura 17, las proporciones típicas de un tanque agitado son⁴⁵,

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{E}{D_a} = 1$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

⁴² PONANGRONG, Pathompong y CHISUWAN, Anusorn. An investigation of performance of a horizontal agitator gasification reactor. *Energy Procedia*. Junio, 2019, vol. 157, p. 686.

⁴³ SIERRA, Andrea. Obtención de biogás a partir de gallinaza producida en la granja Bellavista-Horizontes a servicio de Incubadora Santander S.A. Trabajo de grado Magister en Química Ambiental. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2013. p. 57.

⁴⁴ X, Gómez, *et al.* Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable energy*. 2006, vol. 31, p. 2019.

⁴⁵ MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 251

D_a : Diámetro de turbina

D_t : Diámetro de tanque

E : Distancia entre el fondo del tanque y la turbina

W : Alto de paleta

L : Ancho de paleta

De donde se obtuvo,

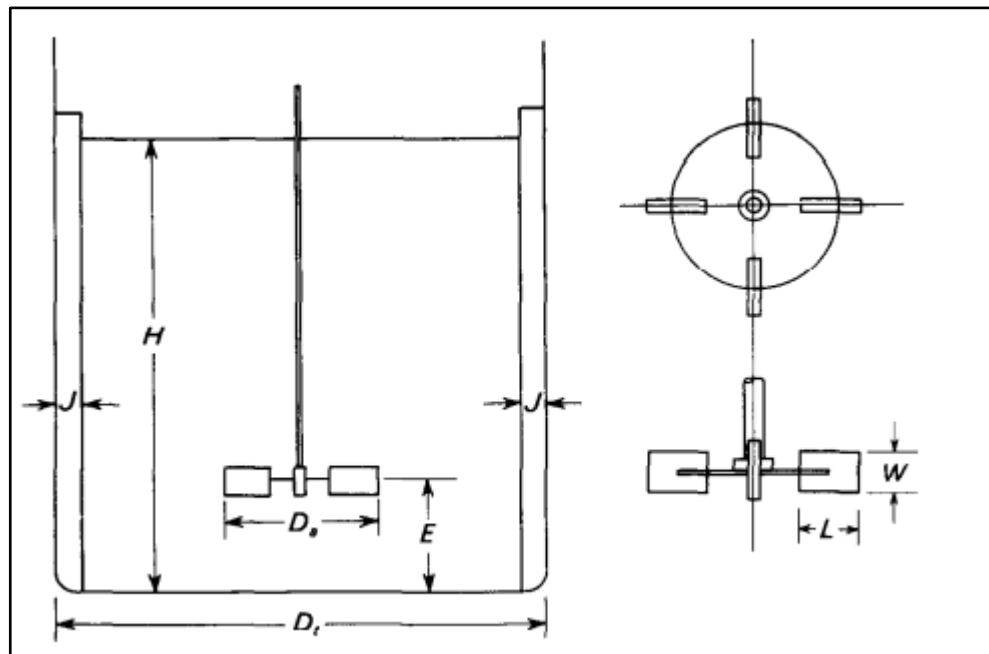
$$D_a = 11.16 \text{ cm}$$

$$E = 11.16 \text{ cm}$$

$$W = 2.232 \text{ cm}$$

$$L = 2.79 \text{ cm}$$

Figura 17. Medidas de un agitador de turbina



Fuente: MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 251

6.3.1.2 Espesor de paletas. Se estableció el número de paletas en 6 y se seleccionó acero inoxidable AISI 316 ya que tiene propiedades anticorrosivas, Cuadro 17. En la ecuación 9 se calculó la fuerza ejercida sobre cada paleta por la acción del torque debido al movimiento⁴⁶,

$$F = \frac{1}{2} * C_A * \rho * v^2 * A \quad (9)$$

F : Fuerza ejercida en cada paleta

C_A : Coeficiente de arrastre

ρ : Densidad del medio

v : Velocidad

A : Área

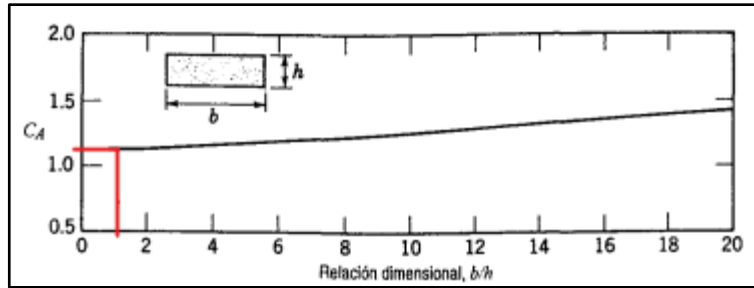
De la Figura 18 se tomó el factor de arrastre que depende de la geometría de la placa⁴⁷,

$$\frac{b}{h} = \frac{2.79}{2.232} = 1.25$$

⁴⁶ FOX, Robert y MCDONALD, Alan. Introducción a la mecánica de fluidos. 4ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 1995. p. 483.

⁴⁷ FOX, Robert y MCDONALD, Alan. Introducción a la mecánica de fluidos. 4ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 1995. p. 489.

Figura 18. Coeficiente de arrastre para una placa plana



Fuente: FOX, Robert y MCDONALD, Alan. Introducción a la mecánica de fluidos. 4ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 1995. p. 489.

$$C_A = 1.2$$

Debido a que la fuerza es función del radio la ecuación 9 se reescribió como,

$$F = \frac{1}{2} * C_A * \rho * \omega^2 * W * r^3 \quad (10)$$

ω : Velocidad angular

W : Altura de turbina

r : Radio

En la ecuación 11 se calculó el torque producido en cada placa en función del radio,

$$T = \int F dr \quad (11)$$

$$T = \frac{1}{2} * C_A * \rho * \omega^2 * W \int_{r_1}^{r_2} r^3 dr$$

$$T = \frac{1}{8} * 1.2 * 997 * 8.378^2 * 0,02232 * \int_{0.0279}^{0.0558} r^3 dr$$

$$T = 0.002129 \text{ N} - \text{m}$$

En la ecuación 12 se calculó el esfuerzo permisible a flexión, se estableció un factor de seguridad de 2.5,

$$\sigma_{perm} = \frac{S_y}{N} = \frac{207 \text{ MPa}}{2.5} = 82.8 \text{ MPa} \quad (12)$$

σ_{perm} : Esfuerzo permisible a flexión

S_y : Esfuerzo de fluencia

N : Factor de seguridad

En la ecuación 13 se calculó el espesor mínimo de cada paleta⁴⁸,

$$\sigma_{perm} = \frac{T}{S} = \frac{T}{\frac{1}{6} * W * e^2} \quad (13)$$

$$e = \sqrt{\frac{6 * T}{W * \sigma_{perm}}} = \sqrt{\frac{6 * 0.002129}{0.02232 * 82.8 * 10^6}}$$

$$e = 0.083 \text{ mm}$$

T : Torque

S : Módulo elástico

W : Altura de paleta

e : Espesor de paleta

Debido a que el espesor calculado es muy pequeño se tomó un espesor normalizado de 3 mm.

⁴⁸ BEER, Ferdinand, *et al.* Mecánica de materiales. 5a ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2010. p. 217.

6.3.1.3 Motorreductor. En la ecuación 14 se calculó el número de Reynolds⁴⁹,

$$R_e = n * D_a^2 * \frac{\rho}{\mu} \quad (14)$$
$$R_e = \frac{1.33 [rps] * (0.1116)^2 [m] * 997 [kg/m^3]}{0.001002 [\frac{kg}{m * s}]}$$
$$R_e = 16481.9$$

R_e : Número de Reynolds

n : Velocidad angular

D_a : Diámetro de turbina

ρ : Densidad de mezcla

μ : Viscosidad dinámica

El número de Froude se halló con la siguiente ecuación⁵⁰,

$$F_r = \frac{n^2 * D_a}{g} \quad (15)$$
$$F_r = \frac{(1.33)^2 [rps] * 0.1116 [m]}{9.81 [m/s^2]}$$
$$F_r = 0.02$$

F_r : Número de Froude

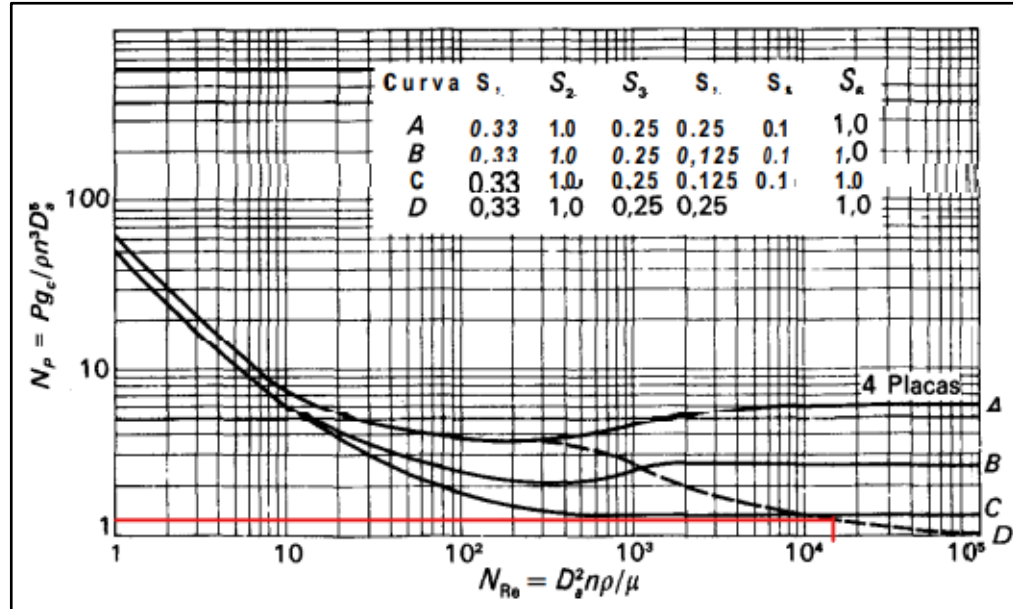
g : Aceleración de la gravedad

⁴⁹ MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 258

⁵⁰ Ibid., p. 260.

De la Figura 19 se halló el número de potencia siguiendo la curva D correspondiente a un tanque sin placas deflectoras de 6 paletas.

Figura 19. Numero de potencia para turbina de seis palas



Fuente: MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 259.

$$N_p = 1.3$$

En la ecuación 16 se calculó la potencia del eje⁵¹,

$$P_0 = \frac{N_p * F_r^m * n^3 * D_a^5 * \rho}{g} \quad (16)$$

P_0 : Potencia del eje

N_p : Número de potencia

⁵¹ MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 262.

La constante m se calculó como⁵²,

$$m = \frac{a - \log_{10} R_e}{b} \quad (17)$$

Las constantes a y b se tomaron del Cuadro 14,

Cuadro 14. Constantes a y b

Figura	Línea	a	b
9.13	D	1,0	40,0
9.14	B	1,7	18,0
9.14	c	0	18,0
9.14	D	2,3	18,0

Fuente: MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 261.

Reemplazando en la ecuación 17,

$$m = \frac{1 - \log_{10} 16481.9}{40}$$

$$m = -0.08$$

Reemplazando el valor de m en la ecuación 16 se tuvo,

$$P_0 = \frac{1.3 * 0.02^{-0.08} * 1.33^3 [rps] * 0.1116^5 [m] * 997 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{9.81 [m/s^2]}$$

$$P_0 = 0.00736 [kg * m/s]$$

$$P_0 = 0.0722 W$$

⁵² MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 260.

A continuación, se seleccionó el factor de servicio del motorreductor de acuerdo al catálogo seleccionado.

Cuadro 15. Factor de servicio motorreductor

Naturaleza de la carga de la máquina accionada Nature de la charge de la machine entraînée		Duración del funcionamiento [h] Durée de fonctionnement [h]					Frecuencia de arranque z [arr./h] Fréquence de démarrage z [dém./h]							
Ref. Réf.	Descripción Description	3 150 ≤ 2 h/d	6 300 2-4 h/d	12 500 4-8 h/d	25 000 8-16 h/d	50 000 16-24 h/d	2	4	8	16	32	63	125	250
a	Uniforme Uniforme	0,8	0,9	1	1,18	1,32	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5
b	Sobrecargas moderadas 1,6 × normal) Surcharges modérées (1,6 × normal)	1	1,12	1,25	1,5	1,7	1	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4
c	Sobrecargas fuertes 2,5 × normal) Fortes surcharges (2,5 × normal)	1,32	1,5	1,7	2	2,24	1	1	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32

Fuente: COTRANSA. Reductores y motorreductores de engranajes y coaxial.

[Fecha de consulta:16 marzo 2022]. p. E6. Disponible en

<<https://www.cotransa.net/descargas/descargas-phpcodreductores-y-motorreductores/>>.

$$f_s = 0.8$$

La potencia calculada fue multiplicada por este factor de servicio para hallar la potencia necesaria en el motorreductor,

$$P = P_0 * f_s \tag{18}$$

$$P = 0.0722 * 0.8$$

$$P = 0.0577 \text{ W}$$

P : Potencia del motorreductor

f_s : Factor de servicio

Debido a que le valor de potencia calculado es muy bajo se decidió seleccionar un motorreductor de catálogo de acuerdo con la potencia y la velocidad de agitación a

implementar, en específico se seleccionó un motorreductor de 90 w, Cuadro 16, siendo este el más cercano, de esta forma se asegura que el eje del agitador no tenga la posibilidad de sufrir daños por fuerzas dinámicas imprevistas que puedan aparecer.

Cuadro 16. Selección de motorreductor

P_1 kW	n_2 min ⁻¹	M_2 daN m	f_s	Reductor - Motor Réducteur - Moteur	i
1)				2)	
0,09	6,91	11,9	1,12	MR 3I 50 - 63 A 6	130
	8,4	9,8	1,5	MR 3I 50 - 63 A 6	107
	8,4	9,8	1,9	MR 3I 51 - 63 A 6	107
	9,7	8,5	0,8	MR 3I 40 - 63 A 6	92,8
	10,3	8	2	MR 3I 50 - 63 A 6	87,3
	10,3	8	2,8	MR 3I 51 - 63 A 6	87,3
	12,1	6,8	1,12	MR 3I 40 - 63 A 6	74,4
	12,1	6,8	1,32	MR 3I 41 - 63 A 6	74,4
	12,6	6,5	2,5	MR 3I 50 - 63 A 6	71,4
	13,7	6	1,25	MR 3I 40 - 63 A 6	65,9
	13,7	6	1,6	MR 3I 41 - 63 A 6	65,9
	13,8	6	2,65	MR 3I 50 - 63 A 6	65
	15,1	5,5	3	MR 3I 50 - 63 A 6	59,5
	16,1	5,1	1,5	MR 3I 40 - 63 A 6	55,9
	16,1	5,1	1,9	MR 3I 41 - 63 A 6	55,9
	17,5	4,71	3,35	MR 3I 50 - 63 A 6	51,4
	17,5	4,7	1,6	MR 3I 40 - 63 A 6	51,3
	17,5	4,7	2	MR 3I 41 - 63 A 6	51,3
	18,9	4,35	0,85	MR 3I 32 - 63 A 6	47,5
	20,1	4,1	1,8	MR 3I 40 - 63 A 6	44,7
	20,1	4,1	2,24	MR 3I 41 - 63 A 6	44,7
	20,9	3,94	4	MR 3I 50 - 63 A 6	43
	21,4	3,86	0,95	MR 3I 32 - 63 A 6	42,1
	22,7	3,63	2,12	MR 3I 40 - 63 A 6	39,6
	22,7	3,63	2,65	MR 3I 41 - 63 A 6	39,6
	25,2	3,27	1,12	MR 3I 32 - 63 A 6	35,7
	26,8	3,08	2,5	MR 3I 40 - 63 A 6	33,6
	28,1	2,94	1,25	MR 3I 32 - 63 A 6	32,1
	29,2	2,82	2,65	MR 3I 40 - 63 A 6	30,8
	32,1	2,57	1,4	MR 3I 32 - 63 A 6	28,1
	34,3	2,41	3	MR 3I 40 - 63 A 6	26,2
	36,2	2,28	1,6	MR 3I 32 - 63 A 6	24,9
	40,7	2,07	2,8	MR 2I 40 - 63 A 6	22,1
	42,6	1,94	1,9	MR 3I 32 - 63 A 6	21,1
	47,5	1,74	2,12	MR 3I 32 - 63 A 6	18,9
	54,7	1,51	2,24	MR 3I 32 - 63 A 6	16,5
	66,8	1,26	2,5	MR 2I 32 - 63 A 6	13,5
	83,4	1,01	3,35	MR 2I 32 - 63 A 6	10,8
	94,1	0,9	3,75	MR 2I 32 - 63 A 6	9,57

Fuente: COTRANSA. Reductores y motorreductores de engranajes y coaxial.

[Fecha de consulta:16 marzo 2022]. p. E7. Disponible en

<<https://www.cotransa.net/descargas/descargas-phpcodreductores-y-motorreductores/>>.

El motorreductor seleccionado es un Cotransa serie MR 2I 32 – 63A 6 de 90 W.

6.3.1.4 Eje. Se seleccionó acero inoxidable AISI 316 debido a sus propiedades anticorrosivas y se tomó un factor de seguridad de 2.5. Cuadro 17.

Cuadro 17. Propiedades de metales ferrosos

Material	Densidad, kg/m ³	Módulo de elasticidad, psi × 10 ⁶ (GPa)	Resistencia a la fluencia, ksi (MPa)	Resistencia a la rotura, ksi (MPa)	Ductilidad, %AL en 2 pulg	Razón de Poisson	Conductividad térmica, W/m-°C	Coefficiente de dilatación térmica, (°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶
Hierro	7 870	30 (207)	19 (130)	38 (260)	45	0.29	80	11.8
Hierro fundido gris	7 150	Variable	—	18 (125)	—	Variable	46	10.8
Hierro fundido nodular	7 120	24 (165)	40 (275)	60 (415)	18	0.28	33	11.8
Hierro fundido maleable	7 200–7 450	25 (172)	32 (220)	50 (345)	10	0.26	51	11.9
Acero al bajo carbono (AISI 1020)	7 860	30 (207)	43 (295)	57 (395)	37	0.30	52	11.7
Acero al medio carbono (1040)	7 850	30 (207)	51 (350)	75 (520)	30	0.30	52	11.3
Acero al alto carbono (AISI 1080)	7 840	30 (207)	55 (380)	89 (615)	25	0.30	48	11.0
Aceros inoxidables								
Tipo ferrítico 446	7 500	29 (200)	50 (345)	80 (552)	20	0.30	21	10.4
Tipo austenítico 316	8 000	28 (193)	30 (207)	80 (552)	60	0.30	16	16.0
Tipo martensítico 410	7 800	29 (200)	40 (275)	70 (483)	30	0.30	25	9.9

Fuente: HAMROCK, Bernard; JACOBSON, Bo y SCHMID, Steven. Elementos de máquinas. México, D.F.: McGraw-Hill, 2000. p. 899.

Figura 20. Factor de seguridad

Materiales dúctiles	
1.	$N = 1.25$ a 2.0 . El diseño de estructuras bajo cargas estáticas, para las que haya un alto grado de confianza en todos los datos del diseño.
2.	$N = 2.0$ a 2.5 . Diseño de elementos de máquina bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño. Es la que se suele emplear en la solución de los problemas de este libro.
3.	$N = 2.5$ a 4.0 . Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquina bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.
4.	$N = 4.0$ o más. Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con incertidumbre en cuanto a alguna combinación de cargas, propiedades del material, análisis de esfuerzos o el ambiente. El deseo de dar una seguridad adicional a componentes críticos puede justificar también el empleo de estos valores.

Fuente: MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4ª ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2006. p. 185.

En la ecuación 19 se calculó el torque del eje⁵³,

$$P = T * \omega \quad (19)$$
$$T = \frac{P}{\omega}$$
$$T = \frac{90 W}{8.378[\text{rad/s}]}$$
$$T = 10.74 [N - m]$$

En la ecuación 20 de teoría de la energía de distorsión se calculó el diámetro del eje⁵⁴,

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * N}{\pi * S_y} * \sqrt{M^2 + \frac{3}{4}T^2}} \quad (20)$$

⁵³ BEER, Ferdinand, *et al.* Mecánica de materiales. 5a ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2010. p. 165

⁵⁴ HAMROCK, Bernard; JACOBSON, Bo y SCHMID, Steven. Elementos de máquinas. México, D.F.: McGraw-Hill, 2000. p. 429.

Debido a que no existen fuerzas perpendiculares al eje que provoquen flexión la ecuación anterior se redujo como,

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * N}{\pi * S_y} * \sqrt{\frac{3}{4} T^2}} \quad (21)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 * 2.5}{\pi * 207 * 10^6} * \sqrt{\frac{3}{4} 10.74^2}}$$

$$D = 10.46 \text{ mm} = 1.046 \text{ cm}$$

D : Diámetro del eje

N : Factor de seguridad

S_y : Resistencia a la fluencia

T : Torque del eje

Se decidió escoger un diámetro de 2 cm para facilitar la selección del acople entre el motorreductor y el eje, como se verá en el ...apartado 6.3.1.6...

6.3.1.5 Perno Eje – turbina. Se escogió un tornillo de acero SAE de grado 2, Cuadro 18.

En la ecuación 22 se calculó la fuerza que debe soportar el perno.

Cuadro 18. Resistencia de pernos de acero

Grado SAE	Rango de los diámetros de la cresta, pulg	Resistencia a la rotura por tensión, S_u , ksi	Resistencia a la fluencia, S_y , ksi	Resistencia de prueba, S_p , ksi
1	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	60	36	33
2	$\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$	74	57	55
	$>\frac{3}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	60	36	33
4	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	115	100	65
5	$\frac{1}{4}$ -1	120	92	85
	>1 - $1\frac{1}{2}$	105	81	74
7	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	133	115	105
8	$\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$	150	130	120

Fuente: HAMROCK, Bernard; JACOBSON, Bo y SCHMID, Steven. Elementos de máquinas. México, D.F.: McGraw-Hill, 2000. p. 687

$$F = \frac{T}{r} \quad (22)$$

$$F = \frac{10.74 [N \cdot m]}{0.01 [m]}$$

$$F = 1074 [N]$$

F : Fuerza del perno

T : Torque ejercido en el perno

r : Radio del perno

En la ecuación 23 se calculó el esfuerzo permisible,

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_f}{N} \quad (23)$$

$$\sigma_{perm} = \frac{57 [ksi]}{2.5} = 22.8 \text{ ksi}$$

σ_{perm} : Esfuerzo permisible

σ_f : Resistencia a la fluencia

N : Factor de seguridad

En la ecuación 24 se calculó el esfuerzo cortante,

$$\begin{aligned}\tau_{perm} &= 0.57 * \sigma_{perm} & (24) \\ \tau_{perm} &= 0.57 * 22800[\text{psi}] * \frac{6894,7 [\text{Pa}]}{1 [\text{psi}]} \\ \tau_{perm} &= 89.6 [\text{MPa}]\end{aligned}$$

τ_{perm} : Esfuerzo cortante

En la ecuación 26 se calculó le diámetro del tornillo,

$$\begin{aligned}A &= \frac{F}{\tau_{perm}} & (25) \\ A &= \frac{1074}{89.6 * 10^6} \\ A &= 0.0000119 [m^2] \\ D &= \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} & (26)\end{aligned}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 0.0000119}{\pi}}$$

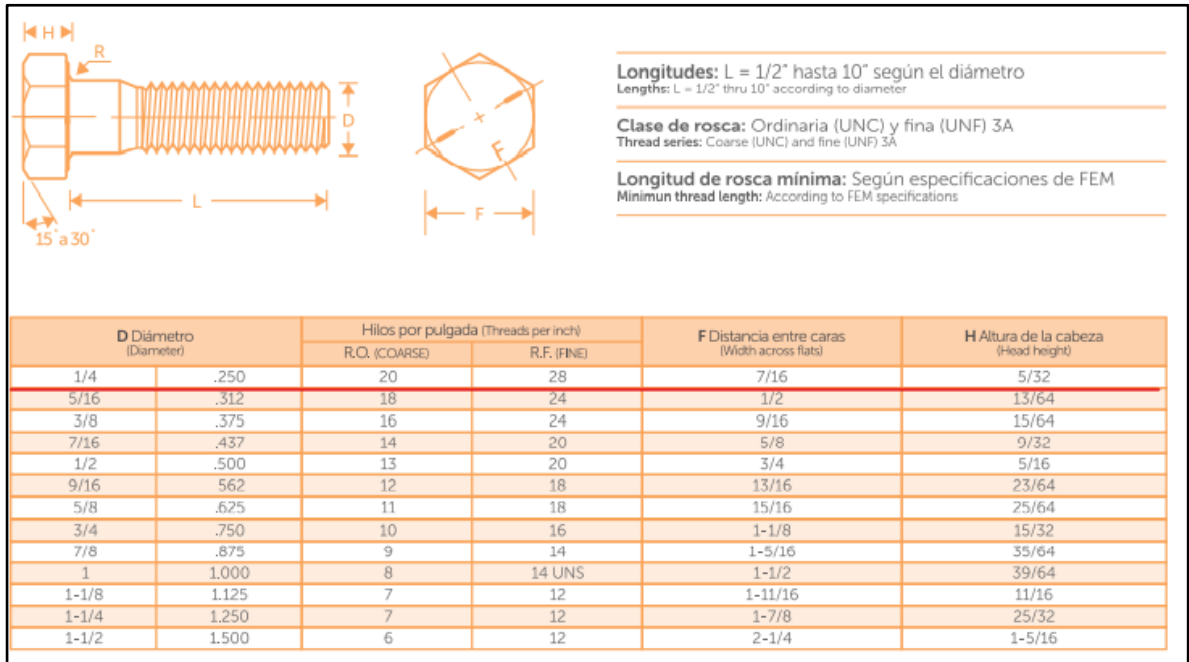
$$D = 3.9 [mm]$$

D : Diámetro de tornillo

A : Area

De acuerdo al cálculo anterior se seleccionó un tornillo de ¼” de diámetro SAE 2, Figura 21 y una tuerca correspondiente del mismo diámetro y material Figura 22.

Figura 21. Selección de tornillo

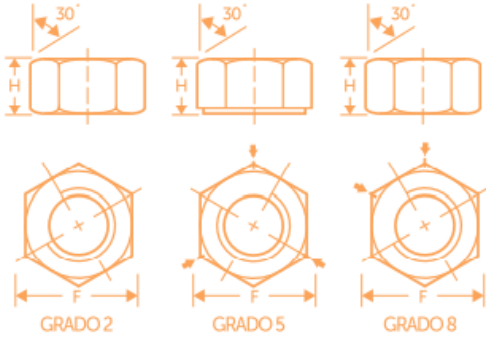


Fuente: FEM. Catálogo general. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. p. 12.

Disponibile en < <https://irp-cdn.multiscreensite.com/9864c0f3/files/uploaded/CATALOGO%20DE%20TORNILLOS%20FEM%20SAS.pdf>>.

Figura 22. Selección de tuerca

FICHA TÉCNICA



D Diámetro (Diameter)	Hilos por pulgada (Threads per inch)		F Distancia entre caras (Width across flats)	H Altura (Height)
	ROU(COARSE)	RE(FINE)		
1/4	.250	20 28	7/16	7/32
5/16	.312	18 24	1/2	17/64
3/8	.375	16 24	9/16	21/64
7/16	.437	14 20	11/16	3/8
1/2	.500	13 20	3/4	7/16
9/16	.562	12 18	7/8	31/64
5/8	.625	11 18	15/16	35/64
3/4	.750	10 16	1-1/8	41/64
7/8	.875	9 14	1-5/16	3/4
1	1.000	8 14 UNS	1-1/2	55/64
1-1/8	1.125	/ 12	1-11/16	51/52
1-1/4	1.250	7 12	1-7/8	1-1/16
1-1/2	1.500	6 12	2-1/4	1-9/32

Fuente: FEM. Catálogo general. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. p. 26.

Disponible en < [https://irp-](https://irp-cdn.multiscreensite.com/9864c0f3/files/uploaded/CATALOGO%20DE%20TORNILLOS%20FEM%20SAS.pdf)

[cdn.multiscreensite.com/9864c0f3/files/uploaded/CATALOGO%20DE%20TORNILLOS%20FEM%20SAS.pdf](https://irp-cdn.multiscreensite.com/9864c0f3/files/uploaded/CATALOGO%20DE%20TORNILLOS%20FEM%20SAS.pdf)>.

6.3.1.6 Acople Reductor – Eje. En la ecuación 27 se calculó el torque requerido para la selección del acople,

$$T_{req} = T_{eje} * FS \quad (27)$$

T_{req} : Torque requerido

T_{eje} : Torque del eje

FS : Factor de servicio

Se escogió un factor de servicio según el funcionamiento como se ve en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Factor de servicio para el acoplamiento

Principales Factores de Servicio	Motores Eléctricos	Máquinas de Vapor	Motores Diesel
Par constante Bombas Centrifugas Pequeños Convertidores Generadores de C.A. Pequeños Ventiladores	1,0	1,5	3,0
Par poco fluctuante Máquinas Herramientas Compresores de husillo Bombas de husillo Compresores de anillo líquido Secadores rotantes	1,5	2,0	3,0
Par fluctuante Bombas alternativas Mezcladores de baja viscosidad Grúas Cabrestantes	2,0	2,5	4,0
Par alto con excepcionales fluctuaciones Prensas Compresores alternativos Mezcladores de alta viscosidad Hélices de motores marinos	3,0	3,5	5,0

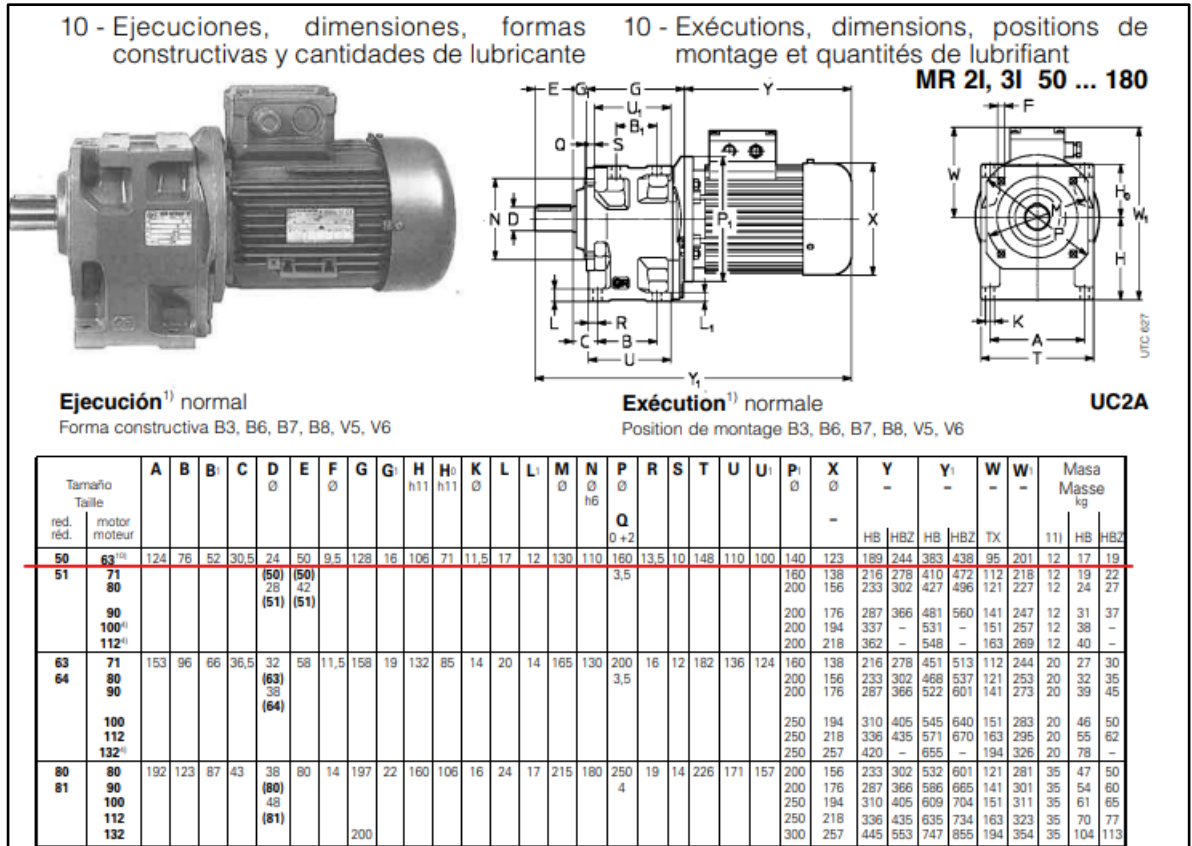
Fuente: COTRANSA. Acoplamiento de láminas. p. SF4. [Fecha de consulta: 16 marzo 2022]. Disponible en < <https://www.cotransa.net/descargas/descargas-accesorios-mecanicos/>>.

$$T_{req} = 10.74 [N - m] * 1.5$$

$$T_{req} = 16.11 [N - m]$$

De acuerdo con el tamaño del eje de salida del reductor se comprobó que no sea mayor al tamaño del cubo del acople. Figura 23.

Figura 23. Dimensiones del motorreductor



Fuente: COTRANSA. Reductores y motorreductores de engranajes y coaxial.

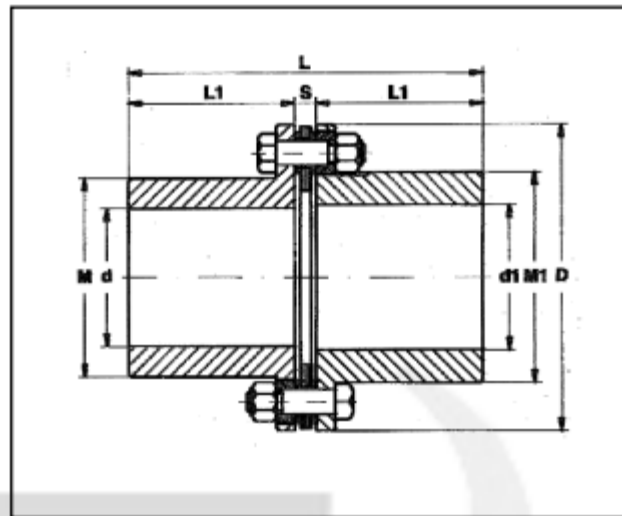
[Fecha de consulta: 16 marzo 2022]. p. 29. Disponible en

<<https://www.cotransa.net/descargas/descargas-phpcodreductores-y-motorreductores/>>.

De acuerdo con el torque requerido y el diámetro del eje de salida del reductor, se seleccionó un acople HBX tamaño 4.

Figura 24. Dimensiones estándar del acople

HBX-4



TAMAÑO	Potencia nominal transmisible a 1 r.p.m.		Par nominal transm Nm	D mm	HBSX L mm	HBX L mm	d : d1			L1 mm	S mm	L2 mm	L3 mm	M mm	M1 mm
	CV/n	KW/n					d min mm	d max mm	d1 max mm						
3-4	0,003	0,002	20	67	102	56	13	23	26	25	6	52	40	33	38
6-4	0,006	0,004	40	81	135	86,5	13	32	35	40	6,5	55	42	46	51
18-4	0,018	0,013	130	104	175	108,5	13	42	48	50	8,5	75	58	61	68
35-4	0,035	0,026	250	126	200	130	17	50	55	60	10	80	60	72	81
60-4	0,060	0,044	420	143	245	151,5	17	58	63	70	11,5	105	82	82	89
100-4	0,100	0,074	700	168	290	194,5	17	75	80	90	14,5	110	81	105	115
140-4	0,142	0,105	1000	194	340	216	20	85	94	100	16	140	108	118	132
180-4	0,185	0,136	1300	214	395	247	20	95	105	115	17	165	131	137	151
330-4	0,327	0,241	2300	246	430	279,5	20	110	120	130	19,5	170	131	156	170
700-4	0,697	0,513	4900	275	495	307,5	20	120	125	140	27,5	215	160	168	180

Fuente: COTRANSA. Acoplamientos de láminas. p. SF6. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. Disponible en < <https://www.cotransa.net/descargas/descargas-accesorios-mecanicos/>>.

6.3.2 Estructural. El tanque seleccionado está fabricado en plástico de tipo industrial, polietileno de alta densidad y alto peso molecular, el cual cuenta con una gran ventaja sobre el metal y es que es resistente a los ácidos, posee una densidad de entre 0.94 y 0.97 [$\frac{g}{cm^3}$], esto lo hace un material idóneo con el cual no se producirán fugas de gas debido a la presión o fisuras asociadas a golpes que puedan dañar el material durante el funcionamiento debido a su buena resistencia al impacto.

Las dimensiones de este tanque de 60 litros son de 33.5 cm de diámetro medio y 56 cm de altura, Figura 25.

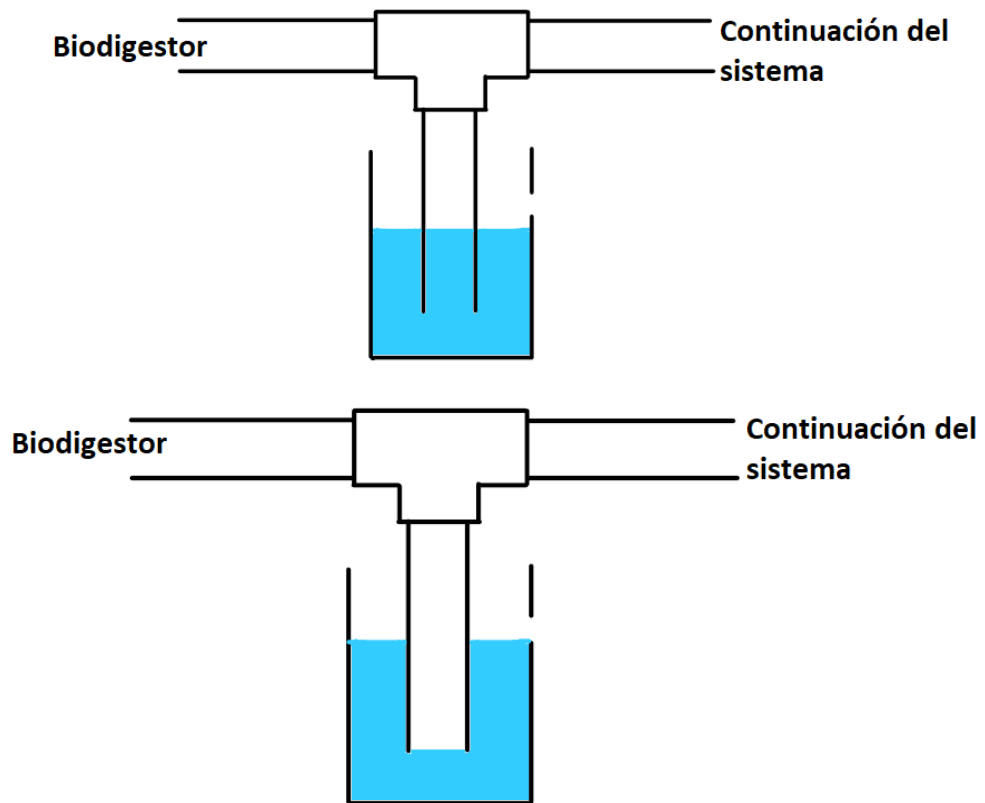
Figura 25. Dimensiones del tanque



Fuente: Elaboración propia

6.3.3 Control de presión. La válvula de seguridad consiste en una bifurcación del sistema de conducción del gas en tipo “T”, esta sección se sumerge en un recipiente que contiene agua hasta la altura deseada, Figura 26, de este modo la presión del gas producida en el sistema desplaza la columna de agua hasta la presión de taraje y escapa en forma de burbujas hacia el ambiente, el agua excedente se extrae por medio de un orificio taladrado en el recipiente a la altura correspondiente a la presión de taraje.

Figura 26. Válvula de seguridad



Fuente: Elaboración propia

En este proyecto se estableció una presión de taraje de 2 [cmH_2O] en la válvula del tanque debido al tamaño de este ya que su función es procesar la mayor cantidad

de materia, es por esto que el almacenamiento del gas se realizó de forma externa, no dentro del mismo digestor.

6.3.4 Conducción. Si no se utiliza tubería con un diámetro adecuado puede llegarse a obstruir el flujo del biogás debido al condensado de agua, sin embargo, estas recomendaciones se dan para sistemas de gran tamaño como se vio en el ...apartado 2.6.1...

Este sistema de conducción de gas estuvo conformado por tuberías de $\frac{3}{4}$ de pulgada de Policloruro de vinilo (PVC) debido a su excelente capacidad para soportar presiones bajas hasta muy altas (Cuadro 20), a su bajo costo, fácil adquisición y manejo.

Cuadro 20. Resistencia a la presión de tubos de pvc

Material	Presión Sostenida 1000 horas		Presión Mínima de Rotura 90 segundos	
	Mpa	psi	Mpa	psi
Tubería PVC RDE 9	7.25	1050	11.03	1600
Tubería PVC RDE 11	5.80	840	8.82	1250
Tubería PVC RDE 13.5	4.62	670	6.89	1000
Tubería PVC RDE 21	2.90	420	4.34	630
Tubería PVC RDE 26	2.34	340	3.45	500
Tubería PVC RDE 32.5	1.86	270	2.76	400
Tubería PVC RDE 41	1.95	210	2.17	315

Fuente: PAVCO. Manual técnico tubosistemas presión pvc. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. p. 6. Disponible en < <https://pavcowavin.com.co/manuales-tecnicos>>.

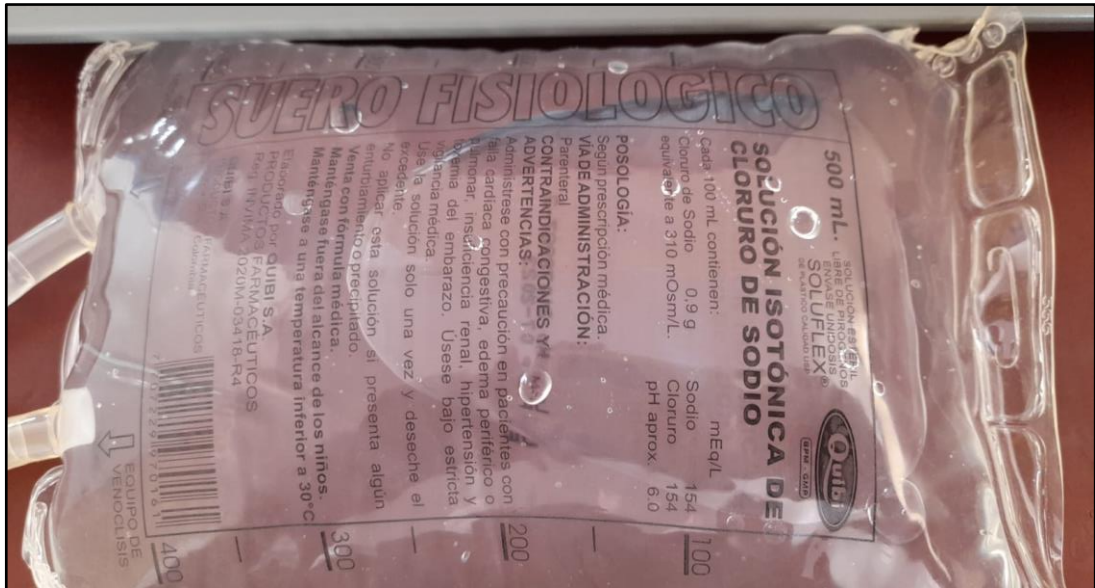
6.3.5 Almacenamiento del biogás. Con respecto al almacenamiento y debido a la importancia de medir y monitorear la producción de biogás diaria, fue necesario recurrir a una estrategia que permitiera un control y medición sencillos, en específico se recurrió a un equipo de venoclisis (Figura 27) y a una bolsa de suero fisiológico de 500 cm^3 (Figura 28) ya que están hechos de un material resistente tanto la manguera como la bolsa, por la cual a través de una jeringa se puede retirar el contenido de esta de una forma eficaz y sin comprometer su integridad o hermeticidad.

Figura 27. Equipo de venoclisis



Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Suero fisiológico



Fuente: Elaboración propia

6.3.6 Tratamiento de biogás. Cuando se produce el biogás dentro del digester este está compuesto por distintos gases que no contienen un valor útil en cuanto a energía y se pueden considerar como impurezas que se deben reducir en lo posible, principalmente el ácido sulfhídrico (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2), como se vio en los ...apartados 2.6.2 y 2.6.3...

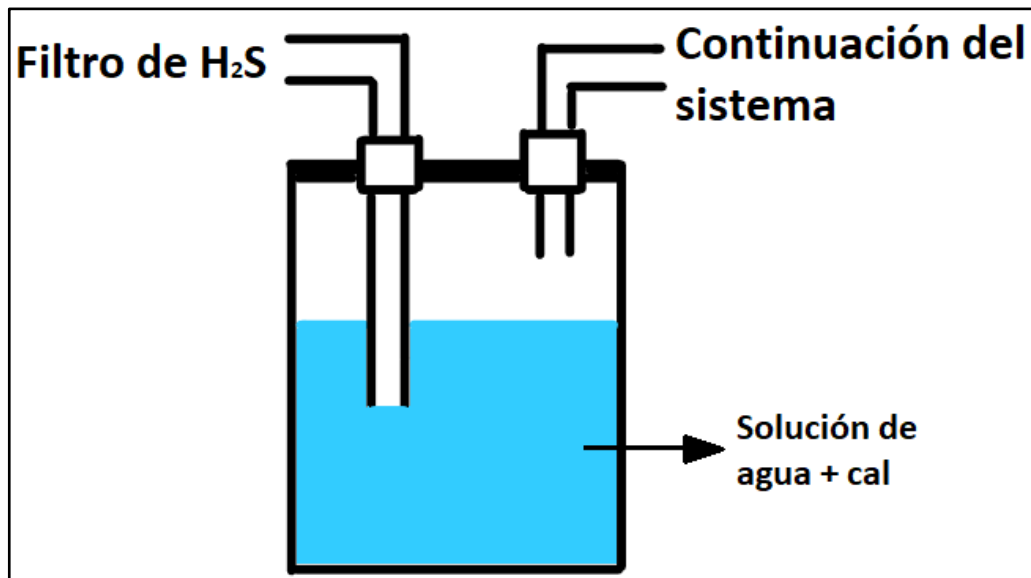
6.3.6.1 Filtro de dióxido de carbono. Para la eliminación del CO_2 se utilizó una solución alcalina formada por agua y óxido de calcio (cal). “La solución se prepara agregando dos gramos de cal por cada litro de agua”⁵⁵.

⁵⁵ TIRADO, Weimar. Diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema integral para el tratamiento y aprovechamiento del potencial energético y fertilizante de las excretas humanas y animales en una vivienda rural. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2015. p. 81.

La forma de implementar este filtro consiste en tomar un recipiente hermético y adaptarle dos mangueras una para la entrada del gas al filtro y otra para la salida de este.

Tal como se muestra en la Figura 29, la entrada debe sumergirse en la solución con la finalidad de que el gas entre en contacto con esta, vence la presión ejercida por la columna de agua que se estableció en $1\text{ cmH}_2\text{O}$ y salga en forma de burbuja para dirigirse hacia la salida que se debe instalar a una distancia prudente para que no pueda tocar la superficie de la solución y le permita al gas circular a través de ella hacia la siguiente sección del sistema.

Figura 29. Filtro de CO_2



Fuente: Elaboración propia

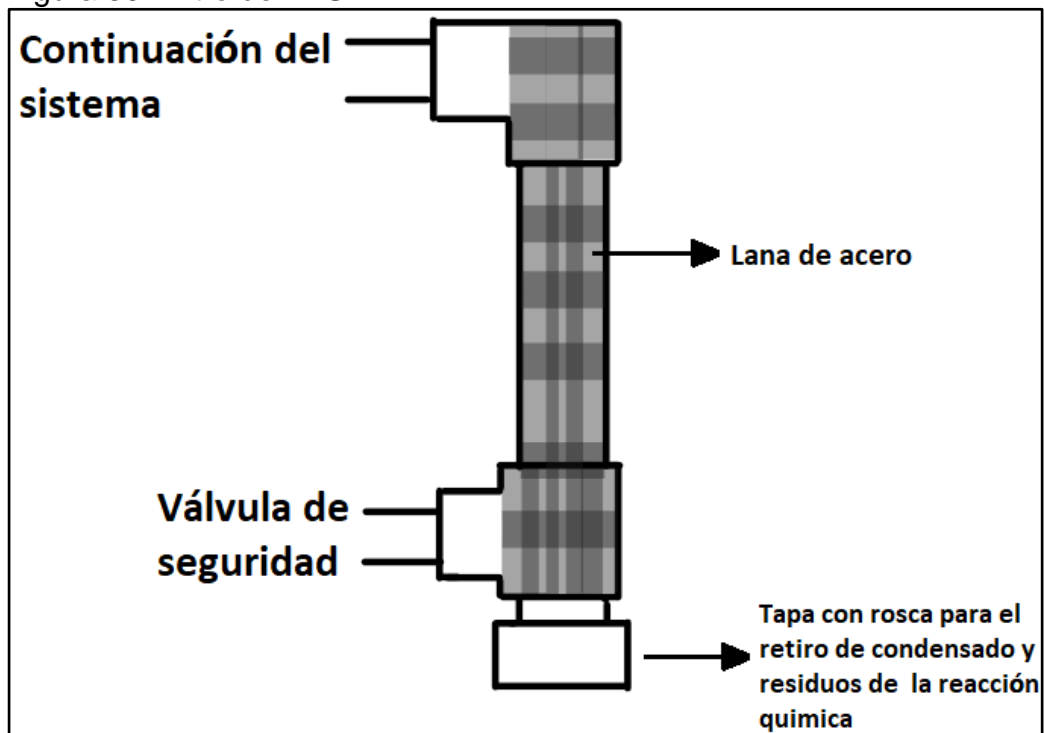
6.3.6.2 Filtro de sulfuro de hidrogeno. “El método más utilizado es hacer pasar el gas por un filtro que contiene hidróxido de hierro. El H_2S del gas se combina con el hierro formando sulfuro de hierro”⁵⁶.

En este caso se usó lana de acero de grado fino que es un material rico en hierro y que además es un material a través del cual puede circular el gas sin producir obstrucciones.

El filtro se compuso por una sección de tubo de PVC de un diámetro de 2 pulgadas dispuesto de forma vertical, el cual se rellenó con la lana de acero en su totalidad, en la parte inferior del tubo se agregó una zona cuya función es contener los residuos producto de la reacción química entre el H_2S y la lana de acero, además del condensado que pueda formarse en esta sección de la tubería, para después ser retirados al momento de hacer mantenimiento del sistema, como se ve en la Figura 30.

⁵⁶ HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, p. 40.

Figura 30. Filtro de H₂S





Fuente: Elaboración propia

7. CONSTRUCCION, ENSAMBLE Y ARRANQUE DEL SISTEMA



7.1 CONSTRUCCION DE SUBSISTEMAS

En el siguiente cuadro se describen los componentes del sistema y los materiales usados en su construcción.


Cuadro 21. Subsistemas y materiales

Componente	Materiales
<p data-bbox="337 751 850 842">Sifón para la extracción del biol y válvula para la extracción lodos</p>  	<ul data-bbox="899 785 1435 1444" style="list-style-type: none">• Soldadura para pvc• Limpiador para pvc• 2 válvula de bola pvc 1”• 2 unión roscada macho pvc 1”• 2 unión roscada hembra pvc 1”• 4 empaque• 1 codo PVC 1”• 40 cm de tubo pvc 1”

Cuadro 21. (Continuación)

<p style="text-align: center;">Válvulas de seguridad</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadura para pvc • Limpiador para pvc • 2 tee PVC ¾" • 2 abrazadera • 10 cm manguera transp. ¾" • Cinta teflón • 20 cm de tubo pvc ¾"
<p style="text-align: center;">Filtro de H2S</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadura para pvc • Limpiador para pvc • 2 tee pvc 2" • 2 reductor pvc 2" a 1" • 2 reductor pvc 1" a ¾" • 1 unión roscada macho pvc 2" • 1 unión roscada hembra pvc 2" • 1 tapón pvc 2" • 20 cm tubo pvc 2" • 1 paquete lana de acero

Cuadro 21. (Continuación)

<p style="text-align: center;">Filtro de CO2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadura para pvc • Limpiador para pvc • 2 codo pvc 3/4" • 2 unión roscada macho pvc 3/4" • 2 unión roscada hembra pvc 3/4" • 4 empaques • 1 abrazadera • 10 cm manguera transp. 3/4" • 20 cm tubo pvc 3/4" • 1 kg de cal • 1 frasco plástico transparente
<p style="text-align: center;">Almacenamiento de gas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadura para pvc • Limpiador para pvc • 10 cm tubo pvc 3/4" • 1 tapón pvc 3/4" • 1 equipo de venoclisis • 1 bolsa de suero fisiológico


Cuadro 21. (Continuación)

Alimentación de mezcla y salida de gas del biodigestor



- Soldadura para pvc
- Limpiador para pvc
- 1 unión roscada macho pvc 2"
- 1 unión roscada hembra pvc 2"
- 2 empaque 2"
- 2 metro tubo pvc 2"
- 1 tapón pvc 2"
- 1 unión roscada macho pvc 3/4"
- 1 unión roscada hembra pvc 3/4"
- 2 empaque 3/4"
- 20 cm tubo pvc 3/4"

Cuadro 21. (Continuación)

Válvulas de mantenimiento	
	<ul style="list-style-type: none">• Soldadura para pvc• Limpiador para pvc• 20 cm tubo pvc 3/4"• 3 válvula de bola pvc 3/4"

Fuente: Elaboración propia

7.2 ENSAMBLE

Terminado el proceso de construcción de cada subsistema se procedió a ensamblar el sistema completo, como se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Ensamble del sistema

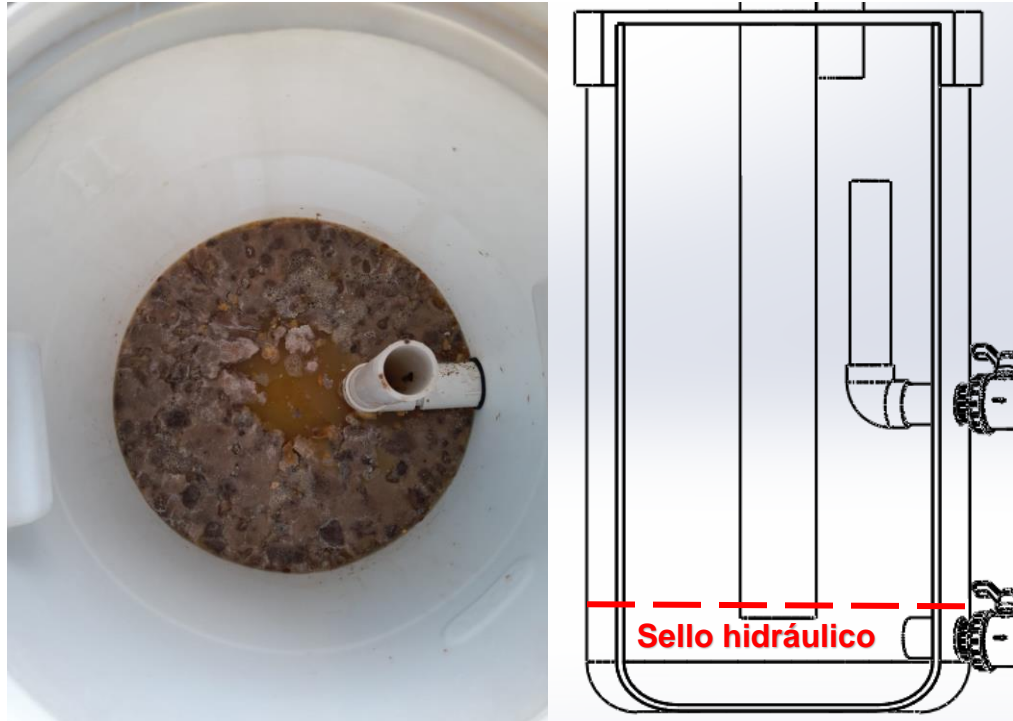


Fuente: Elaboración propia

7.3 ETAPA DE ARRANQUE

7.3.1 Primera carga. Con el fin de crear un sello hidráulico con el tubo alimentador del sistema, Figura 32, se procedió a hacer una primera carga con una cantidad de mezcla mayor a la diaria, en específico una cantidad correspondiente a 9 días.

Figura 32. Primera carga y sello hidráulico



Fuente: Elaboración propia

7.3.2 Sellamiento de fugas. Durante los primeros días después de la primera carga se hizo una inspección del sistema en busca de fugas debido al fuerte olor despedido del tanque, del filtro de H_2S y del filtro de CO_2 , estas fueron curadas usando un sellante adhesivo, Figura 33.

7.4 ALIMENTACION DEL SISTEMA

La carga diaria del sistema se llevó a cabo pesando las heces con la ayuda de una gramera digital, Figura 34, y posteriormente mezclándola con agua, según las cantidades previamente establecidas, dentro de un pequeño balde el cual fue medido y marcado a una altura correspondiente al volumen diario de 1234 cm^3 .

Figura 33. Sellamiento de fugas de gas



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Gramera digital y Recipiente de llenado



Fuente: Elaboración propia

7.5 MEDICION DEL BIOGAS

Para la extracción del gas primero se leyó la presión del sistema en la válvula de seguridad. El monitoreo diario del nivel de producción de gas realizó por medio de una jeringa de 20 cm^3 de volumen, Figura 35, la cual se introdujo dentro de la bolsa de suero fisiológico por una sus salidas, Figura 36.

Figura 35. Jeringa de 20 cm^3



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Entradas de la bolsa de suero fisiológico



Fuente: Elaboración propia

8. PRODUCCION

8.1 BIOGAS

Con respecto a la producción se observó que la mayor cantidad de biogás se obtuvo en las horas de la mañana desde las 9 am hasta avanzado el medio día, bajando la tasa durante la tarde y suspendiéndose prácticamente durante la noche y la madrugada.

Teniendo en cuenta que el tiempo de retención hidráulico determinado para este sistema fue de 32 días, correspondientes al régimen de inicio, se monitoreó la producción de biogás durante 8 días más correspondientes a un régimen constante del sistema.

En el siguiente cuadro se presentan los datos de volumen y presión a una temperatura media anual de 23°C de los 40 días en los que se monitoreó la producción de biogás en el sistema.

Cuadro 22. Producción de biogás durante 40 días

Dia	Volumen [cm^3]	Presión [cmH_2O]
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	-	-
7	250.1	0.7
8	240.6	1.3
9	352.9	0.8

Cuadro 22. (Continuación)

10	220	0.5
11	476.8	1.2
12	448.4	0.1
13	335.1	1.2
14	202.7	1.6
15	556.3	1.4
16	124.1	0.6
17	140	1
18	488	0.5
19	549	1.2
20	583.5	1.8
21	481.1	1.5
22	347.1	2
23	548.7	1.5
24	266	1.4
25	628.5	1.3
26	467.6	1.5
27	517.4	1
28	584.7	1.2
29	357.2	0.5
30	568.9	1.6
31	324.4	0
32	354.8	0.5
33	362.7	0.8
34	500	2
35	567.6	2
36	543.8	0.9
37	343.4	1.5

Cuadro 22. (Continuación)

38	484.5	0.6
39	429	1.4
40	545.2	1.9

Fuente: Elaboración propia

Transcurridos 40 días se tomó una muestra de biogás de la bolsa de almacenaje con la ayuda de una bolsa para muestreo de gas y se le realizó un análisis cromatográfico arrojando los datos mostrados en el Cuadro 23.

El informe completo se puede consultar en el Anexo C.

Cuadro 23. Resultado del análisis cromatográfico

Muestra: CG_SAGM040222	Porcentaje (molar)
Metano	35,83±0,23
Dióxido de carbono	64,17±0,23
Sulfuro de hidrógeno*	No detectado

Fuente: Análisis de laboratorio Anexo C

Estos resultados se analizarán con detenimiento en el capítulo 9.

8.2 FERTILIZANTE

La producción de fertilizante se produjo a partir del día 32 después del arranque del sistema y durante los días siguientes hasta el día 40.

Debido a que la forma de funcionamiento del digester se da según el modelo semicontinuo, necesariamente para retirar el fertilizante primero se debe ingresar a este una carga de mezcla del mismo volumen de fertilizante que se desea retirar, esto con el fin de no extraer del biodigestor materia que aún no ha cumplido su tiempo de retención hidráulico y por tanto no ha sido degradado lo suficiente. En este particular la carga diaria de mezcla corresponde a 1234 cm^3 por lo que la cantidad de fertilizante retirado fue del mismo volumen.

Figura 37. Válvulas de descarga y extracción de lodos



Fuente: Elaboración propia

Completado el tiempo de retención hidráulico establecido se extrajo la primera carga de fertilizante y se llevó una muestra a laboratorio con el fin de realizar un análisis en busca de las cantidades de nitrógeno, potasio y fosforo obtenidas.

En el Cuadro 24 se muestran los resultados obtenidos, en el Anexo B se puede leer el informe completo.

Cuadro 24. Resultado del análisis NKP

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Nitrógeno Total (mg N/L)	378,66	Digestión- Destilación- Titulación Kjeldahl
Potasio (mg K/L)	86,35	Absorción Atómica
Fósforo Total (mg P/L)	38,93	Espectrofotométrica

Fuente: Análisis de laboratorio Anexo B

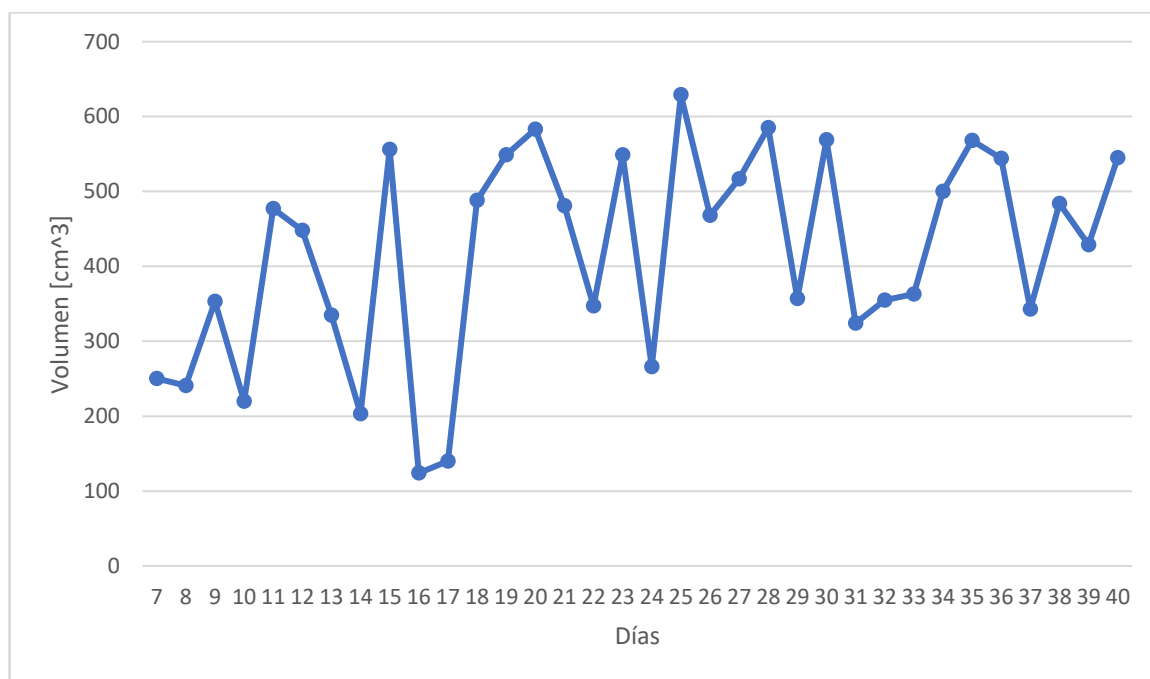
En el capítulo a continuación se realiza un análisis completo de los resultados conseguidos.

9. ANALISIS DE RESULTADOS

9.1 BIOGAS

En la Figura 38 se muestra el comportamiento de la producción de biogás durante los 40 días de monitoreo del sistema con los datos tomados del Cuadro 22.

Figura 38. Comportamiento de la producción de biogás



Fuente: Elaboración propia

Debido a que al sistema no se le adaptó una chaqueta térmica, este fue totalmente dependiente de la temperatura ambiente, de esta forma, los picos bajos corresponden a días lluviosos y nublados en los que la producción de gas fue muy reducida en comparación a los días soleados en los que la producción fue sustancialmente mejor, estas dos condiciones se pueden apreciar mejor si se observa la Figura 38 en la línea horizontal donde marca los 400 [cm³] que divide los días menos productivos y los días soleados más productivos.

En base a los resultados de biogás obtenidos en el Cuadro 22 se procede a calcular el volumen diario promedio de gas producido exceptuando los días iniciales en los cuales no se tiene registro debido a las fallas presentadas al inicio de la etapa de arranque.

Volumen diario promedio	417.356 [cm^3]
-------------------------	--------------------

En el siguiente cuadro se compara la composición del biogás obtenido con información tomada de la literatura en el Cuadro 1.

Cuadro 25. Comparación de composición del biogás

Compuesto		Análisis cromatográfico [%]	Datos tomados de literatura (Composición aproximada) [%]
Metano	CH_4	35.83	60 – 70
Dióxido de carbono	CO_2	64.17	30 – 40
Hidrogeno	H_2	-	1
Nitrógeno	N_2	-	0.5
Monóxido de carbono	CO	-	0.1
Oxigeno	O_2	-	0.1
Sulfuro de hidrogeno	H_2S	No detectado	0.1

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a estos datos se puede apreciar una marcada diferencia entre los resultados del análisis cromatográfico y los datos tomados de otras fuentes, esto se

debe principalmente a que estos últimos son consecuencia de un proceso llevado a cabo en laboratorio con condiciones completamente controladas para producir un biogás con las mejores cualidades posibles, tales condiciones pueden ser la naturaleza de materia prima, temperatura, tiempo de retención hidráulico, pH, relación C/N, contenido de sólidos, inoculantes, inhibidores, y agitación tal como se mencionó en el ...apartado 2.4... en comparación, para la realización de este trabajo y debido a las limitaciones de presupuesto, el control implementado fue reducido.

En el caso de los compuestos no detectados, con el equipo utilizado solo es posible detectar metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno por lo cual no fue posible conocer la cantidad de H_2 , N_2 , CO y O_2 , sin embargo se debe aclarar que el equipo utilizado posee un límite mínimo para la detección de componentes, en específico para la detección de sulfuro de hidrogeno, un límite inferior de 500 ppm, el hecho de que este no haya sido detectado puede deberse a que la muestra no fue tomada directamente a la salida del tanque digestor sino desde la bolsa almacenadora en donde el gas ya ha pasado por el filtro instalado para el H_2S , asimismo se comprobó que el gas emanado a través de la válvula de seguridad del tanque poseía un fuerte olor a huevo descompuesto, olor característico del sulfuro de hidrogeno, en contraparte el olor del gas en la bolsa almacenadora fue muy leve y sin rastro de olor a huevo descompuesto.

9.2 FERTILIZANTE

En el Cuadro 26 se presentan los resultados obtenidos en el análisis NPK con datos tomados de otros trabajos⁵⁷ con el fin de comparar las cantidades totales de nitrógeno, potasio y fosforo.

Cuadro 26. Comparación de composición del bioabono

Componente (cantidad total)	Análisis NPK [mg/l]	Datos tomados de bibliografía [mg/l]
Nitrógeno	378,66	439.53
Potasio	86.35	203.76
Fósforo	38.93	749.26

Fuente: Elaboración propia

Como ya se mencionó en el ...apartado 2.2... la cantidad de estos nutrientes varía según la materia a utilizar, es el caso del trabajo contrastado en el cual se usa como materia prima una mezcla de heces bovinas que son los predilectos para la producción de fertilizante debido a su alimentación rica en nutrientes.

La diferencia más apreciable se presenta en la concentración de potasio y fosforo, siendo mucho menor en el fertilizante de caninos que en el de bovinos, siendo el potasio un 42.38% y el fosforo un 5.19% de la cantidad obtenida en el fertilizante bovino.

⁵⁷ TIRADO, Weimar. Diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema integral para el tratamiento y aprovechamiento del potencial energético y fertilizante de las excretas humanas y animales en una vivienda rural. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2015. p. 148.

Sin embargo, en cuanto al nitrógeno se aprecia que la diferencia no es muy grande por lo cual resulta ser una fuente de nitrógeno para la absorción por parte de los cultivos.

9.3 ESTIMACION DE PRODUCCION

Con estos datos se procede a estimar el potencial de volumen de biogás y de fertilizante que se puede producir a partir de las heces diariamente.

Cuadro 27. Potencial de producción

Material	$[cm^3/g]$	$[m^3/kg]$
Biogás	3.338	0.003338

Material	$[cm^3/g]$ ó $[l/kg]$
BIOL	9.872

Fuente: Elaboración propia

10. PRESUPUESTO

En el siguiente cuadro se listan todos los materiales, insumos y servicios empleados en este proyecto, así como el precio de cada uno de ellos.

Cuadro 28. Presupuesto

Materiales	Valor unidad [COP]	Cantidad	Costo [COP]
Generales			
Soldadura pvc	2000 - frasco	3	6000
Limpiador pvc	2700 - frasco	2	5400
Cinta Teflón industrial	2500 - rollo	2	5000
Tubo pvc 2"	5000 - m	1.5	7500
Tubo pvc 1"	4000 - m	1	4000
Tubo pvc ¾"	2300 - m	1.5	3500
Manguera transp. ¾"	4000 – m	0.3	1200
Válvula de bola 1"	10000	2	20000
Válvula de bola ¾"	4000	3	12000
Unión roscada macho 2"	3500	2	7000
Unión roscada hembra 2"	3500	2	7000
Unión roscada macho 1"	1500	2	3000
Unión roscada hembra 1"	1500	2	3000
Unión roscada macho ¾"	1000	3	3000
Unión roscada hembra ¾"	1000	3	3000
Empaque 2"	600	2	1200
Empaque 1"	500	4	2000
Empaque ¾"	500	6	3000
Codo 1"	1500	1	1500

Cuadro 28. (Continuación)

Codo $\frac{3}{4}$ "	1000	3	3000
Tee 2"	4500	3	9000
Tee $\frac{3}{4}$ "	1000	2	2000
Abrazadera	2000	3	6000
Reductor 2" a 1"	3000	2	6000
Reductor 1" a $\frac{3}{4}$ "	1800	2	3600
Tapón 2"	2000	2	4000
Tapón $\frac{3}{4}$ "	1000	1	1000
Lana de acero (Bon bril)	3000 - paquete	1	3000
Cal	1500 - kilogramo	1	1500
Equipo macrogoteo	2700	1	2700
Bolsa de suero fisiológico	2400	1	2400
Subtotal			145500
Laboratorio			
Análisis NPK	80000	1	80000
Análisis de cromatografía	75000	1	75000
Subtotal			155000
Total			300500

Fuente: Elaboración propia

11. CONCLUSIONES

Se logró el diseño, construcción y puesta en marcha el tanque biodigestor, que puede procesar de forma exitosa la cantidad total de mezcla introducida durante los 32 días de tiempo de retención hidráulico sin presentar fallas como fugas, grietas o escapes de mezcla.

Se construyó cada uno de los subsistemas de forma idónea para el tratamiento y conducción del biogás conformado por las válvulas de seguridad, el filtro de CO_2 , el filtro de H_2S y el almacenamiento.

Se obtuvieron los resultados del laboratorio y se estableció la composición del biogás por medio de un análisis cromatográfico y del biol con un análisis NPK de forma satisfactoria.

Los resultados arrojados por los análisis mostraron una composición de biogás inferior comparada a los resultados entregados por otros autores, en específico se observa mayor cantidad de CO_2 un gas inaprovechable, así como una baja concentración de metano, por lo tanto, se puede afirmar que la biomasa no es buena alternativa para producir biogás a pequeña escala.

La constitución del biol producido posee bajas cantidades de los elementos que se buscaron, aun salvando las diferencias de la biomasa con la usada por otros autores las concentraciones continúan siendo bajas por lo que su uso como fertilizante será reducido.

La limitada producción de metano puede deberse a factores como la constitución propia de la biomasa, otros factores técnicos como la incapacidad de incorporación de chaquetas térmicas, y otros medioambientales como la aleatoriedad del clima, factores que estuvieron más allá del alcance de este trabajo.

El nivel de producción de biogás promedio y fertilizante es de $3.338 \left[\frac{cm^3}{g} \right]$ y de $9.872 \left[\frac{cm^3}{g} \right]$ respectivamente, con lo cual se puede recrear un sistema una escala mucho mayor para obtener cantidades importantes de estos productos con la biomasa obtenida de caninos.

BIBLIOGRAFÍA

ABARZA, Fabian. Efecto de las heces caninas sobre la producción de biogás. Trabajo de grado Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Santiago de Chile. Universidad de Chile, 2014. 82 p.

ACOSTA, Melvin y PASQUALINO, Jorgelina. Potencial de uso de biogás en Colombia. *Teknos*. 2014, vol. 14, p. 27-33.

ALCALDIA DE PIEDECUESTA. Plan de Desarrollo 2020-2023. [Fecha de consulta:17 marzo 2022]. Disponible en <<https://www.obsgestioneducativa.com/download/plan-de-desarrollo-municipal-piedecuesta-2020-2023/>> .

AQUA LIMPIA ENGINEERING. Reducción de condensados. [Sitio web]. [Fecha de consulta:17 marzo 2022]. Disponible en <<https://www.aqualimpia.com/>>.

ARCE, Jorge. Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Guayaquil. Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, 2011. 104 p.

ARRIETA, Winston. Diseño de un biodigestor domestico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico – Eléctrico. Piura. Universidad de Piura. 2016. 251 p.

BAYONA, Carlos y CORTES, Brayan. Producción de biogás a partir de estiércol porcino a escala piloto: caso de estudio biorreactor continuo tubular plástico (BCTP) finca Tosoly. Trabajo de grado Ingeniero químico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2015. 53 p.

BEER, Ferdinand, *et al.* Mecánica de materiales. 5a ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2010. 788 p.

CAJAMARCA, Diego. Procedimientos para la elaboración de abonos orgánicos. Cuenca: Universidad de Cuenca, 2012. 118 p.

CARDENAS, Ronald y FUENTES, Edwar. Efecto de la agitación sobre el proceso de producción de biogás a partir del bagazo de fique a diferentes escalas. Trabajo de grado Ingeniero químico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2011. 44 p.

COTRANSA. Acoplamientos de láminas. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. Disponible en < <https://www.cotransa.net/descargas/descargas-accesorios-mecanicos/>>.

COTRANSA. Reductores y motorreductores de engranajes y coaxial. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. Disponible en <<https://www.cotransa.net/descargas/descargas-phpcodreductores-y-motorreductores/>>.

COUPER, James, *et al.* Mixing and Agitation. En: Chemical Process Equipment. 3a ed. Butterworth-Heinemann, 2012. 819 p. 277-327.

CRISTANCHO, Diego. Estudio del efecto del tiempo de retención hidráulico, la temperatura y el contenido en carga orgánica en el proceso de digestión anaeróbica en dos fases de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado Magister en Ingeniería Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2005. 126 p.

DABIRI, Soroush, *et al.* On the effect of biogas bubbles in anaerobic digester mixing. *Biochemical Engineering Journal*. 2021, vol. 173, 11 p.

DIAZ, Sonia y TORRES, Harold. Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural. Bogotá. Universidad Católica de Colombia. 2019. 143 p.

DIRECCION DE SUSTENTABILIDAD, MEDIO AMBIENTE Y CAMBIO CLIMATICO. Manual de biogás, conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sub-productos. Buenos Aires. 45 p.

FEM. Catálogo general. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. Disponible en <<https://irp-cdn.multiscreensite.com/9864c0f3/files/uploaded/CATALOGO%20DE%20TORNILLOS%20FEM%20SAS.pdf>>.

FOX, Robert y MCDONALD, Alan. Introducción a la mecánica de fluidos. 4ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 1995. 916 p.

GAMBOA, Ricardo; CARRILLO, José y FLORES, Emmanuel. Design and construction of a one-stage gas gun for high velocity impact tests. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 2015, vol. XVI, nro. 2, p. 186-195.

GARCIA, Luis, *et al.* Diseño de un biodigestor de flujo inducido con el uso de corrientes térmicas. *Universidad de America*. 2011, vol. 4, nro. 2, p. 31-36.

GOBIERNO DE SANTA FE. Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala. [Sitio web]. Santa Fe. [Fecha de consulta:17 marzo 2022]. Disponible en <<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 >.

GOMEZ, Cesar y MEDINA, Henson. Diseño mecánico y construcción de un biorreactor para la fermentación de glucosa hasta n-butanol. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2014. 131 p.

GUARDADO, Chacón. Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. La Habana: Editorial Cubasolar, 2007. 67 p.

HAMROCK, Bernard; JACOBSON, Bo y SCHMID, Steven. Elementos de máquinas. México, D.F.: McGraw-Hill, 2000. 926 p.

HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalacion. La Paz: Cooperacion Tecnica Alemana – GTZ, 2008. 81 p.

HILBERT, Jorge. Manual para la Producción de Biogás. Castelar: Instituto de Ingeniería Rural, 54 p.

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Biogás y bioabono aplicaciones. 1985. 55 p.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACION Y AHORRO DE LA ENERGIA. Biomasa, digestores anaerobios. Madrid: IDAE, 2007. 43 p.

LOPEZ, Wilmer y ORDUZ, Corredor. Diseño y fabricación de un tanque digestor para la producción de compost mediante el aprovechamiento de residuos orgánicos sólidos. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2011. 178 p.

LORENZO, Acosta y OBAYA, Ma Cristina. La digestión anaerobia, Aspectos teóricos Parte 1. ICIDCA. 2005, vol. XXXIX, nro. 1, p. 35-48.

MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1991. 1112 p.

MICHELAN, Rogéiro, *et al.* Effect of impeller type and mechanical agitation on the mass transfer and power consumption aspects of ASBR operation treating synthetic wastewater. *Journal of environmental management*. 2009, vol. 90, p. 1358-1364.

MINISTERIO DE ENERGIA, *et al.* Manual del Biogás. Santiago de Chile: Chile: Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables, 2011. 120 p.

MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. 4ª ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2006. 872 p.

OLAYA, Yeison y GONZALEZ, Luis. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, 2009. 31 p.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA AGRICULTURA. Guía teórico-practica sobre el biogás y los biodigestores. Buenos Aires, 2019. 87 p.

PADILLA, Alejandro y RIVERO, José. Producción de biogás y compost a partir de residuos orgánicos recolectados del complejo arqueológico Huaca de la Luna. *Ciencia y Tecnología*. 2016, nro. 1, p. 30-43.

PAVCO. Manual técnico tubosistemas presión pvc. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. Disponible en < <https://pavcowavin.com.co/manuales-tecnicos>>.

PEREZ, Javier. Estudio y Diseño de un Biodigestor para Aplicación en Pequeños Ganaderos y Lecheros. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Santiago de Chile. Universidad de Chile, 2010. 77 p.

PONANGRONG, Pathompong y CHISUWAN, Anusorn. An investigation of performance of a horizontal agitator gasification reactor. *Energy Procedia*. Junio, 2019, vol. 157, p. 684–690.

RINCON, Julian. Diseño de una maquina mezcladora, automática, de materias primarias para la elaboración de jabones liquidos, suavizantes y desengrasantes industriales, para la empresa Quimicos Zorel. Trabajo de grado Ingeniero Mecanico. Bogotá. Fundacion Universidad de America, 2017. 155 p.

RIVAS, Olga; FAITH, Margie y GUILLÉN, Rossy. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en marcha*. 2010, vol. 23, nro. 1, p. 39-46.

SIERRA, Andrea. Obtención de biogás a partir de gallinaza producida en la granja Bellavista-Horizontes a servicio de Incubadora Santander S.A. Trabajo de grado Magister en Química Ambiental. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2013. 91 p.

SOLUCIONES PRACTICAS ITDG. Ficha Técnica Biodigestores. [Fecha de consulta:17 marzo 2022]. Disponible en <<https://www.yumpu.com/es/document/view/15352810/biodigestores-soluciones-practicas>>.

THE ENVIRONMENT, HEALTH AND SAFETY DIVISION GEORGIA TECH RESEARCH INSTITUTE. Biogas Utilization Handbook. Atlanta. 133 p.

TIRADO, Weimar. Diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema integral para el tratamiento y aprovechamiento del potencial energético y fertilizante de las excretas humanas y animales en una vivienda rural. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2015. 219 p.

TRANSTECNO. Motorreductores a engranajes cilíndricos. [Fecha de consulta:16 marzo 2022]. Disponible en <<https://www.transtecno.com/mx/motorreductores-mexico/ca-alu/motorreductores-engranes-cilindricos-nema/>>.

VILLALOBOS, Giovanna. Co-digestión anaeróbica de estiércol bovino y sobrantes alimenticios de restaurant en un reactor de tanque agitado. Trabajo de grado Ingeniera Química. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2017. 51 p.

WARD, Alastair, et al. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*. 2008, vol. 99, p. 7929-7940.

WILEY-INTERSCIENCE. Handbook of Industrial Mixing Science and Practice. New Jersey: Merck & Co., 2004. 1385 p.

X, Gómez, *et al.* Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable energy*. 2006, vol. 31, p. 2018-2024.

ZAMBRANO, Guy y GORDON, Raúl. Diseño y análisis de un sistema para la producción de abono orgánico a través de la transformación mecánica de la

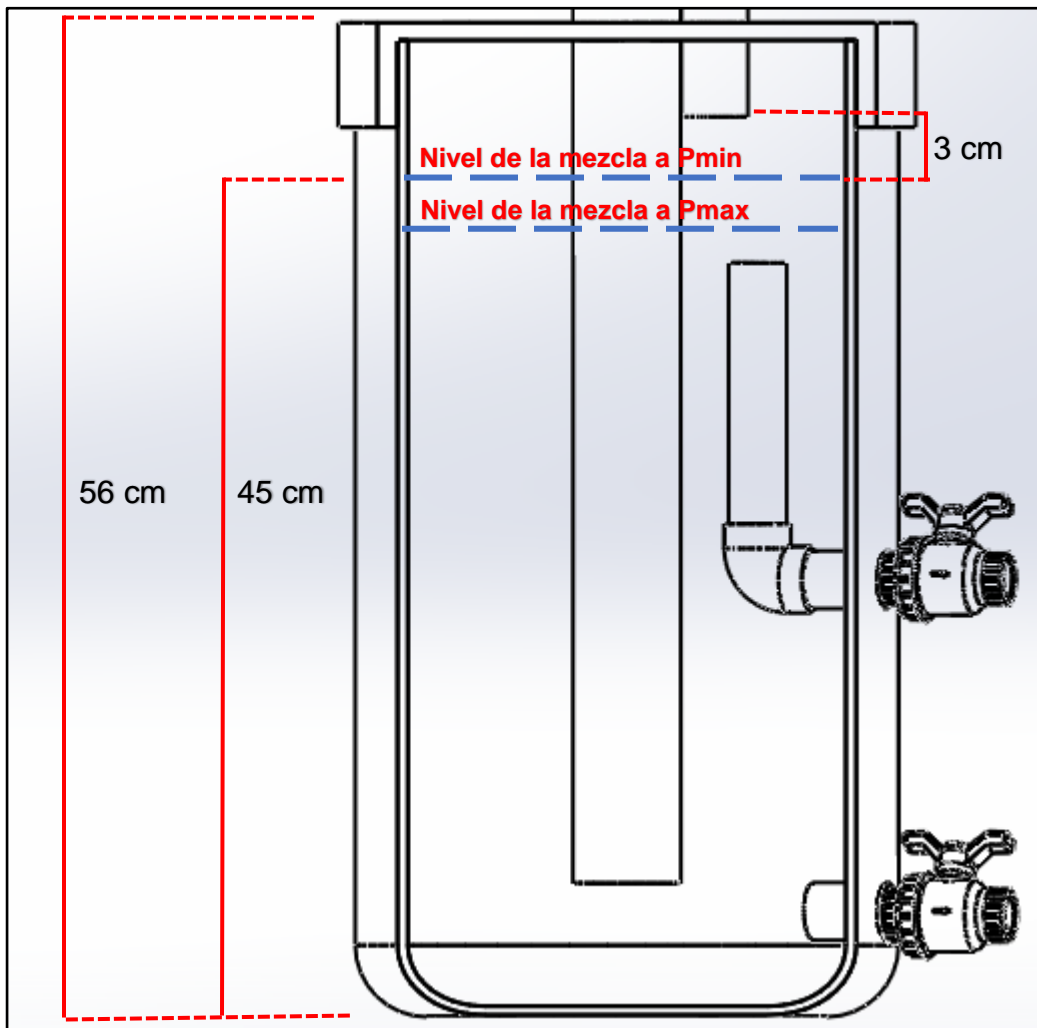
biomasa en una parcela en la Mesa de los Santos. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, 2019. 125 p.

ANEXOS

Anexo A. Recalculo del volumen

Debido a la configuración del tanque, el tubo de salida de gas no se puede obstruir en ningún momento por lo tanto debe dejarse un espacio de margen, se estableció un espacio de 3 cm como se observa en la Figura 39.

Figura 39. Dimensiones del nivel de mezcla



Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, las nuevas dimensiones de trabajo fueron:

$$D = 33.5 \text{ cm}$$

$$h = 45 \text{ cm}$$

Se calculó la altura diaria de mezcla a ingresar al tanque como,

$$h_0 = \frac{h}{T_r} = \frac{45}{32} = 1.4 \frac{\text{cm}}{\text{dia}} \quad (28)$$

Con esta altura se calculó el volumen diario,

$$V_d = \frac{\pi}{4} * D^2 * h_0 \quad (29)$$

$$V_d = \frac{\pi}{4} * 33.5^2 * 1.4$$

$$V_d = 1234 \text{ cm}^3$$

Como la concentración de la mezcla debe ser del 10% entonces,

$$\frac{m_h}{m_a + m_h} = 0,1 \quad (30)$$

Para el volumen diario se estableció que,

$$V_d = V_a + V_h \quad (31)$$

Reemplazando la ecuación de la densidad en la ecuación anterior,

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$V_d = \frac{m_a}{\rho_a} + \frac{m_h}{\rho_h}$$

Se reemplazó la ecuación 30 en la ecuación anterior y se obtuvo,

$$m_h = \frac{V_d}{\left(\frac{9}{\rho_a} + \frac{1}{\rho_h}\right)}$$

$$m_h = \frac{1234}{\left(\frac{9}{0.997} + \frac{1}{1.168}\right)}$$

$$m_h = 124.8 \text{ g} \approx 125 \text{ g}$$

Reemplazando este valor en la ecuación 30 se obtuvo el valor de la masa de agua,

$$\frac{m_h}{m_a + m_h} = 0,1$$

$$m_a = 9 * m_h$$

$$m_a = 9 * 124.8$$

$$m_a = 1123.2$$

Una vez sabido el volumen de mezcla diaria que se debe ingresar al tanque, se calculó la altura equivalente al balde en el que se prepara la mezcla. Este recipiente se definió en el ...apartado 7.4... con un diámetro $D=17$ cm.



$$V_b = \frac{\pi}{4} * D^2 * h_b$$

$$h_b = \frac{4 * V_b}{\pi * D^2}$$

$$h_b = \frac{4 * 1234}{\pi * 17^2}$$

$$h_b = 5.4 \text{ cm}$$

Anexo B. Análisis NKP

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 09	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2020-10-02	
		Página 1 de 2	



Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 0400 de 2019, en los parámetros Alcalinidad, Cloruro, Dureza, Nitrato, Nitrato, Fósforo, Hierro Total, DBO₅, DQO, SST, SAAM, Fenoles, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas*



Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano*



Certificación ICA para el control de calidad de fertilizantes de uso agrícola, mediante Resolución N. 72137 del 27 de julio de 2020, en los parámetros de: Azufre, Boro, Silicio Soluble, Cadmio, Cobre, Cromo, Hierro, Magnesio, Manganeso, Níquel, Plomo, Sodio y Zinc por Absorción Atómica, CIC, Capacidad de Retención por agua, Carbonatos por volumen, Carbono Orgánico Oxidable total, Cerasas, conductividad, Contenido de sólidos, pH, P, K, N, As, Hg, Humedad

Informe de resultados No.	I-22-001	Fecha de emisión:	Enero 17 de 2022
Cliente:	SERGIO ANDRÉS GÓMEZ MATAJIRA		
Dirección del cliente:	Escuela Ingeniería Mecánica- UIS		
Solicitud de servicio No.	22-002	No. de muestras:	01
Fecha de recepción de las muestras:	Enero 13 de 2021		
Muestras recibidas por:	Natalia Gallo C		
Fecha de análisis:	Enero 14 de 2022- Enero 17 de 2022		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO



Codificación de la Muestra:	22-002-01	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	No. 1		
Matriz de la muestra:	Fertilizante Líquido		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	Guatiguará (Piedecuesta) / Vereda La Vega- Parcela Brisas del Río		
Fecha del muestreo:	Enero 12 de 2022		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Nitrógeno Total (mg N/L)	378,66	Digestión- Destilación- Titulación Kjeldahl
Potasio (mg K/L)	86,35	Absorción Atómica
Fósforo Total (mg P/L)	38,93	Espectrofotométrica

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009-3182061814
 Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com, labquimco@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 09	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2020/10/02	
		Página 2 de 2	

Informe de resultados No. I-22-001 Solicitud de servicio No. 22-002

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado Cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.




Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. M.Sc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Ing. Natalia Gallo C.

Anexo C. Análisis Cromatográfico

 	INFORME DE RESULTADOS	FIR1-2021	
		Versión 1	
		Página 1 de 2	

Bucaramanga, 04 de febrero de 2022

Solicitante: Sergio Andrés Gómez Matajira

Email: andres.matajira@hotmail.com

Empresa: -

Teléfono: 320981 2944

Dirección:

Ciudad:


Fecha de muestreo: No especifica	Fecha de recepción: -
Características de la muestra: Biogás	Fecha de análisis: -
No. De análisis:	CG_SAGM040222
Lugar de muestreo:	No especificado
Responsable:	Sergio Andrés Gómez
Finca:	No especificado
Municipio:	No especificado
RESULTADOS	
Los resultados de los análisis son expresados en porcentaje molar de la muestra analizada.	

El resultado de este informe corresponde exclusivamente a la muestra entregada por el cliente para el presente análisis

Muestra: CG_SAGM040222	Porcentaje (molar)
Metano	35,83±0,23
Dióxido de carbono	64,17±0,23
Sulfuro de hidrógeno*	No detectado

Valor promedio ± DE, n = 3

*Límite inferior de detección para el H₂S: 500 ppm

	INFORME DE RESULTADOS	FIR1-2021	
		Versión 1	
		Página 2 de 2	

Notas:

- Se prohíbe la copia, reproducción o distribución de este reporte sin la autorización por escrito del Laboratorio.
- Para cualquier inquietud relacionada con los resultados comunicarse vía correo electrónico a la dirección: lab_digestionanaerobia@outlook.com



PhD. Humberto Escalante Hernández
 Profesor, Escuela de Ingeniería Química
 Universidad Industrial de Santander