



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS

TEXTO

Manual didáctico para la construcción
de un biodigestor para la asignatura:
Manejo de Aguas Residuales

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN BIOLOGÍA MARINA
Y MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS

PRESENTA

JOSÉ HERNÁNDEZ MANUEL





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES COSTERAS

TEXTO

Manual didáctico para la
construcción de un biodigestor para
la asignatura: Manejo de Aguas
Residuales

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN BIOLOGÍA
MARINA Y MANEJO INTEGRAL
DE CUENCAS

PRESENTA

JOSÉ HERNÁNDEZ MANUEL

Director

M. EN C. ALEXIS FANUEL VELASCO ORTIZ

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Asesores

M. EN C. JOSÉ REYES DÍAZ GALLEGOS

LIC. WILLIAM RODRÍGUEZ VALENCIA

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

Tonalá, Chiapas.

Junio de 2024



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



Lugar: Tonalá, Chiapas
 Fecha: 26 de abril de 2024

C. José Hernández Manuel

Pasante del Programa Educativo de:

Licenciatura en Biología marina y Manejo integral de cuencas

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

Manual didáctico para la construcción de un biodigestor para la asignatura: Manejo de Aguas Residuales

En la modalidad de **TEXTO**

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

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Arkady Uscanga Martínez

Mtro. José Reyes Díaz Gallegos

Mtro. Alexis Fanuel Velasco Ortiz

Firmas:

Cop. Expediente.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de proyecto, Mtro. Alexis Fanuel Velasco Ortiz, agradezco su profesionalismo, compromiso además de toda su paciencia y comprensión, pues me apoyó y motivó a continuar en la elaboración de este trabajo. Asimismo, le agradezco el donarme parte importante del material usado en este proyecto, así como también por transmitirme todos los conocimientos y enseñanzas que corresponden en el terreno del diseño y construcción de biodigestores.

A mis asesores, el Mtro. José Reyes Díaz Gallegos y el Biol. William Rodríguez Valencia, gracias por asesorías, consejos y dirección, nada de esto hubiera sido sin su apoyo. Agradezco nuevamente al Biol. William por haberme donado parte del material que se usó en el proyecto, así como también proporcionarme todo el equipo requerido en la construcción del biodigestor y su importante aportación con ideas en el proceso de construcción.

Aprovecho este espacio también para expresar mi gratitud a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas mi alma máter, y también a su Centro de Investigaciones Costeras, mi centro de estudios por transmitirme las herramientas y conocimientos necesarios para poder desempeñar esta honorable carrera y generar este proyecto de titulación.

De la misma manera quiero agradecer a mis sinodales revisores, Dr. Arkady Uscanga Martínez, M. en C. José Reyes Díaz Gallegos y M. en C. Alexis Fanuel Velasco Ortiz, gracias por cada una de sus correcciones y sugerencias que aportaron con la finalidad que esta investigación se concluyera favorablemente.

Doy muchas gracias a mis padres Saúl Hernández Solís y María Ubelia Manuel Aguilar por todo el tiempo de espera y por alentarme a proseguir adelante y continuar en esta faena, gracias por ser mi motor y mi motivo de permanecer al frente. Jamás hubiese podido sin su apoyo, este logro también es de ustedes.

Agradezco también a Dios que sé que su voluntad y designios también son determinantes en este tipo de situaciones y él pone siempre a las personas indicadas en nuestro camino.

DEDICATORIA

Con toda gratitud y cariño dedico este proyecto a mis padres: Saúl Hernández Solís y María Ubelia Manuel Aguilar, muchas gracias por siempre estar conmigo, por todo su amor, apoyo, consejos, comprensión y paciencia. ¡Gracias!, esto va por ustedes.

A mis hermanos, muchas gracias por su apoyo, consejos y comprensión.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS	4
	2.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	4
	2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
III.	MÉTODO	5
	3.1. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR ANAEROBIO, BASADO EN EL DISEÑO DE TECNOLOGÍA EDUCATIVA	6
	3.1.1. Revisión de literatura.....	6
	3.1.2. Elaboración del diseño.....	7
	3.1.3. Adquisición de materiales	7
	3.1.4. Construcción del biodigestor	8
	3.1.5. Finalización del equipo.....	8
IV.	CUERPO DEL TEXTO DESARROLLADO	9
	4.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	9
	4.2. FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	14
	4.3. MODELOS DE BIODIGESTORES RURALES	23
	4.4. BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	27
	4.5. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR	30
	4.6. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIONES AL CONTENEDOR Y ENSAMBLE DE ACCESORIOS.....	33
	4.6.1. Influyente	33
	4.6.1. Efluente.....	36
	4.6.3. Salida o extracción del biogás.....	39
	4.6.4. Pozo de visita o monitoreo del reactor	41
	4.6.5. Salida del sistema de homogenización	45
	4.6.6. Base o eje para el sistema de homogenización o centrífugo....	49
	4.7. SISTEMA DE HOMOGENIZACIÓN	55
	4.8. SELLADO HERMÉTICO DEL CONTENEDOR	64

4.9. FILTRO DE REMOCIÓN DE ÁCIDO SULFHÍDRICO	68
4.10. RESERVORIO DEL BIOGÁS.....	74
V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
VI. ANEXOS	87
ANEXO 1. ESQUEMA DE ENSAMBLE DE ACCESORIOS AL CONTENEDOR.....	87
ANEXO 2. ESQUEMA DE ENSAMBLE DE ACCESORIOS DE LAS ASPAS	90
ANEXO 3. ESQUEMA DEL ENSAMBLE DE ACCESORIOS DEL SISTEMA CENTRÍFUGO O DE HOMOGENIZACIÓN	92
ANEXO 4. COLECCIÓN DE FOTOGRAFÍAS DE EQUIPO USADO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR.....	94
ANEXO 5. COLECCIÓN DE FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN	95

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ejemplo de diversos residuos orgánicos según su origen Fuente: FAO <i>et al.</i> , 2011	14
Cuadro 2. Relación C-N, con los sustratos más comúnmente usados para producir biogás Fuente: Briseño-Arciniega, 2017	15
Cuadro 3. Rangos de concentración de nutrientes, necesarios para el correcto crecimiento de las bacterias anaerobias. Fuente: Henze, 1995 citado en Campos <i>et al.</i> , 2001	20
Cuadro 4. Ejemplos de Concentraciones de Compuestos Inhibidores del proceso de digestión anaerobia. Fuente: SEMARNAT <i>et al.</i> , 2010	21
Cuadro 5. Ejemplos de concentraciones de antibióticos inhibidores del proceso de digestión anaerobia. Fuente: SEMARNAT <i>et al.</i> , 2010.....	22
Cuadro 6. Componentes del biogás en función del sustrato utilizado. Fuente: Coombs, 1990 citado en Campos <i>et al.</i> , 2001	28
Cuadro 7. Equipo utilizado en el biodigestor anaerobio.	32
Cuadro 8. Materiales de la estructura del influente	34
Cuadro 9. Materiales de la estructura instalada en la perforación B).....	37
Cuadro 10. Materiales de la estructura de la extracción del biogás	39
Cuadro 11. Materiales para la estructura del monitoreo y toma de muestras	42
Cuadro 12. Materiales de la estructura de la salida del sistema de homogenización	46
Cuadro 13. Material para elaborar la base o eje del sistema de homogenización....	49
Cuadro 14. Materiales del sistema de homogenización	55
Cuadro 15. Materiales utilizados para sellar el contenedor.....	64
Cuadro 16. Materiales del filtro de remoción del ácido sulfhídrico	68
Cuadro 17. Materiales del reservorio del biogás.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de construcción del biodigestor	6
Figura 2. Proceso de la digestión anaerobia. Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991	13
Figura 3. Producción de biogás en base a la temperatura del proceso anaerobio. Fuente: FAO, 2019	17
Figura 4. Eliminación de sólidos volátiles, SV (%) y producción volumétrica de gas Pv (m ³ biogás/m ³ dig·día) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del TRH: Fuente: GIRO, citado en IDAE y Besel, S. A., 2007.....	18
Figura 5. Biodigestor chino o de tapa/cúpula. Fuente: Salamanca-Tamayo., 2009..	24
Figura 6. Biodigestor indio o de campana flotante. Fuente: Salamanca-Tamayo, 2009	25
Figura 7. Biodigestor horizontal. Fuente: Fao <i>et al.</i> , 2011	26
Figura 8. Biodigestor Batch o discontinuo. Fuente: Fao <i>et al.</i> , 2011	27
Figura 9. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía. Fuente: CIEMAT citado en IDAE y Besel, S.A., 2007	29
Figura 10. Ubicación de las perforaciones en el contenedor.....	31
Figura 11. Calcado e inicio de la perforación del influente con brocas finas	33
Figura 12. Ampliación del orificio con broca circular y desbaste con ayuda de piedra pulidora.....	34
Figura 13. Pegado de la rosca de seguridad de PVC y el cree macho de PVC..... ..	35
Figura 14. Ensamble del tubo de PVC de 130 cm y roscado del tapón	35
Figura 15. Proceso de la perforación B).....	36
Figura 16. Ensamble de la rosca interna de seguridad, el cree macho y el tramo de PVC	38
Figura 17. Ensamble de la estructura del efluente.....	38
Figura 18. Desgaste de la perforación C) por dentro y fuera del contenedor.....	39
Figura 19. Ensamble de los crees macho y hembra	40
Figura 20. Perforación del orificio que corresponde	41

Figura 21. Desgaste de los extremos del tubo de PVC. H. y pegado de los crees macho y hembra.....	42
Figura 22. Lijado alrededor de la perforación e instalación del cree macho visto por dentro y fuera de la tapa	43
Figura 23. Desgaste del cree hembra y empatado del tramo de 3/4" al cree hembra antes instalado	44
Figura 24. Trazo y perforación del centro de la tapa con brocas finas y circulares.....	45
Figura 25. Desbaste del orificio con apoyo de la piedra pulidora	46
Figura 26. Desgastado de la superficie aledaña a la perforación.....	47
Figura 27. Lijado de cree macho	47
Figura 28. Materiales y ensamblado del cree macho a la tapa.....	48
Figura 29. Pegado del tubo de PVC al cree macho de 2" y posterior unido del cree hembra a la tapa y cree macho	48
Figura 30. Detalle de la ejecución de la perforación F)	49
Figura 31. Proceso de cortado del tubo de PVC de 6", y ablandado y aplanado de las placas	50
Figura 32. Cortado de las placas y trazado y obtención del punto central en donde irían los orificios.....	51
Figura 33. Desgaste del área ubicada alrededor del tapón que es donde irían las dos placas, una por dentro y otra por fuera del contenedor.....	51
Figura 34. Lijado del tapón y perforación con ayuda de tornillo y taladro.....	52
Figura 35. Introducción del tornillo y rondana en el tapón.....	52
Figura 36. Aplicación del sellador al tapón que posteriormente iría unido a la placa de 16 x 16 cm, instalación del tapón ya ensamblado al tornillo y placa visto desde el interior del contenedor.....	53
Figura 37. Añadido de la segunda placa al tornillo sobresaliente desde la parte interior del tinaco, y posterior anexión de la tuerca de presión y sellador gray	54
Figura 38. Cortado de los tubos de 6", para la realización de las aspas.....	56
Figura 39. Realización de las pestañas que formaron parte de las aspas	56
Figura 40. Procedimiento de fabricación de las pestañas.....	57
Figura 41. Realización de los orificios donde irían los cintos posteriormente.....	58
Figura 42. Insertado de la pestaña (hecha en el aspa) a la ranura realizada en el tubo de 1/2"	58

Figura 43. Pegado de aspas y tubos de 1/2"	59
Figura 44. Lijado de la pestaña y ensamblado a las estructuras.....	59
Figura 45. Atado de los cintos a través de los orificios hechos en el aspa.....	60
Figura 46. Lijado de las piezas (crees)	60
Figura 47. Pegado de los crees a las cruces	61
Figura 48. Sistema de homogenización, orden de unión de cruces y tramos	61
Figura 49. Orden de cómo se situaron los crees	62
Figura 50. Instalación del sistema de homogenización, sobre el eje central del contenedor.....	62
Figura 51. Proceso de construcción del mecanismo giratorio exterior dl sistema de homogenización.....	63
Figura 52. Retirado de los tornillos y desgaste de la boca del contenedor	65
Figura 53. Lijado, ensamblado y atornillado del arillo.....	65
Figura 54. Aplicación del sellador gray por el borde de la boca del contenedor y sellado de este mismo	66
Figura 55. Aplicación de sellador Gray y ensamble del tapón roscable.	66
Figura 56. Finalización del biodigestor.....	67
Figura 57. Lijado y aplicado de pegamento al tubo de PVC.....	68
Figura 58. Anexión del tubo de PVC H. a las tuercas-uniones.....	69
Figura 59. Lijado de las reducciones por el interior y exterior de estas mismas.....	69
Figura 60. Ensamblado de las reducciones.	70
Figura 61. Cortado, lijado del tubo y ensamblado del tubo de PVC. H. a la reducción de 1 1/2" – 3/4"	71
Figura 62. Lijado y ensamble de la válvula de paso al tubo de PVC. H.	72
Figura 63. Adición del carbón activado granulado y limadura de hierro en el filtro... ..	73
Figura 64. Recorte y lijado del tubo de PVC H	74
Figura 65. Recorte de la cámara de llanta.	75
Figura 66. Plegado en las orillas de la bolsa y ajustado de la cámara de llanta ...	75
Figura 67. Césped junto a su tuerca y empaque	76
Figura 68. Recorte de la bolsa e introducción del céspol	76
Figura 69. unión de la tuerca y el empaque a su céspol a través de la bolsa.	77

Figura 70. Proceso de ensamble del segundo tramo de tubo en el otro extremo y amarre de la cámara de llanta.	78
Figura 71. Reservorio finalizado.	78

RESUMEN

La Licenciatura en Biología Marina y Manejo Integral de Cuencas ofertada en la UNICACH con sede en Tonalá Chiapas, creada el primero de agosto de 2009, comprende una duración de nueve semestres, en los cuales se prepara al alumno para su desempeño profesional en áreas específicas de importancia para el desarrollo regional basado en manejo adecuado de los recursos naturales.

El programa de estudio proporciona a los estudiantes las competencias necesarias para el desempeño en la vida profesional y el aprovechamiento racional de los recursos naturales de las zonas marinas y cuencas. El plan estudio tiene un tronco común y posteriormente los contenidos que definen a los matriculados de las dos salidas profesionales: Acuicultura y Recursos Pesqueros y Manejo Integral de Cuencas. Para el caso del presente manual se aborda desde el manejo integral de cuencas, así mismo, se elabora bajo un modelo de transversalidad dentro del modelo educativo actual de la universidad.

El contenido del manual está diseñado con enfoque de material didáctico con fines educativos para la materia de Manejo de Aguas Residuales, particularmente se enfoca en la enseñanza-aprendizaje del tema de digestión anaerobia a través de la construcción de biodigestores. Las competencias a formar en los alumnos se abordan con base en temas relacionados con los conceptos de digestión anaerobia, etapas biológicas, microorganismos responsables del proceso, factores determinantes para llevar a cabo el proceso, beneficios ambientales, tipos de biodigestores rurales y la enseñanza-aprendizaje de la construcción paso a paso de un biodigestor modelo en correlación con la teoría.

El manual está estructurado con un enfoque de transversalidad, permitiendo la factibilidad del uso en los programas de estudio de reciente creación en la sede, aplicará para algunas unidades de aprendizaje de la Licenciatura en Biología Marina y homológamente para las unidades de aprendizaje de la Licenciatura en Manejo de Recursos Hídricos.

Palabras clave: biodigestor anaerobio, digestión anaerobia, biogás, biofertilizante,

ABSTRACT

The Bachelor's Degree in Marine Biology and Integrated Watershed Management offered at UNICACH based in Tonalá Chiapas, created on August 1, 2009, covers a duration of nine semesters, in which the student is prepared for his professional performance in specific areas of importance for regional development based on proper management of natural resources.

The study program provides students with the necessary skills for performance in professional life and the rational use of the natural resources of marine areas and basins. The study plan has a common core and subsequently the contents that define the professionals of the two professional opportunities: Aquaculture and Fisheries Resources and Comprehensive Watershed Management. In the case of this manual, it is approached from the comprehensive management of watersheds, likewise, it is prepared under a transversal model within the current educational model of the university.

The content of the manual is designed with a focus on teaching material for educational purposes on the subject of wastewater treatment, particularly focusing on the teaching-learning of the topic of anaerobic digestion through the construction of biodigesters. The skills to be trained in the students are addressed based on topics related to the concepts of anaerobic digestion, biological stages, microorganisms responsible for the process, determining factors to carry out the process, environmental benefits, types of rural biodigesters and teaching-learning of the step-by-step construction of a model biodigester in correlation with the theory.

The manual is structured with a transversal approach, allowing the feasibility of use in the recently created study programs at the headquarters, it will apply for some learning units of the Bachelor's Degree in Marine Biology and homologously for the learning units of Bachelor's Degree in Water Resources Management.

Keywords: *anaerobic biodigester, anaerobic digestion, biogas, biofertilizer.*

I. INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigaciones Costeras de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas oferta el programa educativo de Lic. en Biología Marina y Manejo Integral de Cuencas, dentro de la currícula del plan de estudios forma parte la asignatura de Manejo de Aguas Residuales que se imparte en séptimo semestre, con la clave: LBMC090752, con un total de ocho créditos.

La asignatura es de área tipo formación profesional disciplinaria, terminal e integración y de carácter obligatorio. Es una asignatura teórica y práctica, teniendo una duración del curso de 16 semanas, con 48 horas de teoría y 32 de práctica, lo que equivale a 80 horas en total.

El contenido del manual, resuelve la necesidad de un material didáctico con fines educativos para la asignatura de Manejo de Aguas Residuales que permita a los alumnos adquirir competencias a través de aplicación y uso del contenido científico, que les otorgará la formación de conocimientos, habilidades y actitudes en los temas que estructuran el programa de estudio, como son; la unidad cinco, tratamiento secundario y subtemas, entre los que destacan: conceptos de digestión anaerobia, etapas de la digestión anaerobia, sistemas de aireación y homogenización, lagunas de estabilización, criterios de diseño de lagunas anaerobias, así mismo, los estudiantes también comprenderán a fondo la unidad siete, tratamiento de lodos por digestión anaerobia. Al final el estudiante complementará los conocimientos adquiridos al poner en práctica sus competencias y retroalimentarse con el presente manual como material didáctico.

Con base en los procesos de enseñanza aprendizaje, la transversalidad es uno de los pilares fundamentales del modelo educativo visión 2025 de la UNICACH, la estructuración del presente manual permitirá la ejecución de la transversalidad en los programas educativos de la licenciatura en Biología Marina, licenciatura en Manejo de Recursos Hídricos y la licenciatura en Biología Marina y Manejo Integral de Cuencas, particularmente en las unidades de aprendizaje, didáctica de la

Biología, Educación Ambiental, Manejo Integral de Residuos, Química, Bioquímica, Tecnología y Calidad del Agua, así mismo, permitirá adquirir competencias en la aplicación con un enfoque de ciencia ciudadana.

El biodigestor que se presenta en este manual pertenece a los llamados, biodigestores de bajo costo sin flujo definido, son de fácil construcción, operando de manera frecuente en poblaciones rurales (Moreno *et al.*, 2016). Los factores que se consideran más elementales en la operación, control y seguimiento estricto de la digestión anaerobia son: Temperatura, tiempo de retención hidráulico y carga orgánica, rangos de pH, alcalinidad y tóxicos e inhibidores de la metanogénesis, la naturaleza y composición bioquímica de las materias primas. Otros factores como la cantidad, el volumen o el tipo de materia orgánica son menos importantes a tomar en cuenta, debido al diseño del biodigestor.

Un biodigestor es un reactor que transforma la materia orgánica en energía mediante un proceso anaerobio (Biológico) en presencia de agua, en ausencia de oxígeno, obteniendo en la transformación de la materia orgánica dos productos, biogás y abono orgánico (Vázquez-Valencia *et al.*, 2015).

El biogás es el producto principal de la digestión anaerobia, proceso biológico degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son transformados en una mezcla de diferentes componentes como pueden ser: metano (CH₄) 50-70%, bióxido de carbono (CO₂) 30-50%, nitrógeno (N) 0.5-3%, ácido sulfhídrico (H₂S) 0.1-2% e hidrógeno (H) 1-2% (Arvizu y Huacuz, 2003., Ferrer y Pérez, 2010).

Existen diversas formas para la utilización del biogás, dentro de éstas resaltan la producción de calor, que se puede usar en aquellos lugares donde carecen o son insuficientes los combustibles. Los sistemas pequeños de biogás pueden proveer la energía calórica para actividades esenciales como, calentar agua, potabilizar agua o cocción de alimentos, reduciendo así el impacto económico de los usuarios. Análogamente, la obtención de abono orgánico en la implementación de cultivos o sustrato base para mejorar la calidad del suelo, mejora la estructura de éste reduciendo los problemas de compactación y el riesgo de

erosión, así mismo aumenta la capacidad de retención de agua y el intercambio gaseoso. Otros usos que se le puede dar al biogás es la producción de energía eléctrica y también como combustible implementado en motores de combustión interna (FAO *et al.*, 2011).

El Manual para la construcción del biodigestor está orientado a todos los estudiantes y otros usuarios interesados en aprender el proceso biológico de digestión anaerobia, obtener la habilidad y el conocimiento de generar biogás e incluso fertilizante orgánico, por lo que puede aplicar no solamente en la academia, sino que también en las comunidades rurales que dependen de las actividades agropecuarias, ya que es útil como recurso en el aprovechamiento de la materia orgánica y sus derivados. (Sarabia-Méndez *et al.*, 2017).

Las comunidades rurales que no disponen de servicios básicos de saneamiento generan riesgo de contaminación en los acuíferos, lagos, lagunas, ríos y mares, por ende, un impacto ambiental en las cuencas. Muchas de las letrinas de estas comunidades desfogon sus aguas en fosas sépticas que no cuentan con los mantenimientos o diseños pertinentes para evitar dicha problemática (Febles- Patrón y Hoogesteijn, 2010; Camacho-Botero, 2020), Es por esto que la incorporación del biodigestor a través de la los procesos de digestión anaerobia representan una opción viable para solucionar el problema del manejo de las aguas residuales domésticas.

El manual está planificado para reforzar los conocimientos del contenido del programa de estudio. Para entender el manual con mayor profundidad los estudiantes deben tener y manejar (previamente a la introducción del manual) un marco conceptual amplio. Cada sección del material y en especial la sección del cuerpo del texto desarrollado, proporciona las funciones y pasos para su construcción de manera detallada y clara, apoyándose con fotografías que facilitarán la experiencia y mayor comprensión a los usuarios del manual, fortaleciendo las habilidades profesionales en su formación.

II. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Estructurar un manual didáctico para la construcción de un biodigestor como estrategia didáctica en la enseñanza del proceso de la digestión anaerobia.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un biodigestor con un modelo AJ-1 para la enseñanza de los procesos de digestión anaerobia.
- Elaborar el manual para la construcción de un biodigestor en la enseñanza de la digestión anaerobia.

III. MÉTODO

Este manual servirá de apoyo para diferentes asignaturas impartidas en el Centro de Investigaciones Costeras de la UNICACH como son: Manejo de aguas residuales, Biología, Educación Ambiental, Manejo Integral de Residuos, Química, Bioquímica, Tecnología y Calidad del Agua, debido a que los estudiantes podrán poner en práctica los conocimientos adquiridos en los cursos. El manual es teórico-práctico, en el que se construyó desde cero un biodigestor anaerobio, tomando fotografías que son incluidas en otro apartado de este escrito y facilitarán la comprensión del procedimiento, además de incluir un apartado teórico en el que se detalla paso a paso su ensamble, y marco conceptual para reforzar la teoría. Se requiere un espacio amplio y ventilado para poder construir este material.

El método de la investigación basado en el diseño de tecnología educativa es la norma y regla en que se rige y está apoyado este manual y tiene como principal enfoque la transferencia de tecnología.

Este método cuya principal característica radica en la introducción de un elemento o para transformar una situación. Este tipo de investigaciones trata de responder a problemas detectados en la realidad educativa, recurriendo a teorías científicas o modelos disponibles en aras de resolver dichas problemáticas. Con este fin se diseñarán programas, paquetes didácticos, materiales, estrategias didácticas, etc., que se someterán a pruebas y validación y posteriormente difundirlos en el plano educativo (De Benito y Salinas, 2016).

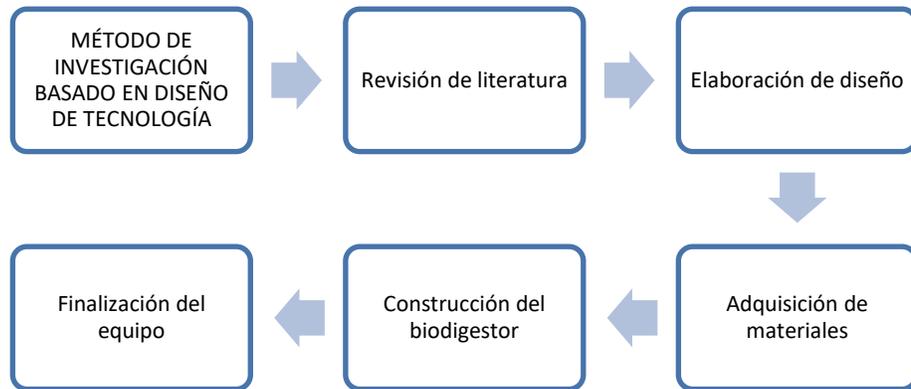


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de construcción del biodigestor.

3.1. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR ANAEROBIO, BASADO EN EL DISEÑO DE TECNOLOGÍA EDUCATIVA

El proceso de construcción y ensamble del biodigestor constó de cinco etapas, las cuales fueron: revisión de literatura, elaboración del diseño, adquisición de materiales, construcción del biodigestor y finalización del equipo (Figura 1).

3.1.1. Revisión de literatura

Se realizó una búsqueda exhaustiva de literatura que fuera idónea, amplia y suficiente al tema correspondiente en diferentes fuentes de información. Se compararon las diferentes fuentes bibliográficas, luego se seleccionaron las bibliografías que se consideraron más convenientes. Para esto se consultó en diferentes fuentes de información como son: artículos científicos, revistas, documentos de organismos internacionales, manuales, tesis y libros.

3.1.2. Elaboración del diseño

Se realizaron diferentes propuestas de diseño, luego se hizo una comparación con el propósito de seleccionar la más viable tomando en cuenta factores como: funcionalidad del material, tiempo de construcción, costos.

También se tomaron variables como: a) el sistema de homogenización., b) la temperatura, c) el tipo de material orgánico a digerir, ya que eso determinó la elección final del contenedor debido a que está elaborado de tres capas, por lo cual es más resistente a otros materiales., d) la adaptación a las condiciones del ambiente o área de estudio en donde se implementaría, por ejemplo, el clima del lugar y el suelo, en vista de que el tinaco estará enterrado lo cual el diseño de este lo hace práctico a la hora de instalarlo en la tierra, y resistente a los procesos bacterianos, por lo cual es durable en comparación con otros materiales (por ejemplo bolsas).

3.1.3. Adquisición de materiales

Se elaboró y planificó una lista de los materiales y equipo que se requerirían para el proyecto, teniendo en cuenta características como son: la cantidad por cada insumo, o los precios que se está dispuesto a pagar.

Se solicitaron en diferentes negocios y luego se compararon, en base al precio y calidad de los materiales con el fin de optimizar costos y elegir los insumos que mejor satisficieran las expectativas, luego se compró parte de los materiales en la sucursal seleccionada, y se verificó que estuvieran en buen estado. Otra parte de los materiales fueron donados por el CEICO para el sistema de homogenización y un benefactor privado para el contenedor.

3.1.4. Construcción del biodigestor

Una vez reunido todo el material y equipo a usarse en el proyecto se procedió a armar el biodigestor. Se realizó primero la perforación y luego se instaló la estructura correspondiente a cada perforación, posteriormente se construyó y ensambló el sistema de homogenización y al final se concluyó con el sellado del contenedor, así como la fabricación del filtro de remoción del ácido sulfhídrico y el reservorio del biogás (Anexo 5).

Aparte del material y equipo utilizado en la obra se apoyó de la cámara fotográfica de un teléfono móvil para la toma de fotografías, libreta y bolígrafo para anotar los datos e información generada en el proceso. El desarrollo de la construcción y ensamble del biodigestor, se ejecutó en el área de reproducción acuícola en las instalaciones del Centro de Investigaciones Costeras del Instituto de Ciencias Biológicas de la UNICACH.

3.1.5. Finalización del equipo

Después de haber finalizado con la construcción del biodigestor se hizo un análisis minucioso al equipo con el objeto de corroborar su eficacia. Se hicieron pruebas finales con el propósito que no hubiera ninguna anomalía (por ejemplo, que las aspas no giraran) o hubiera defectos en su elaboración. El tiempo que se tardó en terminar con la fabricación del contenedor fue de un mes.

IV. CUERPO DEL TEXTO DESARROLLADO

4.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA

Se describe como digestión anaerobia a un proceso biológico a través del cual la materia orgánica es transformada por la actividad metabólica de los microorganismos en ausencia de oxígeno, esto da lugar a productos finales como: una mezcla de gases compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono, entre otros gases en menor cantidad; también se obtiene una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. Como resultado de la actividad metabólica se da lugar también un aumento de las células microbianas. (Acosta y Abreu, 2005; Winkler, 2007). Este proceso comprende de cuatro etapas las cuales son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

En el proceso de la digestión anaerobia participan diversas bacterias anaerobias facultativas y anaerobias estrictas. Proceso en el cual diferentes bacterias intervienen, la primera etapa llamada hidrólisis de las proteínas, polisacáridos y lípidos, luego estos compuestos se convierten en aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes. Posteriormente estos compuestos son fermentados a ácidos grasos con bajo número de carbono como son los ácidos: acético, fórmico, propiónico, butírico además del etanol, H₂ y CO₂. Los productos de la fermentación son convertidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, a esta etapa se le conoce como acetogénesis. Para finalizar las bacterias metanogénicas convierten el acetato en metano y dióxido de carbono o reducen el CO₂ a metano (Díaz-Báez *et al.*, 2002).

Las bacterias facultativas son aquellas que no necesitan oxígeno para su desarrollo normal, pero en caso de estar presente el O₂ lo pueden utilizar metabólicamente (Montoya-Villafañe, 2008; Departamento de sanidad de Nueva York, 2010). Es decir, pueden sobrevivir y desarrollarse tanto en presencia como en

ausencia de oxígeno. Se puede definir como bacterias anaerobias a aquellos organismos que viven y se desarrollan en un ambiente sin presencia de oxígeno. Los organismos anaerobios estrictos (también llamados, obligados) no toleran el oxígeno y mueren al exponerse a este, por tal motivo se dice que se desarrollan en condiciones anaerobias. Las bacterias anaerobias tienen un metabolismo de tipo fermentativo, aunque también pueden obtener su energía a través de la respiración anaerobia (Rivas y Mota, 2006; Corrales *et al.*, 2015).

El tratamiento anaerobio en comparación con el tratamiento aerobio tiene las siguientes ventajas: 1) posibilidad de alcanzar una gran estabilización del residuo, 2) baja producción de lodos biológicos residuales, 3) baja necesidad de nutrientes, 4) no requiere oxígeno, 5) produce metano. Las desventajas de este tratamiento son: 1) remoción incompleta de la DBO, 2) requiere temperaturas relativamente elevadas, y 3) generación de potencial de malos olores (Tchobanoglous y Crites, 2000).

La hidrólisis es la primera fase de la digestión anaerobia, las bacterias por sí solas no pueden asimilar la materia orgánica particulada por lo que es necesario degradar estos compuestos a unos que sean más simples, es decir cadenas más cortas. He ahí donde se da la hidrólisis de las proteínas, carbohidratos y lípidos, que son degradados a polímeros o monómeros solubles (de cadenas más cortas), los cuales son: aminoácidos, azúcares y ácidos grasos (Bermúdez *et al.*, 1988).

Los microorganismos que participan en esta etapa son algunos anaerobios estrictos como bacteroides, clostridium y bacterias facultativas como estreptococci. La hidrólisis es muy importante a causa de que las moléculas orgánicas son muy grandes para ser absorbidas y utilizadas directamente por las bacterias como fuente de alimento (Parra-Huertas, 2015).

En la segunda fase o etapa los microorganismos que realizan el proceso de acidogénesis, se componen de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, también llamadas bacterias formadoras de ácidos (Helguero-Gutiérrez *et al.*, 2018).

Las bacterias formadoras de ácidos son aquellas bacterias heterótrofas capaces de convertir los materiales orgánicos complejos en compuestos más simples como alcoholes y ácidos (acético, fórmico y butírico). La actividad de estos microorganismos es muy importante en el proceso anaerobio debido a que ellas producen los sustratos que posteriormente serán reducidos a metano y dióxido de carbono (Romero-Rojas, 1999).

En esta fase se lleva a cabo la fermentación de las moléculas orgánicas solubles (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos) que se generaron en la etapa hidrolítica en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas: ácido acético (CH_3COOH), fórmico (CH_2O_2), e hidrógeno (H_2) con compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que serán oxidados posteriormente por bacterias acetogénicas en la siguiente fase (Coronel-Moreno, 2022).

En tanto que en las fases de hidrólisis y acidogénesis las bacterias presentes suelen ser facultativas, para la tercera fase las bacterias son anaerobias estrictas o también llamada obligadas, es decir que solo se desarrollan en ausencia de oxígeno (Reyes-Aguilera, 2018).

Las bacterias acetogénicas transforman los compuestos intermedios resultantes de la fase acidogénica, de los cuales se generan productos como: hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. El ácido acético aparece por la transformación de las bacterias en: alcoholes, ácidos grasos, ácidos volátiles etc. Mientras que las bacterias homoacetogénicas transforman el hidrógeno y dióxido de carbono en ácido acético (González-Cabrera, 2014).

Los microorganismos que participan en el proceso acetogénico son: *Syntrophobacter wolnii*, que descompone el ácido propiónico y *Syntrophomonas wolfei* que descompone el ácido butírico. Estas dos especies también degradan los ácidos valérico y butírico. En tanto que las bacterias llamadas homoacetogénicas se encuentran los géneros *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*, *Clostridium* o *Eubacterium* (Ibidem).

La metanogénesis es la etapa final de digestión anaerobia. En esta fase el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono son degradados a metano y dióxido de carbono. Los microorganismos que descomponen el ácido acético son denominados: bacterias metanogénicas acetoclásticas y las que consumen hidrógeno: metanogénicas hidrogenófilas (Elías-Castells, 2012).

La principal vía de formación del metano va a ser la vía acetoclástica, con alrededor del 70% del metano producido de forma general. A pesar de ser esta vía la más importante, sólo microorganismos de los géneros *Methanosarcina* y *Methanothrix* son capaces de producir metano a partir de acético. Los géneros principales dentro de la vía de los hidrogenotrofos son *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacter* o *Methanogenium*, entre otros (González-Cabrera, 2014). Los dos grupos de bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas (Díaz-Fernández, 2018), es decir realizan el proceso en ausencia de oxígeno.

El metano (CH_4) es la forma más reducida del carbono (estado de oxidación -4), y la transferencia de e^- (electrón) para producirlo tiene lugar desde H_2 exógeno o desde reductores carbonatados. El metano es uno de los gases más importantes de la biósfera porque, si bien su concentración en la atmósfera es muy baja (2 ppm), ejerce un efecto invernadero 25 veces superior al CO_2 (Castillo-Rodríguez *et al.*, 2005).

Las principales poblaciones bacterianas responsable de cada proceso son la siguientes: 1). Bacterias Fermentativas; 2). Bacterias Acetogénicas que producen hidrógeno; 3). Bacterias Homoacetogénicas; 4). Bacterias Metanogénicas Hidrogenotróficas; 5). Bacterias Metanogénicas Acetoclásticas (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991). (Figura 2)

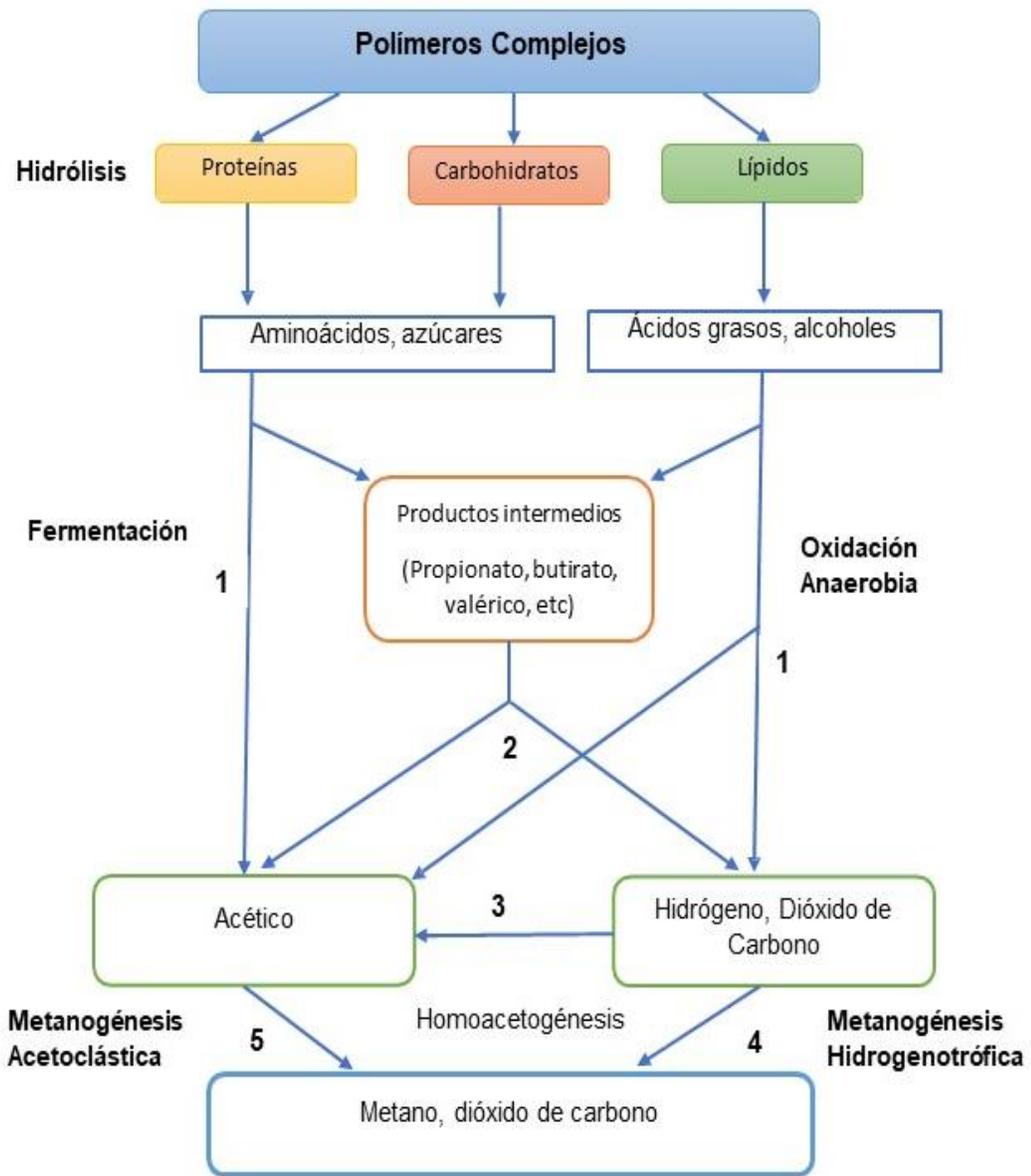


Figura 2. Proceso de la digestión anaerobia. Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991.

4.2. FACTORES DETERMINANTES EN EL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

En los digestores anaerobios, las condiciones son tales que favorecen el crecimiento de los microorganismos que metabolizan la formación de dióxido de carbono y metano como productos finales. Algunos de los factores determinantes para la digestión anaerobia eficaz incluyen el control de la temperatura, alrededor de 35° C, agitación y exclusión de oxígeno y algunos materiales tóxicos (Weber, 2003; IDAE y Besel S. A., 2007).

La Naturaleza y composición bioquímica de las materias primas es uno de ellos, puesto que las materias primas a utilizar en el proceso de la fermentación metanogénica deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. Además del carbono y nitrógeno, en el proceso microbiológico también se necesita un cierto equilibrio de minerales los cuales pueden ser: azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, entre otros. Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas (Cuadro 1) (FAO *et al.*, 2011).

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas

Cuadro 1. Ejemplo de diversos residuos orgánicos según su origen. Fuente: FAO *et al.*, 2011.

La relación carbono-nitrógeno sin duda es un factor determinante también. Los carbohidratos y las proteínas son los nutrientes imprescindibles para el crecimiento, desarrollo y actividad de las bacterias anaerobias. El carbono contenido en el estiércol, es el elemento que las bacterias convierten en metano (CH₄). El nitrógeno es utilizado para la multiplicación bacteriana y como catalizador en el proceso de producción de biogás (Gómez-López *et al.*, 2017).

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación C-N óptima en la materia prima se considera en un rango de 30-1 hasta 20-1. (Echeverría-Echeverría *et al.*, 2018)

Dentro de los diferentes sustratos a usar, los que se encuentran en la proporción recomendada C-N, son el estiércol de vacas y el estiércol de ovejas (Cuadro 2) (Briseño-Arciniega, 2017).

Sustrato	Contenido de carbono por peso (%)	Contenido de nitrógeno por peso (%)	Relación carbono a nitrógeno (C-N)
Lodos anaerobios	40	4	10-1
Estiércol de aves	41	1.3	32-1
Suero de leche	10	11.7	0.85-1
Estiércol fresco de Oveja	16	0.55	29-1
Estiércol fresco de Vaca	7.3	0.29	25-1
Estiércol fresco de Cerdo	7.8	0.6	13-1

Cuadro 2. Relación C-N, con los sustratos más comúnmente usados para producir biogás

Fuente: Briseño-Arciniega, 2017.

Una relación de C-N de más de 35-1, quiere decir que el sustrato es alto en carbono, esto implica una descomposición del material orgánico más lenta, por tanto, la multiplicación y desarrollo de las bacterias será bajo, debido a la falta de nitrógeno, dando así un tiempo de generación de biogás más tardado. Teniendo en cuenta el otro extremo una relación C-N menor de 8-1, inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en cantidades muy altas es tóxico e impide el proceso (Navarro-Ortiz, 2017).

Los niveles de sólidos de sólidos totales y sólidos volátiles es otro factor determinante en el proceso anaerobio. Los sólidos totales, representan el contenido de sustancias, tanto en suspensión como disueltas, que contiene un agua. También se le denomina con el termino de residuo seco (De Heredia-Alonso *et al.*, 2004). Los sólidos volátiles se definen como la materia que realmente es transformada por las bacterias (Sanabria-Vindell *et al.*, 2018).

La cantidad de sólidos de entrada representa la humedad del afluente, por tanto, un valor de 10% en ST significa una humedad de la corriente de 90%. Si se aumenta el promedio de sólidos en suspensión del efluente, se origina un lavado de las bacterias (salen del reactor como corriente de salida) y se produce un aumento progresivo de ácidos volátiles, lo que hace disminuir lentamente la producción de biogás (Gómez-Muñoz, 2012).

La temperatura determina la actividad de las bacterias que digieren el estiércol, cuanta menor temperatura, menor desempeño en su actividad. Por tal motivo, será necesario que el estiércol quede más tiempo en el interior del biodigestor. De modo que se dice entonces que la temperatura establece el tiempo de retención (Martí-Herrero, 2008).

La digestión anaerobia puede llevarse a cabo en amplio intervalo de temperaturas, que van de los 5 °C hasta los 60 °C. Los organismos metanogénicos son más sensibles que otros grupos de bacterias del biodigestor, en vista de que tienen una velocidad de crecimiento más lenta. Cuanto más bajas sean las

temperaturas el proceso de digestión anaerobia podría verse afectado, por lo tanto, la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor (Sanabria-Vindell *et al.*, 2018).

El rango óptimo de temperatura en régimen mesofílico se encuentra en torno a 35-40 °C y es aplicable a cualquier tipo de digestor. Es el rango más habitual en plantas de biogás individuales, ya que proporciona un proceso estable y con cierta tolerancia a pequeños cambios de temperatura. El rango óptimo de temperatura en régimen termofílico se encuentra entre 55-60 °C y es aplicable régimen mesofílico (IDAE *et al.*, 2011).

Según la temperatura, los biodigestores y los procesos pueden agruparse dentro de tres grupos principales:

- Psicofílicos: operan en un rango de 10 a 25 °C.
- Mesofílicos: operan en un rango de 25 a 40 °C.
- Termofílicos: operan en un rango de 40 a 55 °C.

Para un mismo tiempo y material, se producirá más biogás a temperaturas termofílicas que a temperaturas psicofílicas (Figura 3) (FAO, 2019).

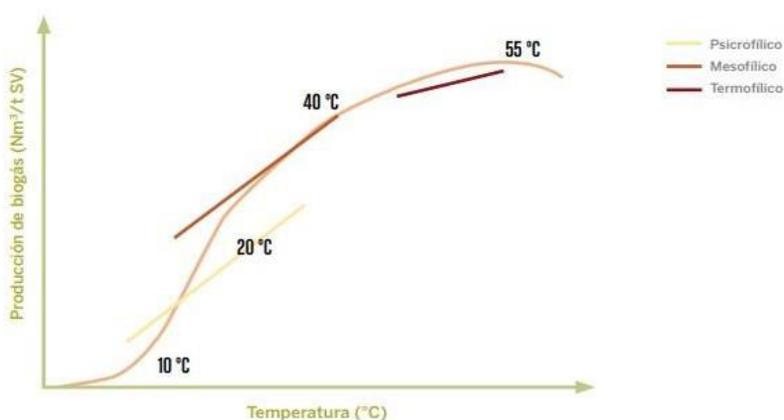


Figura 3. Producción de biogás en base a la temperatura del proceso anaerobio. Fuente: FAO, 2011.

El tiempo de retención hidráulica (TRH), apunta el tiempo promedio de permanencia del sustrato en el biodigestor, sometido a la acción de las bacterias, y no es más el cociente entre el volumen del reactor y el caudal diario de carga. Este factor establece el volumen del reactor y está directamente relacionado con la temperatura, por tanto, con el diseño de biodigestor a utilizar. Para producir una puntual cantidad de biogás en rangos psicrófilicos se necesitan valores de TRH mayor que en rangos mesofílicos o termofílicos. A mayor temperatura, menor TRH.

Para los distintos procesos, los TRH pueden ser muy variables:

- Psicrófilicos: de 50 a 120 días.
- Mesofílicos: de 25 a 50 días.
- Termofílicos: de 15 a 25 días (FAO, 2019).

Para dimensionar un biodigestor resulta necesario conocer la tasa diaria de alimentación y el TRH. Esta variable guardará una relación directa con la temperatura de operación elegida. $TRH \text{ (días)} \times \text{Cantidad de carga (m}^3/\text{día)} = \text{Volumen útil del biodigestor (m}^3\text{)}$ (Figura 4) (Ibidem).

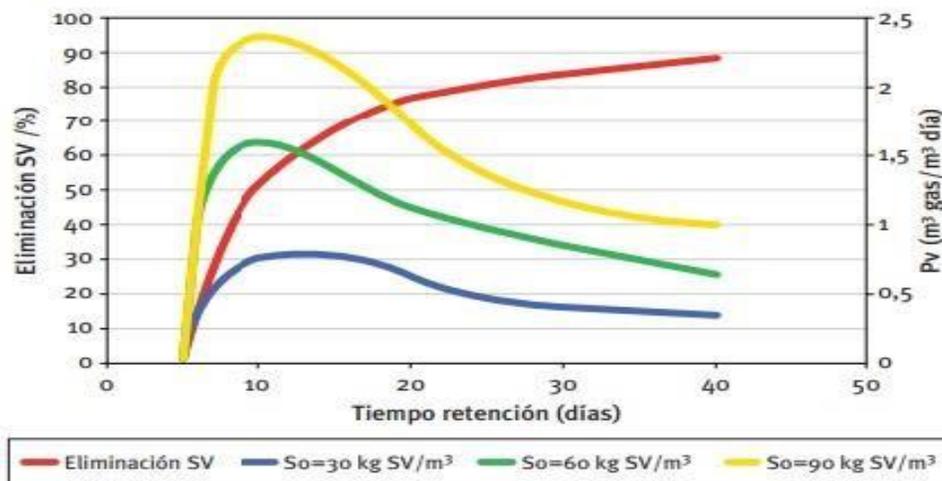


Figura 4. Eliminación de sólidos volátiles, SV (%) y producción volumétrica de gas Pv (m³ biogás/m³ dig-día) para hacer un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del TRH. Fuente: Giro, citado en IDAE y Besel, S. A., 2007.

La carga orgánica se puede interpretar como una medida del esfuerzo que se impone con la alimentación de material orgánico sobre las poblaciones de microorganismos. Una carga orgánica alta necesita de una mayor actividad microbiana; si se produce un aumento repentino de esta, las bacterias podrían no ser capaces de responder adecuadamente a estos cambios (Arrieta-Palacios, 2016).

La mayoría de las bacterias se desarrollan a un pH dentro de la neutralidad, por ejemplo, las bacterias acetogénicas las cuales se desenvuelven a un pH de 7 a 7.4. No obstante, hay bacterias que trabajan a pH menores a 6 y se adaptan fácilmente a ambientes con pH próximos a 4, tal es el caso de las bacterias acidogénicas. En lo que concierne a los hongos se desempeñan mejor en un rango de pH de 5 a 6 (Jaramillo-Calderón, 2011). Mientras que el pH óptimo para el crecimiento de las bacterias metanogénicas es de 6.8 a 7.5, el cual tiene influencia en la actividad enzimática (De la Merced-Jiménez, 2012).

El factor nutriente (niveles de sales) es de gran importancia en la digestión anaerobia incluso cuando una de las ventajas proceso anaerobio es su baja necesidad de nutrientes, esto gracias a su pequeña velocidad de crecimiento. Sin embargo, resulta muy importante para la estabilización del proceso que la relación C-N (carbono-nitrógeno) se mantenga entre 20-1 y 30-1 y la relación N-P (nitrógeno-fósforo) más óptima es de entre 1-5 y 1-7 (Mesa de biogás. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, 2010).

Las necesidades de nitrógeno y fósforo para síntesis de microorganismos son similares a los procesos aerobios (0.087 g de N/g de DQO biomasa, 0.017 g de P/g de DQO) biomasa. Las necesidades de azufre son mucho mayores que las correspondientes al caso de los procesos aerobios, pues son de 0.011 g de S/g DQO de biomasa (Cuadro 3) (Ferrer-Polo y Seco-Torrecillas, 2008).

Nutrientes	g/kg SSV	g/kg DQO
<i>Nitrógeno</i>	80-120	55-85
<i>Fósforo</i>	10-25	7-18
<i>Azufre</i>	10-25	7-18
<i>Hierro</i>	5-15	4-11

Cuadro 3. Rangos de concentración de nutrientes, necesarios para el correcto crecimiento de las bacterias anaerobias. Fuente: Henze, 1995 citado en Campos *et al.*, 2001.

El potencial redox mide la capacidad global de un agua de proceder por sí misma a la oxidación o reducción de sustancias. Es decir, un agua con un elevado potencial redox contendrá una considerable cantidad de oxígeno, siendo rica en compuestos en estado oxidado: Fe y Mn en sus estados superiores de oxidación, sulfatos, nitritos, fosfatos y materia orgánica, y estando, en general, altamente mineralizada. Por contraparte, un agua con bajo potencial redox contendrá abundantes compuestos en estado reducido, muy poco oxígeno, y si contendrá sulfuros, amoníaco, y materias orgánicas difícilmente mineralizables (Marín-Galván, 2003).

Los microorganismos necesitan de un entorno con un potencial de oxidación altamente reductor por lo que el valor de potencial redox se debe mantener entre -220 MV y 350 MV (Coello-Martínez, 2019), La FAO en 2019, dice que el límite máximo puede ser -370 MV.

Los tóxicos e inhibidores del proceso anaeróbico también es un factor importantísimo que se debe tener en cuenta a la hora de trabajar con un biodigestor anaerobio. La concentración de ciertas sustancias tales como amoníaco, metales pesados (Cuadro 4), cationes metálicos ligeros y sulfuro sobrepasa determinados niveles, se puede producir la inhibición del proceso. El efecto más común es la

inhibición de la formación de metano, con la consiguiente acumulación de ácidos volátiles, disminución del pH y fallo del proceso (Ferrer-Polo y Seco-Torrecillas, 2008).

Los antibióticos son generalmente adicionados a las dietas de los animales para mejorar la producción y controlar enfermedades. Estos pueden dañar a los grupos de microorganismos que llevan a cabo el proceso (Cuadro 5), aunque se pueden minimizar sus efectos si se les da el tiempo debido para que las bacterias se adapten (Arrieta-Palacios, 2016).

El sulfonato linear de alquilbenceno es el surfactante aniónico más usado como productos limpiadores de hogares e industrias. La adición de surfactantes en los digestores provoca la disminución en la tasa de producción de biogás. Por este motivo no se debería añadir residuos domésticos o industriales a un biodigestor en funcionamiento, debido a que la productividad se verá afectada (Rivas-Solano *et al.*, 2010).

Concentración inhibitoria de metales pesados en procesos anaerobios		
Compuesto	Concentración necesaria	Concentración inhibitoria
Cobre (Cu)		>40
Cadmio		>150
Zinc		>150
Níquel	0.006-0.5	>10
Plomo	0.002-200	>300
Cromo III	0.005-50	>120
Cromo IV		>100

Cuadro 4. Ejemplos de Concentraciones de Compuestos Inhibidores del proceso de digestión anaerobia Fuente: SEMARNAT *et al.*, 2010.

Concentración de Antibióticos con potencial de inhibir producción de biogás	
Compuesto	Concentración inhibidora (mg/l)
Bacitracina	100
Lasalocid	100
Monensina	8
Tisolina	100
Virganimisina	50
Furazolidona	200

Cuadro 5. Ejemplos de concentraciones de antibióticos inhibidores del proceso de digestión anaerobia. Fuente: SEMARNAT *et al.*, 2010.

Los agentes promotores o inoculantes biológicos incentivan la degradación de la materia orgánica lo cual aumenta la producción del biogás; entre ellos se encuentran las enzimas, sales orgánicas, la adición de urea, que acelera la producción de metano, el carbonato de calcio que incrementa la generación del gas y puede elevar el contenido de metano en el biogás (García-Páez, 2015).

La agitación también es un factor determinante pues según la tipología y/o diseño del reactor debe transferírsele al sistema, el nivel de energía necesario para favorecer la transferencia de sustrato a cada población o de bacterias, así como homogenizar para mantener concentraciones medias bajas de inhibidores (IDAE y Besel, S. A., 2007).

4.3. MODELOS DE BIODIGESTORES RURALES

Desde hace más de cien años se sabe que si se dejan los sólidos sedimentados de aguas residuales en un tanque cerrado por un tiempo suficiente, pasan a tener un aspecto líquido y se genera un gas que contiene metano. En 1904 Imhoff creó y obtuvo la patente del diseño de reactores de digestión anaerobia, conocidos como fosas o tanques Imhoff (Ramalho, 2003).

Un biodigestor es un contenedor que a través de un proceso de digestión un grupo de microorganismos bacterianos anaerobios, convierte a partir de material orgánico, principalmente excrementos, en una mezcla de gases con alto contenido de metano al cual se le llama biogás y un lodo residual con alto grado de nutrientes es cual es usado como fertilizante (Herrero, 2007; Hernández-Embate, 2013).

Los digestores de fermentación anaerobia, para la producción de biogás está compuesto de las siguientes partes:

1. Tubo de entrada de materia orgánica.
2. Cámara de fermentación o cuerpo del digestor.
3. Cámara de depósito de gas.
4. Cámara de salida de materia estabilizada o fermentada
5. Conducto de gas, lleva el gas para ser usado
6. Tapa hermética
7. Gasómetro (Guevara-Vera, 1996).

Entre los principales tipos de biodigestores en el medio rural podemos encontrar:

El modelo chino o también llamado de cúpula fija, es un tipo de biodigestores que se caracteriza por tener la forma de una esfera, por tal motivo, el gas se almacena internamente en la campana fija a presión, lo cual mueve el líquido en

tratamiento hacia la cámara de hidropresión (Figura 5); los materiales para la construcción son: ladrillos o bloques, acero y cemento (Izquierdo-Morán *et al.*, 2020). El espacio que contiene al gas debe ser hermético, por lo cual se aplican pinturas sintéticas u otras que garanticen la hermeticidad requerida. La construcción de este tipo de biodigestores requiere de excesivo trabajo y de una rigurosa supervisión de especialistas (Barrera-Cardoso *et al.*, 2020).

Los biodigestores chinos se cargan de manera semicontinua, para lo cual se efectúa una carga inicial de estiércol y material celulósico, aparte del inóculo correspondiente, hasta aproximadamente el 70% de la capacidad; a continuación, se prosigue en seguir cargando como digestor continuo; durante los 120 y 180 días se descarga totalmente y el ciclo se reinicia (Izquierdo-Morán *et al.*, 2020).

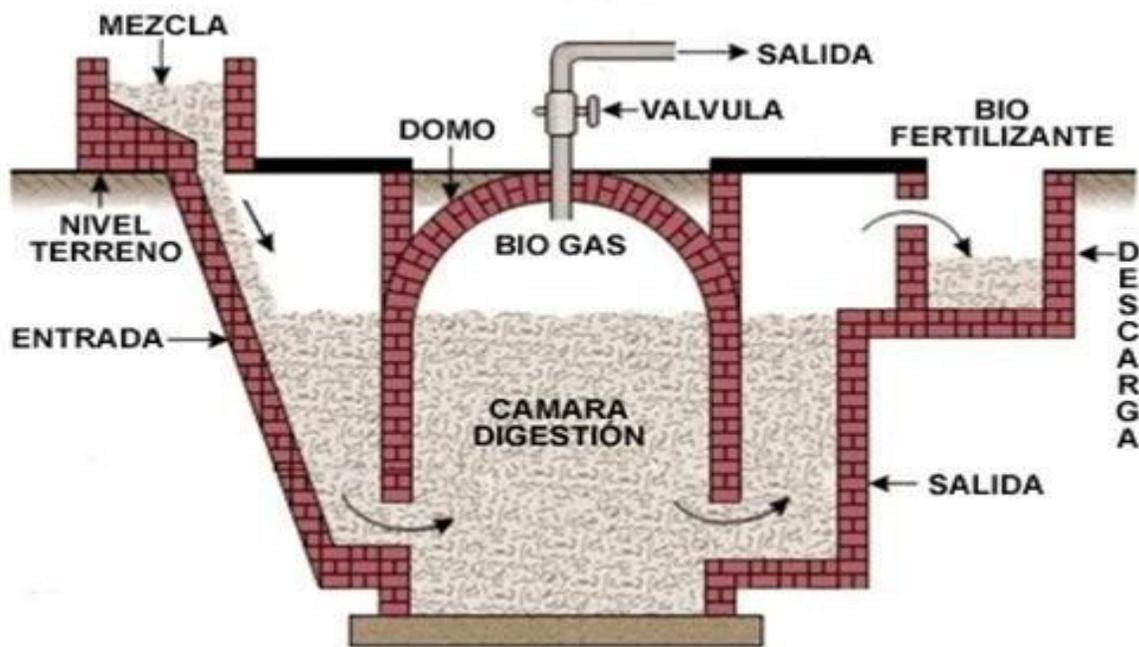


Figura 5. Biodigestor chino o de tapa/cúpula. Fuente: Salamanca-Tamayo., 2009.

El modelo indio o también llamado de campana o cúpula flotante, este biodigestor es sencillo de operar y también de bajo costo. La mayoría de las veces la pared y el fondo del reactor están contruidos en ladrillo y reforzados con hormigón para evitar la corrosión. El reactor está sellado con una tapa flotante que sube y cae sobre un eje central de acuerdo a la presión del gas dentro de este (Figura 6). El biodigestor debe ser alimentado diariamente y el tiempo de retención se estimará de acuerdo a la temperatura donde se instale. Una vez aseguradas las condiciones óptimas de operación la producción de biogás deberá ser constante (Rodríguez-Urbe, 2016).

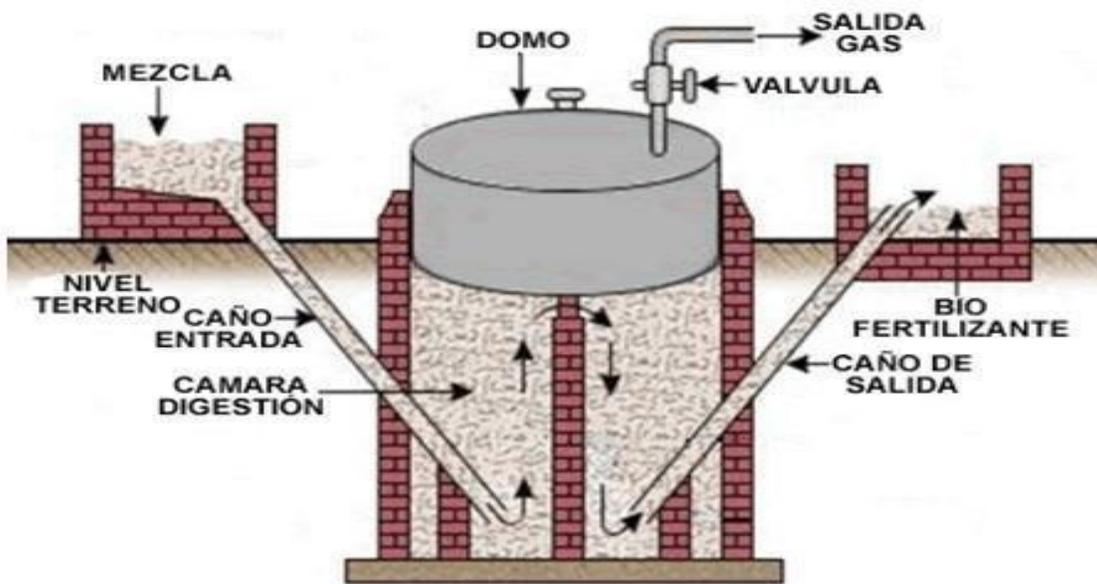


Figura 6. Biodigestor indio o de campana flotante. Fuente: Salamanca-Tamayo., 2009.

Los biodigestores horizontales se caracterizan por no profundizar en el suelo, la mayoría son rectangulares (aunque pueden ser cuadrados), están contruidos de concreto armado debido a las presiones que están sometidos (Figura 7). Por lo regular se le da uso para el saneamiento de descargas cloacales, gracias a su forma alargada que garantiza que el efluente al salir del cuerpo del digestor, y también por su flujo de pistón y tiempo de retención sean debidamente degradados (Guevara Vera, 1996).

Otras características de este digestor es su cúpula metálica en la parte superior, la cual es desmontable y tiene la función de ser la boca de visita, además se controla por el sello de agua y requiere de un gasómetro adicional en vista de la poca capacidad de almacenamiento de la cúpula y el cuerpo del digestor (Ibidem).

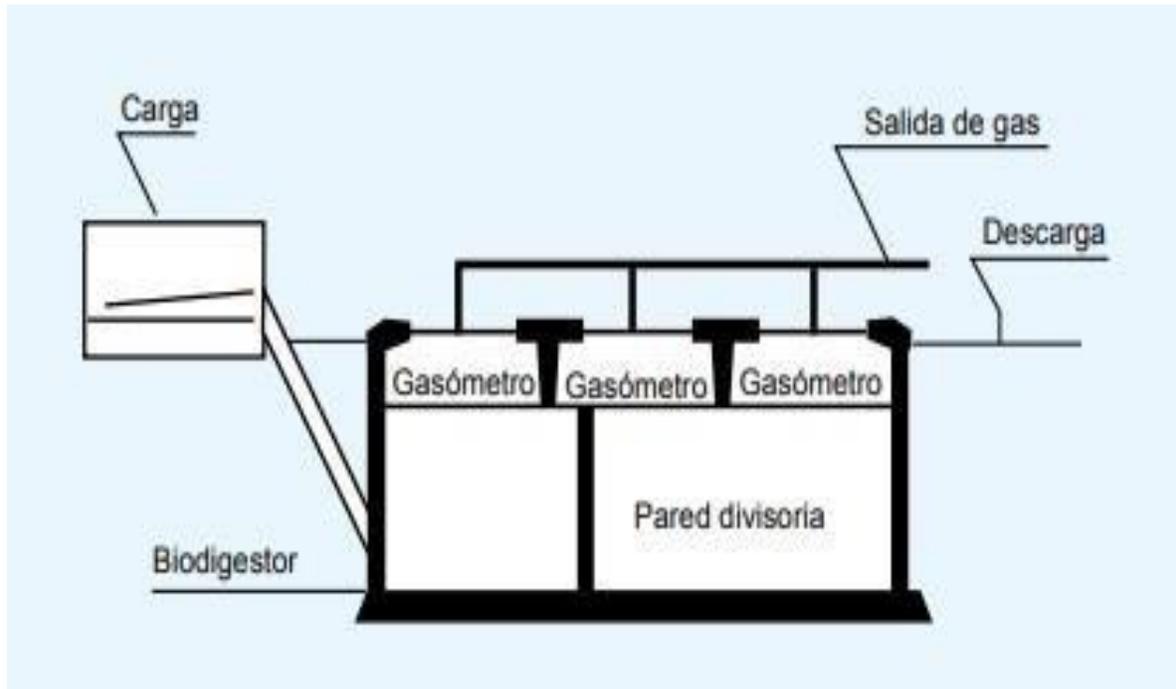


Figura 7. Biodigestor horizontal. Fuente: Fao *et al.*, 2011.

Los digestores Batch también llamados discontinuos o de régimen estacionario tienen una serie de tanques herméticos en la que un extremo se encuentra adaptado un gasómetro flotante donde se almacena el biogás (Figura 8) (García-Luna, 2014). Este tipo de biodigestores se cargan con los residuos orgánicos en un solo lote. Posteriormente de un cierto período de fermentación, cuando la producción de biogás decae por la descomposición de la materia orgánica, se vacían los reactores y se vuelven a cargar dando inicio a otro proceso de digestión anaerobia (Cóndor-López, 2019). Una de las ventajas del sistema Batch, si se compara con los biodigestores de sistema continuo, es que se puede utilizar materias primas con un alto contenido de materia seca, o sea materias sólidas (FAO *et al.*, 2011).

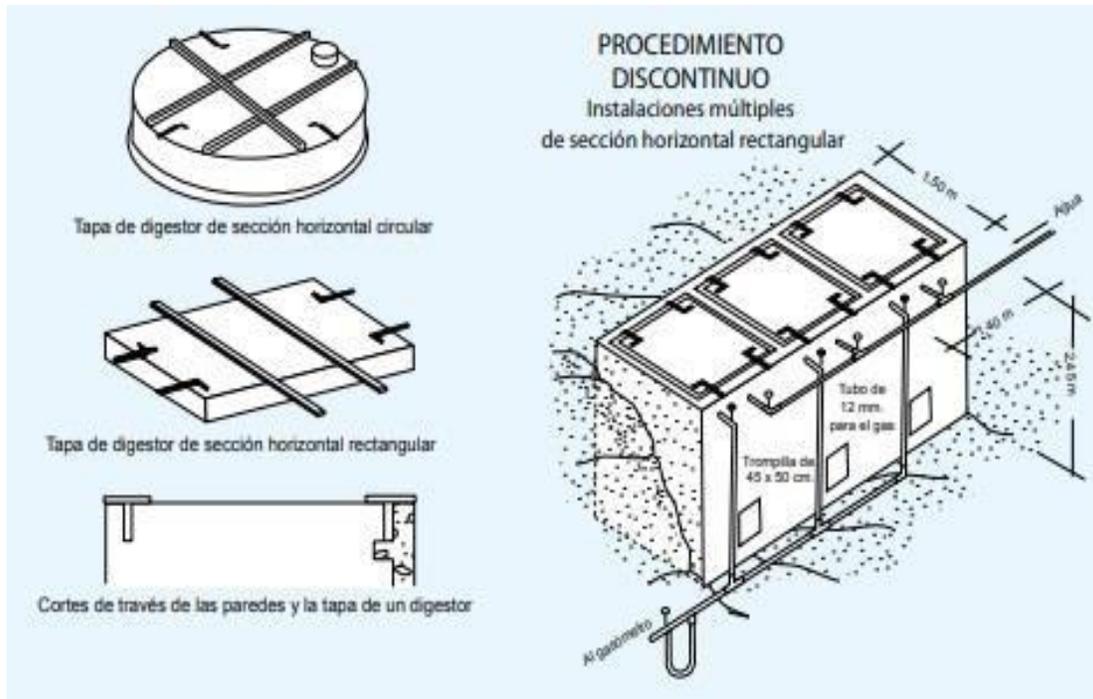


Figura 8. Biodigestor Batch o discontinuo. Fuente: Fao *et al.*, 2011.

4.4. BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

El biogás es el producto resultado de un proceso natural que ocurre de forma espontánea en un ambiente anaerobio, es decir, sin oxígeno. Este proceso lo llevan a cabo microorganismos como parte del ciclo biológico de la materia orgánica, el cual implica la fermentación o digestión de materiales orgánicos, lo que permite obtener energía limpia, renovable y de bajo costo. (Rivas-Solano *et al.*, 2010).

De estos procesos bioquímicos que dan como resultado al biogás, los componentes que lo integran son principalmente el metano (40-80%) y el dióxido de carbono (18-44%) y en menor cantidad otros gases como el hidrógeno (H₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y nitrógeno (N₂) que corresponden a un 4% (Hernández, 2015). De estos gases es el metano el que tiene un valor como energía. La composición o riqueza del biogás depende del material digerido (Cuadro 6) y del funcionamiento del proceso (Campos *et al.*, 2001).

Componente	Residuos Agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
Metano	50 a 80%	50-80%	50-70%	45-65%
Dióxido de Carbono	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%
Sulfuro de Hidrógeno	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0.5-100 ppm
Amoníaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de Carbono	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%
Compuestos Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

Cuadro 6. Componentes del biogás en función del sustrato utilizado. Fuente: Coombs, 1990 citado en Campos *et al.*, 2001.

Un biogás con un contenido en metano del 60%, tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/Nm³ (Figura 9), lo que se traduce en algo de más de la mitad del poder calorífico del gas natural (10.440 kcal/m³). Es decir, si se le eliminan los contaminantes, el biogás es un combustible ideal por su alto contenido en metano.



Figura 9. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía. Fuente: CIEMAT citado en IDAE y Besel, S.A., 2007.

El biogás obtenido de la digestión anaerobia puede aprovecharse como energía para:

- Producción de energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a biogás.
- Producción de calor en hornos, estufas, secadoras, calderas, calefacción u otros sistemas.
- Producción de gas renovable (biometano -bio-CH₄-) equiparable al gas natural a través del enriquecimiento del biogás a un gas rico en metano. El biogás puede ser inyectado a la red de gas natural o utilizado para producir gas natural comprimido (GNC) o gas natural licuado (GNL) (Fundación *Naturgy et al.*, 2021).

El biofertilizante es un compuesto que está constituido de grandes cantidades de microorganismos descomponedores los cuales aceleran los procesos microbianos del suelo, de tal manera que mejoran la asimilación de los nutrientes por parte de las plantas (Silva-Rubio *et al.*, 2014).

La adopción y uso de los biofertilizantes en la agricultura son una tecnología clave para la sustentabilidad y productividad de este sector, gracias a que se pueden conseguir altos rendimientos agrícolas y a la vez apoyar con el cuidado del medio ambiente, en virtud de que es una alternativa al uso masivo de plaguicidas y fertilizantes de origen químico, pues son costosos y tienen un impacto negativo sobre la salud y el medio ambiente (Izaguirre-Mayoral *et al.*, 2009).

4.5. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR

En esta sección se dará a conocer los pasos de las perforaciones que se hicieron en el reactor, las cuáles son seis. También se abordará el ensamble de los accesorios que conforman las estructuras que van montadas en las perforaciones y que le dan funcionalidad al biodigestor, así como el equipo utilizado (Cuadro 7) (Anexo 4).

De las perforaciones, tres se ubican en las paredes del reactor y son los siguientes: influente o entrada de la materia orgánica (A), efluente o salida de los lodos digeridos (B), salida del biogás (C). Dos perforaciones más se ubican en la tapa del contenedor: la primera se realizó en medio de la tapa, tiene la función de salida del sistema de homogenización o agitador de las aspas y sello hidráulico (F), y la segunda se encuentra ubicada al lado izquierdo de la tapa, el cual tiene la función de pozo de visita o acceso a la toma de muestras y monitoreo del proceso de digestión anaerobia (D). La última perforación está ubicada en la base del reactor, y corresponde a la base o eje del sistema de homogenización (E). (Figura 10).

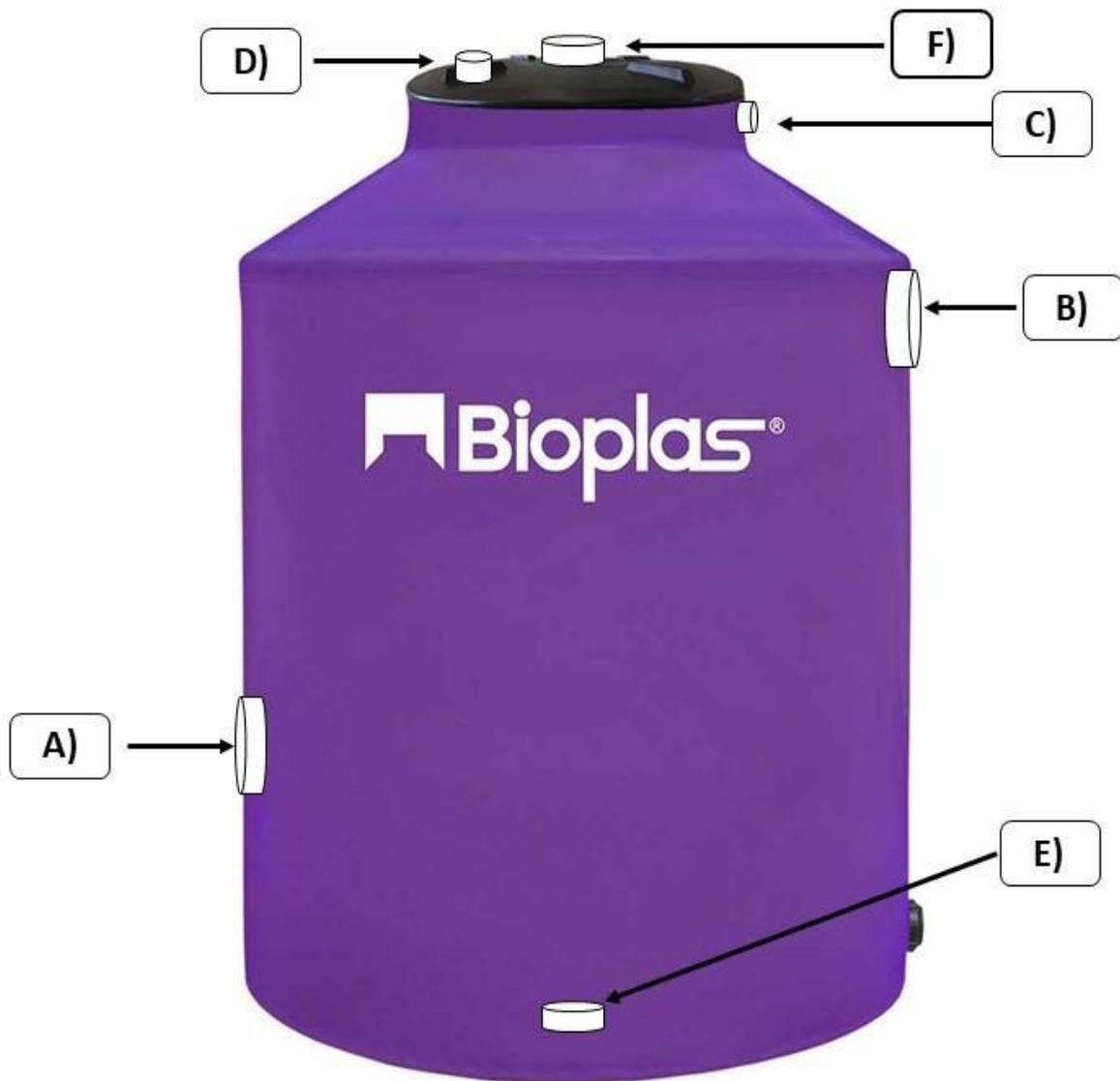


Figura 10. Ubicación de las perforaciones en el contenedor.

EQUIPO	
NOMBRE DEL EQUIPO	CANTIDAD
Tinaco vertical, marca Bioplás® modelo estándar tricapa, con una capacidad de 1100 litros, con un diámetro de 1.08 m, una altura de 1.42 m, y con un peso de 21 kg	1
Taladro	1
Piedra pulidora	1
Brocas finas	2 (5/16", 1/2")
Brocas Circulares	4 (3 1/2", 2 1/2", 3/4" y 7/8")
Cinta métrica	1
Regla de madera de 1 m	1
Lija de plomero	3
Hoja de segueta	1
Segueta	1
Martillo	1
Mazo de hule	1
Flexómetro	1
Regla de 30 cm	1
Desarmador	1
Pistola de calor	1
Marcador	1
Llave Stilson	1
Bicolor	1
Matraca mecánica	1
Dado mecánico de 3/4"	1

Cuadro 7. Equipo utilizado en el biodigestor anaerobio.

4.6. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIONES AL CONTENEDOR Y ENSAMBLE DE ACCESORIOS

Se realizaron las perforaciones correspondientes al contenedor y posteriormente se procedió a ensamblar los accesorios (Anexo 1) que forman partes de las estructuras que irían montadas en dichas perforaciones y que le dan la funcionalidad al biodigestor. Las estructuras de ensambles se dividen en seis partes y son las siguientes: influente, efluente, salida o extracción del biogás, boca de visita para el monitoreo, salida para el sistema de homogenización y base o eje para el sistema de homogenización.

4.6.1. Influyente

Esta perforación servirá para instalar los accesorios (Cuadro 8) del influente o entrada de material orgánico.

Se realizó a una distancia de 44 centímetros de la base del tinaco, por su parte exterior. Primero se dibujó con un marcador el círculo en donde iría el orificio, después se perforó con ayuda del taladro y broca fina de 1/2" hasta conseguir un agujero pequeño para marcar el punto central, en donde luego se realizó una perforación de 2", el cual posteriormente sirvió posteriormente para montar las brocas circulares (Figura 11).



Figura 11. Calcado e inicio de la perforación del influente con brocas finas.

Enseguida se procedió a agrandar el orificio con broca circular de 3 1/2", hasta obtener un agujero de 3 1/2". Una vez tenida la perforación, se afinaron detalles con ayuda de la piedra pulidora (quitar rebabas) y también con este mismo artefacto se agrandó la perforación hasta llegar a una medida 4" (Figura 12).

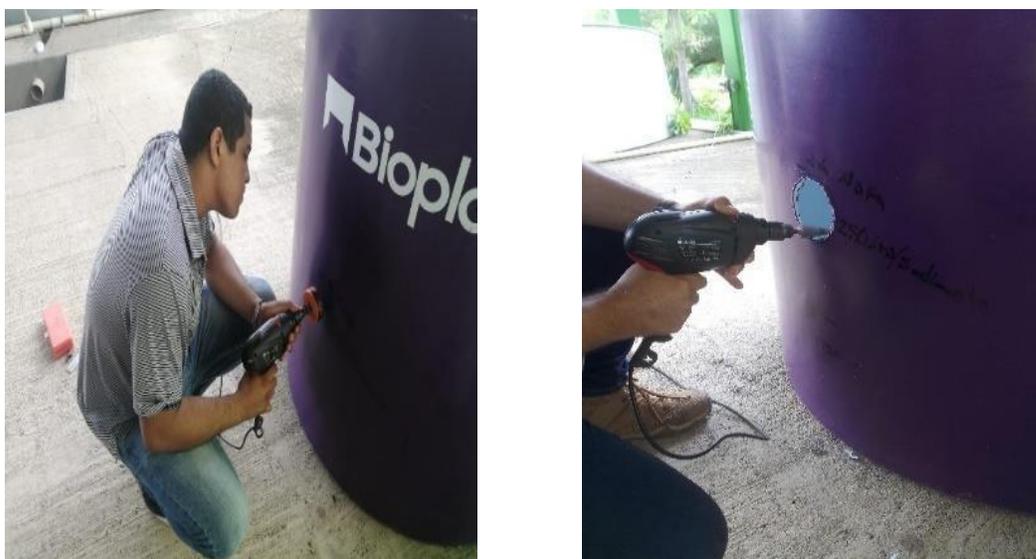


Figura 12. Ampliación del orificio con broca circular y desbaste con ayuda de piedra pulidora.

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIAL	CANTIDAD
Cree macho de PVC de 4"	1
Codo de PVC de 4"	1
Tramo de tubo hidráulico de PVC de 4" x 130 cm de largo	1
Tapón sanitario para tubo de PVC de 4"	1
Silicón gray para juntas automotrices	1
Pegamento para PVC	1

Cuadro 8. Materiales de la estructura del influente

Se lijó, y se hicieron ranuras, con ayuda de lija y hoja de segueta, alrededor del borde de la perforación A), por dentro y fuera del contenedor, todo esto con el fin de que pegasen bien las estructuras.

Después se introdujo el cree macho en la perforación A) por el exterior del contenedor y se le añadió una abundante cantidad de sellador para juntas automotrices, con el propósito de prevenir fugas. Esto se realizó por dentro y fuera del contenedor, posteriormente se dejó antes de instalar el resto de la estructura (Figura 13).



Figura 13. Pegado de la rosca de seguridad de PVC y el cree macho de PVC.

Después se le pegó el codo de PVC de 4" con pegamento de PVC. Posteriormente, al codo de 4", se le unió el tramo de PVC de 4" de 130 cm de largo. Por último, se le ensambló el tapón de PVC en el tubo de 4" al tramo de PVC de 130 cm. (Figura 14).



Figura 14. Ensamble del tubo de PVC de 130 cm y roscado del tapón.

4.6.1. Efluente

La perforación del efluente serviría posteriormente para añadir la tubería de 4" (Cuadro 9), que tendría la función de ser el efluente o salida de la materia orgánica. El proceso para hacer esta perforación es igual al procedimiento de la perforación A) o influente, pues el orificio también es de 4" y se hizo al lado opuesto de la perforación A). (Figura 10)

Se realizó una perforación al exterior del reactor, a 98 cm de la base del contenedor. El primer paso consistió en dibujar en el lugar donde iría la perforación un círculo 4", luego se realizó con ayuda de un taladro y broca fina, un pequeño orificio en el centro del círculo previamente dibujado.

El siguiente paso consistió en cambiar la broca fina al taladro por broca circular o sacabocados de 3 1/2". Cuando finalmente se obtuvo una perforación de 3 1/2", se añadió al taladro la piedra pulidora para afinar detalles del borde de la perforación (quitar rebabas y redondear bien el círculo) y agrandar el círculo hasta llegar a la medida exacta de 4" (Figura 15)



Figura 15. Proceso de la perforación B).

MATERIALES	
NOMBRE DE ACCESORIOS	CANTIDAD
Rosca de seguridad de PVC de 4"	1
Cree macho de 4"	1
Tramos de tubo de PVC de 4"	2 (17.5 cm y 28 cm)
Codos de PVC de 4"	2
Silicón Gray para juntas automotrices	1
Pegamento para PVC	1

Cuadro 9. Materiales de la estructura instalada en la perforación B)

Se fabricó una rosca de seguridad de 4", para esto se cortó un centímetro de la rosca del cree hembra de 4" con ayuda de una segueta. Posteriormente se desgastó el área de la perforación B), con ayuda de una lija para plomero y una hoja para segueta, en donde iría la cañería que corresponde al efluente, con el propósito que las estructuras queden bien adheridas al pegamento.

Después de colocó la rosca de 4" por la parte interior del contenedor, en la perforación B), y se agregó abundante sellador gray abarcando toda el área circundante de la perforación con la finalidad de evitar fugas. Enseguida se enroscó el cree macho de 4" desde la parte exterior, para esto se hicieron ranuras al interior de las cuerdas de ambos accesorios para que hubiera una mayor adherencia entre ambas superficies.

Luego se pegó el tramo de PVC. H. de 17.5 cm previamente lijado de ambos extremos al cree macho de 4" (Figura 16).



Figura 16. Ensamble de la rosca interna de seguridad, el cree macho y el tramo de PVC.

Se desgastaron con ayuda de lija y hoja de segueta los extremos del tramo de PVC. H. de 4" de 28 cm, así como los dos codos de 4" PVC. H. Luego se procedió a pegar los dos codos al tramo de 28 cm, cada codo pegado en cada extremo del tramo. Para finalizar se unió esta estructura a través de uno de los codos a la estructura anteriormente pegada en el contenedor por medio del tramo de PVC. H. de 4" de 17.5 cm (Figura 17).



Figura 17. Ensamble de la estructura del efluente

4.6.3. Salida o extracción del biogás

Este orificio está ubicado en el cuello del contenedor, a 3 cm hacia abajo del borde de la tapa. Tiene una medida de 3/4", No se necesitó hacer una perforación como tal, pues se usó el orificio que trae de fábrica y que sirve para la tubería (Cuadro 10) del suministro de agua para el tinaco, en la cual se ensamblaron los accesorios que corresponden a la salida del biogás.

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIALES	CANTIDAD
Cree macho de PVC hidráulico de 3/4"	1
Cree hembra de PVC hidráulico de 3/4"	1
Silicón Gray para juntas automotrices	1
Silicón para PVC	1

Cuadro 10. Materiales de la estructura de la extracción del biogás.

Con ayuda de lija y hoja de sequeta se desgastó alrededor del orificio, tanto por la parte exterior, como por la interior del contenedor (Figura 18).



Figura 18. Desgaste de la perforación C) por dentro y fuera del contenedor.

Luego se instaló el cree hembra de PVC de 3/4" por la parte interior del contenedor, posteriormente se dispuso el cree macho de PVC de 3/4" por la parte exterior del contenedor, no sin antes haberle puesto una abundante cantidad de pegamento para PVC en las cuerdas de ambos crees, y enroscando hasta que quedase bien sellado.

Como último paso se puso una abundante cantidad de silicón Gray alrededor de los crees previamente instalados, tanto por el interior como al exterior del contenedor, esto para evitar posibles fugas (Figura 19).



Figura 19. Ensamble de los crees macho y hembra.

4.6.4. Pozo de visita o monitoreo del reactor

El propósito de esta perforación es el de instalar los accesorios que corresponden a la estructura (Cuadro 11) para monitoreo del proceso de generación del biogás, debido a que se introducirán aparatos para medir diferentes parámetros y verificar el proceso por medio de toma de muestras.

Se realizó esta perforación a 5 cm del borde de la tapa, hacia el interior de ésta. Se remarcó el área del orificio, luego con una broca circular de 3/4" se perforó el área y se afinaron detalles del borde del orificio con una lija de plomero. (Figura 20). La perforación D) tiene la función de monitoreo y toma de muestras del biodigestor anaerobio.

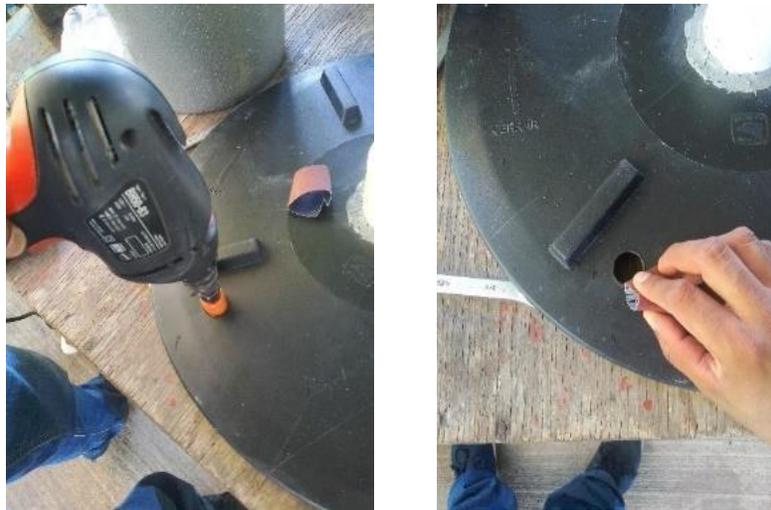


Figura 20. Perforación del orificio que corresponde al pozo de visita o monitoreo del reactor

MATERIALES	
NOMBRE DE LOS MATERIALES	CANTIDAD
Crees de PVC H. machos de 3/4"	2
Cree de PVC H. hembra de 3/4"	1
Tapón de PVC H. con rosca	1
Tramo de PVC de 3/4"	1
Silicón Gray para juntas automotrices	1
Pegamento para PVC	1

Cuadro 11. Materiales para la estructura del monitoreo y toma de muestras.

Para el ensamble y construcción del dispositivo de monitoreo se procedió a lijar ambos extremos del tramo de PVC H. de 3/4" con hoja de segueta y lija de plomero, luego se pegó con pegamento para PVC uno de los crees machos de 3/4" en uno de los extremos del tramo de 3/4", el otro extremo quedó libre para ser pegado posteriormente. Después se le enroscó el tapón al cree macho de 3/4" previamente ensamblado. (Figura 21).



Figura 21. Desgaste de los extremos del tubo de PVC. H. y pegado de los crees macho y hembra.

Posteriormente se lijó la superficie ubicada alrededor de la perforación D), por ambos lados de la tapa, para esto se usó lija de plomero y hoja de segueta. Luego se introdujo el otro cree macho de 3/4" en la perforación desde la parte interior de la tapa y se añadió abundante silicón gray para juntas automotrices alrededor de la perforación y el cree instalado, por ambos lados de la tapa. (Figura 22).



Figura 22. Lijado alrededor de la perforación e instalación del cree macho visto por fuera y dentro de la tapa.

Una vez seco y bien fijado el cree macho a la tapa, se le enroscó el cree hembra de 3/4" desde la parte exterior de la tapa, no sin antes haberles aplicado una abundante cantidad de pegamento para pvc en ambas cuerdas de los crees (hembra y macho) dándoles vueltas hasta que quedara bien enroscados los crees. Posteriormente se le añadió silicón para juntas automotrices alrededor de ambos crees por dentro y fuera de la tapa.

Para finalizar, se lijó el cree hembra de 3/4" instalado a la tapa, con ayuda de lija y hoja de segueta. Posteriormente se pegó el tramo de tubo de PVC H. de 3/4" con pegamento para PVC. (Figura 23).



Figura 23. Desgaste del cree hembra y empinado del tramo de 3/4" al cree hembra antes instalado.

4.6.5. Salida del sistema de homogenización

El propósito de la perforación E), es para instalar los accesorios (Cuadro 12) que van ensamblados en ambos lados de la tapa, que conforman la estructura de salida del sistema de homogenización y además tiene como función de ser el estabilizador para el sistema de homogenización y sirve como sello hidráulico para evitar la fuga del biogás, este proceso de instalación de artefactos se hablará en otro apartado posterior.

Primeramente, se procedió a obtener el centro de la circunferencia de la tapa, esto se hizo por medio del método de dibujar tres líneas hasta formar un triángulo rectángulo, con el objetivo de obtener el diámetro del círculo. Una vez tenido el centro de la tapa se realizó una perforación con ayuda de un taladro al cual se le añadió primeramente una broca fina (5/16") en el centro de la tapa del contenedor, y una vez hecho el orificio, se le cambió al taladro por una brocasierra, para hacer un orificio más grande. (Figura 24).



Figura 24. Trazo y perforación del centro de la tapa con brocas finas y circulares.

Luego se terminó de afinar los detalles de la perforación con ayuda de una piedra pulidora hasta obtener un orificio de 2" (Figura 25).



Figura 25. Desbaste del orificio con apoyo de la piedra pulidora.

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIALES	CANTIDAD
cree de PVC H. de 2" macho	1
cree de PVC. H. de 2" hembra	1
Tramo de tubo de PVC. H. de 2" de 31 cm	1
Pegamento para PVC	1
Silicón Gray para juntas automotrices	1

Cuadro 12. Materiales de la estructura de la salida del sistema de homogenización.

Se lijó alrededor de la perforación por ambos lados de la tapa, con ayuda de lija y hoja de segueta. La función de esto es que el silicón gray se adhiera mejor sobre la superficie rugosa. (Figura 26).



Figura 26. Desgaste de la superficie aledaña a la perforación.

Se lijó el cree macho de 2" con ayuda de lija y luego de segueta, esto se realizó en la parte interior del cree que es donde iría ensamblado el tramo de PVC. (Figura 27) Posteriormente se introdujo este tramo a la perforación E) desde el interior de la tapa y se fijó con sellador Gray para juntas automotrices, por dentro y fuera de la tapa. (Figura 28).



Figura 27. Lijado de cree macho



Figura 28. Materiales y ensamblado del cree macho a la tapa

Luego se lijó el tramo de PVC de 31 cm de 2" y se pegó al cree macho de 2". Para finalizar se enroscó el cree hembra al cree macho anteriormente instalado a la tapa. Antes de roscar estos dos accesorios, se les aplicó pegamento para PVC, en las roscas con el propósito que se mantuviesen bien unidos (Figura 29).



Figura 29. Pegado del tubo de PVC al cree macho de 2" y posterior unido al cree hembra a la tapa y cree macho

4.6.6. Base o eje para el sistema de homogenización o centrífugo

La perforación A), serviría posteriormente para instalar los accesorios (Cuadro 13) que dan base y soporte del sistema de homogenización lo que permite que gire sobre su propio eje cuando se realice el movimiento desde al exterior de la tapa.

Se realizó un orificio de 1/2" en el centro interior de la base del contenedor. Para ello se utilizó un taladro y una broca fina de 1/2". (Figura 30).



Figura 30. Detalle de la ejecución de la perforación F)

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIAL	CANTIDAD
Placas de 16 x16 cm elaboradas de tramo de tubo sanitario reforzado de PVC H. de 6"	2
Tapón de PVC de 2"	1
Tornillo de 3/4" con rondana y tuerca de Presión	1
Tramo de tubo de PVC H. de 18 cm	1
Pegamento para PVC	1
Sellador Gray para juntas automotrices	1

Cuadro 13. Material para elaborar la base o eje del sistema de homogenización

El primer paso consistió en elaborar placas planas que tienen como objetivo de ser la base y refuerzo para el sistema de homogenización y para evitar fugas. Se tomó un tramo de tubo de 6" y se corta con una sega por la mitad. Una vez que se ha cortado el tubo se procede a ablandarlo con ayuda de una pistola de calor por todas las superficies del tubo tanto por los bordes como al interior, luego se extiende dándole golpeteos con un martillo y un mazo de hule mientras el calor de la pistola ablanda el plástico. (Figura 31).



Figura 31. Proceso de cortado de tubo de PVC de 6" y posterior ablandado y aplanado de las placas

Posteriormente se cortaron las placas de pvc ya extendidas que tienen una medida de 16 cm x 16 cm. Al final se les hizo unas líneas transversales de esquina a esquina en la placa con un marcador para centrar donde se haría el orificio (Figura 32).



Figura 32. Cortado de las placas y trazado y obtención del punto central en donde irían los orificios

Una vez hechas las placas se procedió a ensamblar el resto la estructura que corresponde a la perforación F). Como primera medida, se desgastó alrededor del borde de la perforación F), justo donde irían las placas, tanto por la parte interior como por la parte exterior del tinaco (Figura 33).



Figura 33. Desgaste del área ubicada alrededor del tapón que es donde irían las dos placas, una por dentro y otra por fuera del contenedor.

Luego se lijó el tapón de 1/2" por la parte exterior, este desgaste servirá para que el silicón gray quede bien adherido al tapón. posteriormente se le hizo un orificio en el centro del tapón. Para esto se realizó un pequeño orificio en el centro del tapón con ayuda de un clavo de 1" y martillo, y luego sobre este orificio pequeño se terminó de perforar con ayuda de un taladro y broca de 1/2" (Figura 34).



Figura 34. Lijado del tapón y perforación con ayuda de tornillo y taladro.

Se insertó el tornillo de 3/4" y la rondana por la perforación del tapón, desde la parte interior del mismo, para esto se apretó el tornillo con ayuda de matraca mecánica y dado de 3/4". Una vez hecho esto, se cruzó el tornillo en el orificio de una de las placas de 16 x 16 cm y se aplicó abundante sellador gray entre el tapón y la placa (Figura 35).



Figura 35. Introducción del tornillo y rondana en el tapón.

Enseguida, se cruzó el tornillo ya pegado en el tapón y placa por el orificio del tinaco, que es la perforación F), esto se realizó desde adentro del contenedor, posteriormente se apretó el tornillo ya fijo en el tinaco y el resto de las piezas (tapón y placa) con ayuda de una matraca y dado de 3/4" y se le aplicó abundante sellador gray para juntas automotrices (Figura 36).



Figura 36. Aplicación del sellador al tapón que posteriormente iría unido a la placa de 16 x 16 cm, instalación del tapón ya ensamblado al tornillo y placa visto desde el interior del contenedor.

Por la parte exterior del tinaco, en la perforación se cruzó al tornillo que sobresalía desde adentro del tinaco a la placa de PVC de 16 cm x 16 cm y luego se enroscó la tuerca de presión, enseguida se apretó con la extensión y dado. Como paso final se procedió a sellar y pegar bien las estructuras todo esto aplicando el silicón gray (Figura 37).



Figura 37. Añadido de la segunda placa al tornillo sobresaliente desde la parte interior del tinaco, y posterior anexión de la tuerca de presión y sellador gray.

Se lijó el tubo de PVC H. de 18 cm de un extremo y se ensambló con pegamento para PVC dentro del tapón previamente fijado al contenedor. Cabe recordar que el tapón ya se había lijado previamente en el área de pegado. Este tubo evitará que el sistema centrífugo se salga del eje.

4.7. SISTEMA DE HOMOGENIZACIÓN

En esta sección se aborda el tema de la construcción e instalación de los accesorios (Cuadro 14) del sistema de homogenización (Anexo 3), para ellos también se fabricaron las aspas.

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIALES	CANTIDAD
Cruces de PVC H. de 1/2"	3
Tramos de PVC H. de 1/2" para la base y/o eje del sistema de homogenización (20 cm, 33 cm, 39 cm y 42 cm)	4
Tee de PVC H. de 1/2"	1
Tramos de PVC H. de 1/2" de 21 cm c/u (para la Tee)	2
Tapones para tubo de PVC de 1/2"	2
Tramos de tubos sanitarios reforzados de PVC. H. de 6" de 33 cm c/u	3
Creos de PVC H de 1/2" macho	6
Creos de PVC. H. de 1/2" hembra	6
Tramos de tubos PVC de 1/2" de 35 cm de largo para los brazos de aspas	6
Pestañas fabricadas de fragmentos de PVC H. de 6" de 9 cm de largo x 2 cm de ancho	6
Cintos de plástico con cierre de 28 cm	50
Pegamento para PVC. H.	1

Cuadro 14. Materiales del sistema de homogenización.

La primera operación que se realizó antes que todo fue el proceso de construcción y ensamble de aspas. Se lijó uno de los extremos del tubo de PVC H. de 2", luego se ensambló con ayuda de pegamento para PVC uno de los crees, en el extremo previamente lijado. Se repitió este mismo procedimiento con el resto de los 5 tubos restantes de PVC de 2", que corresponden a las aspas. Cabe recalcar que de los 6 tubos de PVC de 2", tres llevarán crees machos y tres crees hembras.

Se cortaron los 3 tubos reforzados sanitarios de PVC H. de 6" a lo largo de este mismo, de tal manera que salieran 6 aspas de 33 cm de largo, que se usarían posteriormente para el sistema de homogenización (Figura 38).



Figura 38. Cortado de los tubos de 6", para la realización de las aspas.

Luego se realizó un corte rectangular en uno de los extremos del tubo sanitario reforzado de 6" x 33 cm de largo, dejándosele en el medio de este corte una pestaña de 6.5 cm de largo x 2 cm de ancho (Figura 39).



Figura 39. Realización de las pestañas que formaron parte de las aspas.

Se tomó uno de los tubos de PVC H. de 2" x 35 cm de largo y a una distancia de 7.5 cm de uno de los extremos de este tubo se le hizo una ranura de 5 cm de largo x 2.5 cm de ancho. Se repitió lo mismo para el resto de los tubos de 2" que corresponderían al brazo de las aspas.

Se elaboraron 6 pestañas con fragmentos de PVC H. 6", la medida que se les dio a dichas pestañas es de 9 cm de largo x 2 cm de ancho. Luego se les aplicó una alta temperatura con ayuda de una pistola de calor para que el plástico tuviera una maleabilidad adecuada y un mazo de hule con el propósito de doblar la pestaña por mitad (Figura 40).



Figura 40. Procedimiento de fabricación de las pestañas.

Se realizaron 12 orificios de entre 4 y 5 milímetros en el tubo sanitario reforzado de 6", compartidos en tres grupos de 4 orificios, los primeros 4 se hacen justo al lado de donde luego iría la pestaña, el otro grupo de cuatro orificios se hacen en la parte de en medio del tubo sanitario y los otros 4 se hacen en el otro extremo del tubo sanitario (Figura 41).



Figura 41. Realización de los orificios donde irían los cintos posteriormente.

Se entrelazaron el tubo de 1/2" y el tubo sanitario reforzado de 6", mediante la pestaña correspondiente del tubo de 6" insertándosela en la ranura hecha en el tubo de 2" (Figura 42).



Figura 42. Insertado de la pestaña (hecha en el aspa) a la ranura realizada en el tubo de 1/2".

Con pegamento para PVC, se pegan entre las dos estructuras previamente unidas (entrelazadas mediante la pestaña insertada en la ranura), es decir, el aspa de 6" y el tubo de 1/2", con el objetivo de reforzar la unión entre las dos piezas. Se repite lo mismo con el resto de las aspas y tubos de 1/2" (Figura 43).



Figura 43. Pegado de aspas y tubos de 1/2"

Se tomó la pestaña de PVC H. de 8.8 cm de largo x 2 cm de ancho hecha al principio de todo este proceso, se lijó y luego se le hizo orificios con ayuda de un taladro con el fin de que coincidieran los orificios a los anteriormente hechos al aspa de 6". Después se lijo el área del aspa donde posteriormente iría pegada la pestaña. Luego se pegó la pestaña con ayuda de pegamento para PVC, rodeando el aspa de 6" y el tubo de 2". Para finalizar se le amarró un cinto de plástico (Figura 44).



Figura 44. Lijado de la pestaña y ensamblado a las estructuras.

Para terminar, se tomaron 12 cintos y se atan por medio de los orificios, el aspa de 2" y el tubo sanitario reforzado de 6". Se repitió con el resto de las aspas y tubos (Figura 45).



Figura 45. Atado de los cintos a través de los orificios hechos en el aspa.

Una vez hechas las aspas se procedió a ensamblar lo restante del sistema de homogenización. Se lijaron todos los extremos de los tramos de PVC. H. de 2" así como los brazos inferiores y superiores de las cruces de 2", todo esto con ayuda de lija y hoja de segueta con la finalidad de que el pegamento se adhiriera mejor a las superficies (Figura 46).



Figura 46. Lijado de las piezas (crees).

Se procedió a pegarle los 4 tramos de PVC. de 1/2" a las 3 cruces de 1/2". Hay que aclarar que la dirección del ensamble de los crees fue de manera intercalada, es decir un cree macho, otro cree hembra, etc. Para que el girado de las aspas sea más eficaz (Figura 47).



Figura 47. Pegado de los crees a las cruces.

Primeramente, se unió el tramo de 20 cm a la primera cruz (A), luego a esta cruz se le unió el tramo de 33 cm, después este tramo se unió a la segunda cruz (B), posteriormente a esta cruz se le unió, el tramo de 39 cm, en seguida se unió este tramo a la última y tercera cruz (C) y para finalizar a esta cruz se le pegó el último tramo de 42 cm que es el que sale por fuera de la tapa del biodigestor (Figura 48).

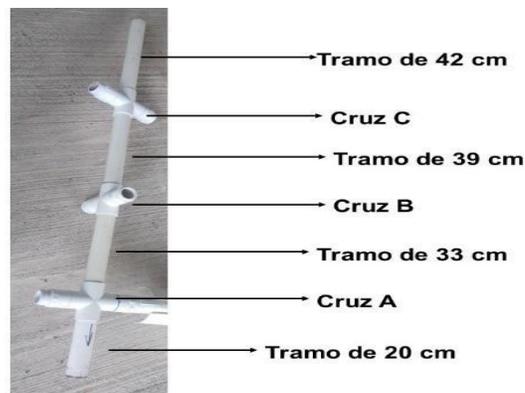


Figura 48. Sistema de homogenización, orden de unión de cruces y tramos.

Se lijaron los brazos laterales de las cruces, los cuales corresponden a dónde irían pegadas las aspas; del mismo modo se lijaron los crees. Una vez colocados los crees en las cruces, se enroscaron con los crees de las aspas. Hay que aclarar que los crees se colocaron de tal manera que quedarán de un lado crees machos y de otros lados crees hembras (Figura 49).

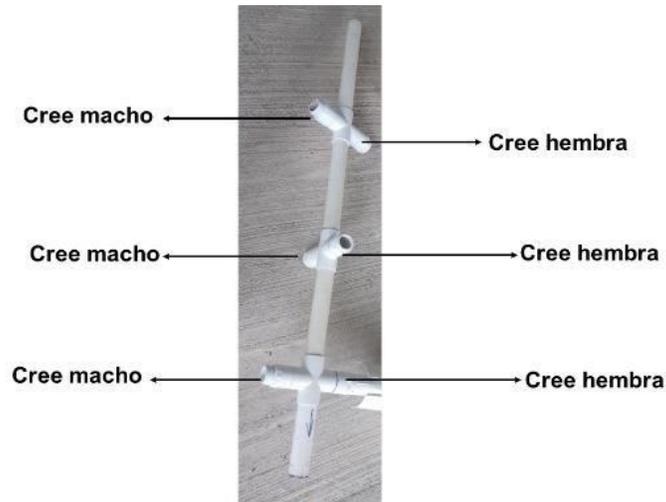


Figura 49. Orden de cómo se situaron los crees.

Se instaló la estructura del sistema de homogenización ya con las aspas puestas dentro del contenedor en el eje de rotación (Figura 50).



Figura 50. Instalación del sistema de homogenización, sobre el eje central del contenedor.

Se lijó la Tee de 1/2", los dos tramos de PVC. H. de 32 cm de 1/2", así como sus dos respectivos tapones de PVC de 1/2". Que corresponde al mecanismo de rotación exterior del sistema de homogenización, luego se pegó en los orificios laterales de la Tee los dos tramos de 32 cm y por último se enroscaron y pegaron los tapas para PVC H.

Al final se pegó toda esta armazón por medio de la Tee al tramo de PVC de 42 cm que sobresale por el orificio central de la tapa y que concierne al sistema de homogenización anteriormente instalado (Figura 51).



Figura 51. Proceso de construcción del mecanismo giratorio exterior del sistema de homogenización.

4.8. SELLADO HERMÉTICO DEL CONTENEDOR

En esta sección se aborda la construcción, ensamble de accesorios (Cuadro 15) para el sellado hermético del reactor, debido a que es fundamental que tenga las condiciones herméticas necesarias, para que el gas se mantenga dentro del contenedor.

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIALES	CANTIDAD
Sellador Gray para juntas automotrices	3
Tapa del tinaco	1
Arillo de ajuste de tapa de tinaco	1
Tornillos pija de 1"	8
Tapón roscable para tinaco 1/2"	1

Cuadro 15. Materiales utilizados para sellar el contenedor.

Se quitaron con ayuda del desarmador los ocho tornillos que trae de fábrica para luego poder retirarle el arillo de ajuste, que trae entre la tapa y el contenedor. Una vez quitado el arillo del contenedor se desgastó la superficie con lija de plomero y hoja de segueta (Figura 52).

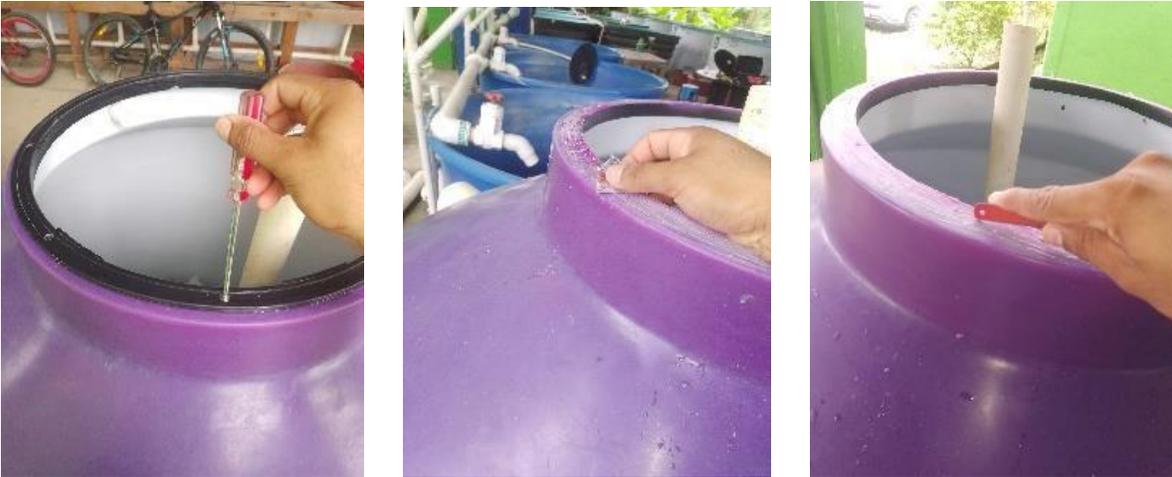


Figura 52. Retirado de los tornillos y desgaste de la boca del contenedor

Se lijó el arillo en sus dos superficies la superior e inferior, luego se aplicó abundante sellador gray en la boca del contenedor y se acomodó nuevamente el arillo verificando bien que los orificios del tinaco y del arillo coincidieran. Una vez hecho lo anterior se volvió a atornillar (Figura 53).



Figura 53. Lijado, ensamblado y atornillado del arillo.

Para finalizar se le aplicó nuevamente sellador gray al arillo previamente atornillado, y en el espacio que se forma en la superficie de la boca del contenedor donde el arillo no recubre, se acomodó la tapa del tinaco sobre el arillo y se cerró la tapa. Por último, se dejó secar (Figura 54).



Figura 54. Aplicación del sellador gray por el borde de la boca del contenedor y sellado de este mismo.

Por último, se colocó el tapón 1/2" roscable al tinaco. Para esto se aplicó abundante sellador Gray para juntas automotrices en las roscas del tapón y luego se apretó con ayuda de una llave Stilson (Figura 55).



Figura 55. Aplicación de sellador Gray y ensamble del tapón roscable.

Al sellar el contenedor se finalizó con la construcción del biodigestor anaerobio (Figura 56), el cual constó de 6 perforaciones y sus posteriores ensambles de materiales de cada parte del reactor las cuales son: influente, efluente, salida o extracción del biogás, pozo de visita o monitoreo del reactor, salida del sistema de homogenización, base o eje para el sistema de homogenización o centrífugo así también como el sistema de homogenización y finalmente el sellado hermético del reactor.



Figura 56. Finalización del biodigestor.

4.9. FILTRO DE REMOCIÓN DE ÁCIDO SULFÚDRICO

Será necesario construir un filtro para la remoción del ácido sulfúdrico, en esta sección se presentan los materiales y el proceso de elaboración (Cuadro 16).

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIALES	CANTIDAD
1 tuerca-unión de PVC H. de 2"	2
Tubo de PVC H. de 2" x 1 m de largo	1
Tubo de tubo de PVC de 3/4" x 1 m de largo	1
Reducción <i>Bushing</i> de PVC H. de 2" – 1 1/2"	2
Reducción <i>Bushing</i> de PVC H. 1 1/2" – 3/4"	2
Válvula de paso (de esfera) de PVC de 3/4"	1
Pegamento para PVC.	1
Limadura de hierro	1kg
Carbón activado granular	1 kg

Cuadro 16. Materiales del filtro de remoción del ácido sulfúdrico.

Se lijaron los extremos del tubo de PVC. H. de 2" x 1 m de largo, así como ambos lados de las dos tuercas uniones; posteriormente se aplicó pegamento para PVC (Figura 57) y se ensamblaron las tuercas-uniones de PVC H. de 2" una en cada extremo del tubo de PVC (Figura 58).



Figura 57. Lijado y aplicado de pegamento del tubo de PVC



Figura 58. Anexión del tubo de PVC H. a las tuercas-uniones

Se tomaron las cuatro reducciones *Bushings* de PVC H., es decir, las dos de 2" – 1/2" y las otras dos restantes de 1 1/2" – 3/4" y se lijaron por dentro y por fuera de cada reducción (Figura 59).



Figura 59. Lijado de las reducciones por el interior y exterior de estas mismas.

Posteriormente se ensamblaron con ayuda de pegamento para PVC las dos reducciones 2" – 1 1/2", una en cada tuerca unión. Luego se ensamblaron las otras dos reducciones de 1 1/2" – 3/4", en cada reducción de 2" – 1 1/2" (Figura 60).



Figura 60. Ensamblado de las reducciones.

Se cortó a la mitad el tubo de PVC H. de 3/4" x 1 m de largo, luego se lijaron ambos lados de los dos tramos resultantes. Después se ensambló cada tramo de 50 cm con pegamento para PVC en cada reducción de 1 1/2 – 3/4" (Figura 61).

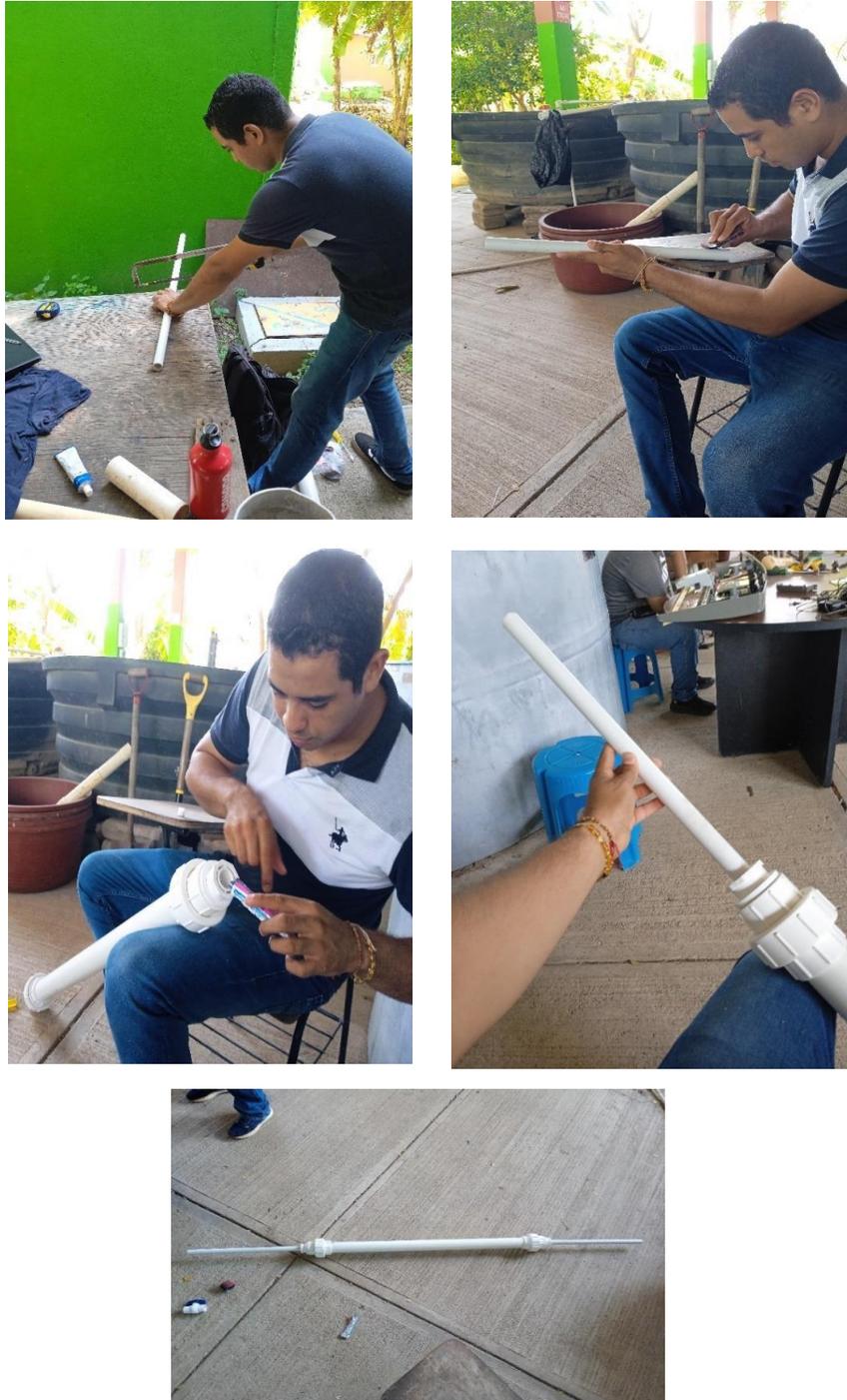


Figura 61. Cortado, lijado del tubo y ensamblado del tubo de PVC. H. a la reducción de 1 1/2" – 3/4".

Para finalizar se lijó al interior de la válvula de paso de 3/4" y se ensambló con ayuda de pegamento para PVC H. a uno de los extremos de tubo de PVC H. de 3/4" (Figura 62).



Figura 62. Lijado y ensamble de la válvula de paso al tubo de PVC. H.

Se desenroscó una de las uniones-tuercas y se le añadió la limadura de hierro y el carbón activado granulado, con el fin de que estos materiales ayuden a remover el ácido sulfhídrico (Figura 63).



Figura 63. Adición del carbón activado granulado y limadura de hierro en el filtro.

4.10. RESERVORIO DEL BIOGÁS

El reservorio del biogás es indispensable para el biodigestor pues es él en donde se almacena todo el gas que se esté produciendo. A continuación, se presentan los materiales y métodos para su fabricación (Cuadro 17).

MATERIALES	
NOMBRE DE MATERIALES	CANTIDAD
Bolsa de nylon, calibre 300. 1 m de ancho x 31 m de largo	1
Césped para lavamanos con su tuerca y empaque	1
Cámara de llanta usada de bicicleta	2
Tubo de PVC. H. de 1 1/2" de 60 cm	1
Carbón activado granulado	600 gr
Limadura de hierro	300 gr

Cuadro 17. Materiales del reservorio del biogás.

El primer paso consistió en cortar el tubo de PVC H. por mitad y posteriormente se lijaron ambos tramos de los tubos previamente cortados (Figura 64). Luego se procedió a recortar las cámaras de llanta a lo largo (Figura 65).



Figura 64. Recorte y lijado del tubo de PVC H



Figura 65. recorte de la cámara de llanta.

Luego Se tomó la bolsa por un extremo y se comenzó a plegar desde ambas orillas de la bolsa obteniendo una forma similar a la de un abanico o acordeón, hasta llegar en medio de la bolsa, llegado a este punto se puso uno de los tramos cortados de tubo y se reforzó con la cámara de llanta dándole varias vueltas, hasta quedar firmemente apretado (Figura 66), esto con propósito de que el biogás no se escape.



Figura 66. Plegado en las orillas de la bolsa y ajustado de la cámara de llanta.

Se le recortó al céspol las primeras cinco cuerdas esto con el fin de que quedara mejor ajustado a la tuerca (Figura 67). Se ensambló el céspol a 60 cm de uno de los extremos de la bolsa, para esto primero se cruzó el céspol a través del plástico, desde adentro de la bolsa (Figura 68); una vez hecho este procedimiento se instaló el empaque y enroscó la tuerca, por el exterior de la bolsa (Figura 69).



Figura 67. Césped junto a su tuerca y empaque



Figura 68. Recorte de la bolsa e introducción del céspol



Figura 69. Unión de la tuerca y el empaque a su céspol a través de la bolsa.

Se ensambló el tramo de tubo sobrante en el otro extremo de la bolsa que había quedado libre, siguiendo exactamente el mismo procedimiento que la vez anterior, es decir, hacer pliegues desde las dos orillas de la bolsa hasta el centro y luego colocar el tubo en medio y amarrarlo con cámara de llanta (Figura 70) (Figura 71).



Figura 70. Proceso de ensamble del segundo tramo de tubo en el otro extremo y amarre de la cámara de llanta.



Figura 71. Reservorio finalizado.

Se recomienda instalar el reservorio de manera vertical y para mayor protección agregar dos o tres capas más de bolsa de nylon calibre 300.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, Y. L., y Abreu, M. C. O. 2005. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Partel. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*.1(39): 35-48.
- Arrieta-Palacios, W. 2016. Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Tesis de ingeniería. Facultad de Ingeniería. Universidad de Piura. Piura, Perú.
- Arvizu L., J. y Huacuz M., J. 2003. Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. *Boletín IIE*. 4(27): 118-123.
- Barrera-Cardoso E. L., Odales-Bernal, L., Carabeo-Pérez, A., Alba-Reyes, Y. y Hermida- García, F. O. 2020. Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*. 2(40): 303-321.
- Bermúdez, J. J., Cánovas, M., Manjón, A., Iborra, J. L. y Howell, J. A. 1988. La digestión anaerobia. *Universidad de Murcia. Secretariado de Publicaciones*. España. Pp. 75.
- Briseño-Arciniega, L. A. 2017. Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía. Tesis de maestría. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. Santiago de Querétaro, México.
- Camacho-Botero, L. A. 2020. La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural colombiano. *Revista de ingeniería*.1(49): 38-51.
- Campos, E., Bonmatí, A., Teira, M. R., & Flotats, X. 2001. Aprovechamiento energético de lodos residuales y purines. Producción de biogás. *Jornades tècniques sobre energia*. :1-18.

- Castillo-Rodríguez, F., Roldán-Ruíz, M. A., Blasco-Plá, R., Huertas-Romera, M. J., Caballero-Domínguez, F. J., Moreno-Vivián, C. y Martínez-Luque-Romero, M. 2005. *Biotecnología Ambiental*. Editorial Tébar. Madrid, España. Pp. 592.
- Coello-Martínez, G. G. 2019. Diseño de un biodigestor para la producción de biogás a partir de la *Yucca Schidigera*. Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tuxtla Gutiérrez. Pp. 55.
- Cóndor-López, D. A. 2019. Producción de biogás y biol en biodigestores batch a partir de residuos agropecuarios pre-tratados con la técnica de bokashi. Tesis de ingeniería. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Coronel-Moreno, H. J. Producción de biogás y bioabono a base de estiércol de bovino en el Departamento del Cesar (Colombia). 2022. *Agricolae & Habitat. Revista de investigación Informativa. Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA*. Colombia. :1-12
- Corrales, L. C., Antolínez-Romero, D. M., Bohórquez-Macías, J. A. y Corredor-Vargas, A. M. 2015. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*. 24(13): 55-81
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGrawHill. Bogotá, Colombia. Pp. 776.
- De Heredia-Alonso, J. B., Torregrosa-Antón, J., González-Montero, T. y Domínguez-Vargas, J. R. 2004. Editorial @becedario. Pp. 235
- De la Merced-Jiménez, D. 2012. Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz.
- Departamento de sanidad de Nueva York. 2010. Manual de tratamiento de aguas. Limusa. México, D.F. Pp. 208

- Díaz-Báez, M. C., Espitia-Vargas, S. E. y Molina-Pérez, F. 2002. Digestión anaerobia: una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Pp. 168.
- Díaz-Fernández, J. M. 2018. Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de agua. Ediciones Paraninfo, S.A. España. Pp. 628.
- Echeverría-Echeverría, D. A. y Chamorro-Carrasco, E. A. 2018. Proyecto de un biodigestor para vivienda rural. Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en construcción. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile.
- Elías-Castells X. 2012. Tratamiento y valorización energética de residuos. Editorial Díaz de Santos, S.A. España. Pp. 1255.
- FAO, MINENERGIA; PNUD, GEF. 2011. Manual de biogás. Proyecto CHI/00/G32. Santiago, Chile. Pp. 120.
- FAO. 2019. Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documentos Técnicos N° 12. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Buenos Aires, Argentina. Pp. 87.
- Febles-Patrón, J. L. y Hoogesteijn, A. 2010. Evaluación preliminar de la eficiencia en las lagunas de oxidación de la ciudad de Mérida, Yucatán. *Ingeniería*. 2(14): 127-137
- Ferrer, Y. y Pérez, H. 2010. Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 1(43): 9-20.
- Ferrer-Polo, J. y Seco-Torrecillas A. 2008. Tratamientos biológicos de aguas residuales. Alfaomega Grupo Editor. México, D.F. Pp. 188.
- Fundación Naturgy, Antolí-García, A., Milner-García, S. y Puchades-Rufino, L. 2021. Gas renovable. El futuro de la energía y el medio ambiente. Fundación Naturgy. Madrid, España. 1. Pp. 143

- García-Luna, A. 2014. Infraestructuras para establecer la implantación de cultivos UF0383. Ediciones Paraninfo, S. A. Madrid, España. Pp. 386
- García-Páez, V. 2015. Manual de biogás. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático. La Plata, Argentina. Pp. 44
- Gómez-López, E. N., Rodríguez-Reyes, J. S., Torres-Martínez, A. 2017. Implementación de un biodigestor para el aprovechamiento de residuos de las granjas porcinas en el municipio de Tibana. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia. Pp. 81.
- Gómez-Muñoz, S. 2012. Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular. Carazo - Nicaragua. Universidad Carlo III de Madrid. Getafe, España. Pp.98
- González-Cabrera, A. M. Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia. trabajo fin de máster en ingeniería ambiental. 2014. *Depósito de investigación. Universidad de Sevilla*. España. Pp. 99.
- Guevara-Vera, A. 1996. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú. Pp. 77
- Helguero-Gutiérrez, A., Bustillos-Peña, L., y Hernani-Díaz, J. G. Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol. 2018. *Revista Estudiantil AGRO- VET*. 2(2): 85-191.
- Hernández, F. M. 2015. Producción de biogás con suero de queso: Tratamiento y generación de energía renovable a partir de lactosuero. *Francisco M. Hernández. Buenos Aires, Argentina*. Pp. 44

- Hernández-Embate, A. J. 2013. El potencial de los biodigestores como una técnica sostenible para la producción de biogás en la comunidad indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Planeación urbana y Regional. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca de Lerdo.
- Herrero, J. M. Experiencia de transferencia tecnológica de biodigestores familiares en Bolivia. 2007. *Livestock Research for Rural Development*, 192(19). <http://www.lrrd.org/lrrd19/12/mart19192.htm>
- IDAE, AINIA y GIRO. 2011. Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020. IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Madrid, España. Pp.100
- IDAE y Besel, S. A. 2007. Biomasa: digestores anaerobios. Editorial IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Madrid, España. Pp. 43.
- Izaguirre-Mayoral, M. L., Labandera C. y Sanjuán J. 2009. Biofertilizantes en Iberoamérica, una visión técnica, científica y empresarial. *Editorial universitaria. La Habana, Cuba*. Pp. 104
- Izquierdo-Morán, J. V., Pauta-Ríos, R. C y Molina-Barbotó, V. A. 2020. Efluentes de biodigestores para la producción de bioabonos y biogás. *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación*. 6(5): 79-84.
- Jaramillo-Calderón, E. 2011. Propuesta de diseño de un biodigestor casero. Tesis de ingeniería. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México.
- Marín-Galván, R. 2003. Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas. Díaz de Santos. Madrid, España. Pp. 311
- Martí-Herrero, J. 2008. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. *GTZ-Energía*. Bolivia. Pp. 81

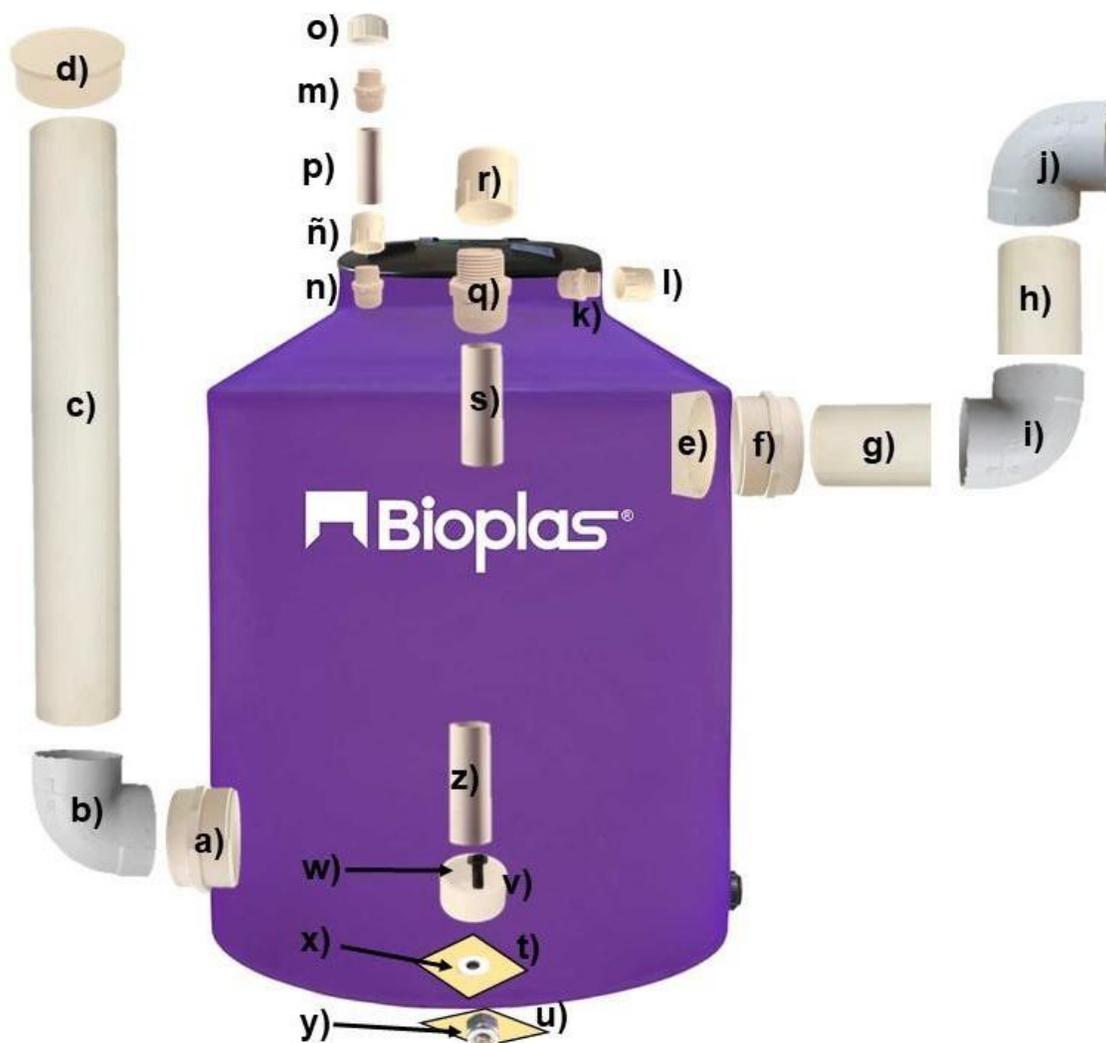
- Mesa de biogás. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino. 2010. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. Pp. 89.
- Montoya-Villafañe, H., H. 2008. Microbiología básica para el área de la salud y afines 2ª edición. Editorial Universidad de Antioquia. Colombia. Pp. 254.
- Moreno, J., Moral, R., García-Morales, J. L., Pascual, J. A. y Bernal, M. P. 2016. De residuo a Recurso. El camino hacia la sostenibilidad. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp. 29.
- Navarro-Ortiz, N. 2017. Potencial técnico para la producción de biogás generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Parra-Huertas, R., A. 2015. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*. 2(10): 142-159
- Ramalho, R. S. 2003. Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. Barcelona, España. Pp. 705
- Reyes-Aguilera, E. A. Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. 2018. *Revista Científica De FAREM-Estelí*. (24): 60-81.
- Rivas, C., y Mota, M. 2006. Bacterias anaerobias. Temas de Bacteriología y Virología Médica. *Oficina del Libro FEFMUR*. Uruguay. Pp. 355-380
- Rivas-Solano, O., Faith-Vargas, M., y Guillén-Watson, R. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. 2010. *Revista Tecnología en Marcha*. 1(23): 39-46
- Rodríguez-Uribe, C. A. 2016. Estudio de factibilidad para la implementación de biodigestores para el procesamiento de los residuos sólidos orgánicos en granjas avícolas. Trabajo de grado. Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia. Pp.48

- Romero-Rojas, J. A. 1999. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización, 3ª edición. Alfaomega Grupo Editor. México, D. F. Pp. 281
- Salamanca-Tamayo, J. A. 2009. Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor a Escala Piloto para la Generación de Biogás y Fertilizante Orgánico. Tesis de ingeniería. Universidad de San Francisco de Quito. Quito, Ecuador.
- Sanabria-Vindell, O. J, Sánchez-Melgara, A. E. y Rodas-Espinoza, Y. S. 2018. Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia a partir de aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasto y aserrín), en la ciudad de Estelí en el año 2017. Tesis de ingeniería. Facultad Regional Multidisciplinaria de Estelí. FAREM-ESTELÍ. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Managua, Nicaragua.
- Sarabia-Méndez, M. A., Laines-Canepa, J. R., Sosa-Olivier, J. A. y Escalante-Espinosa, E. 2017. Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 1(33): 109-116.
- SEMARNAT, SAGARPA y FIRCO. 2010. Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México. Pp. 46
- Silva-Rubio, L. A., Bermúdez-Huertas, A., Castiblanco-Rincón, D. A., Almario-Mayor, F., Mojica, P., Cuéllar, S., Medina, C. y Tamayo, A. 2014. Tecnologías relacionadas con biofertilizantes. *Universidad Pontificia Javeriana*. Bogotá, Colombia. Pp.131
- Vázquez-Valencia, L., Moreira-Acosta, J., Iglesias-Díaz, R. y Rojas-Gálvez, L. 2015. Diseño, construcción y evaluación de un sistema de purificación y compresión para biogás. *Lacandonia*. 2(9): 59-66.
- Weber, J. W. Jr. 2003. Control de la calidad del agua, Procesos fisicoquímicos. Editorial Reverté, S. A. Barcelona, España. Pp. 654

Winkler, M. A. 2007. Tratamiento biológico de aguas de desechos. Editorial Limusa. Mexico, D. F. Pp. 338.

VI. ANEXOS

ANEXO 1. ESQUEMA DE ENSAMBLE DE ACCESORIOS AL CONTENEDOR



❖ **Influente**

- a) Cree macho de 4"
- b) Codo de 4"
- c) Tramo de tubo hidráulico de PVC de 4" x 130 cm de largo
- d) Tapón sanitario para tubo de PVC de 4"

❖ **Efluente**

- e) Rosca de seguridad de PVC de 4"
- f) Cree macho de 4"
- g) Tramo de tubo de PVC de 4" de 17 .5 cm
- h) Tramo de PVC de 28 cm
- i) Codo A) de PVC de 4"
- j) Codo B) de PVC de 4"

❖ **Salida o extracción del biogás**

- k) Cree macho de PVC hidráulico de 3/4"
- l) Cree hembra de PVC hidráulico de 3/4"

❖ **Boca de visita (Monitoreo y toma de datos/muestras)**

- m) Cree de PVC H. machos de 3/4" A)
- n) Cree de PVC H. machos de 3/4" B)
- ñ) Cree de PVC H. hembra de 3/4"
- o) Tapón de PVC H. con rosca
- p) Tramo de PVC de 3/4"

❖ **salida del sistema de homogenización**

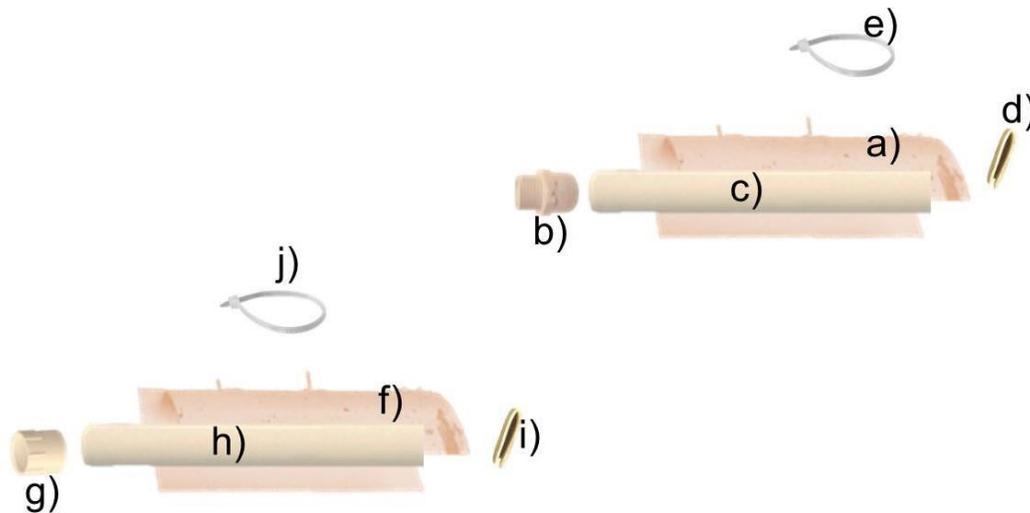
- q) Cree de PVC H. de 2" macho
- r) Cree de PVC. H. de 2" hembra
- s) Tramo de tubo de PVC. H. de 2" de 31 cm

❖ **Base o eje del sistema de homogenización**

- t) Placa de 16 x16 de PVC H. de 6" A)
- u) Placa de 16 x16 de PVC H. de 6" B)
- v) Tapón de PVC de 2"
- w) Tornillo de 3/4"
- x) Rondana para tornillo de 3/4"
- y) Tuerca de presión para tornillo de 3/4"
- z) Tramo de tubo de PVC H. de 18 cm.

ANEXO 2. ESQUEMA DE ENSAMBLE DE ACCESORIOS DE LAS ASPAS

Como se dijo anteriormente en el apartado de elaboración de aspas se diseñaron y fabricaron dos tipos de aspas unas con cree macho y otras con cree hembra, esto con la finalidad de que el giro de las aspas sea en más de una dirección y de esta manera asegurar un movimiento centrífugo que logre homogenizar todas las zonas del reactor. Hay que recordar que se realizaron seis aspas, tres aspas machos y tres hembras.



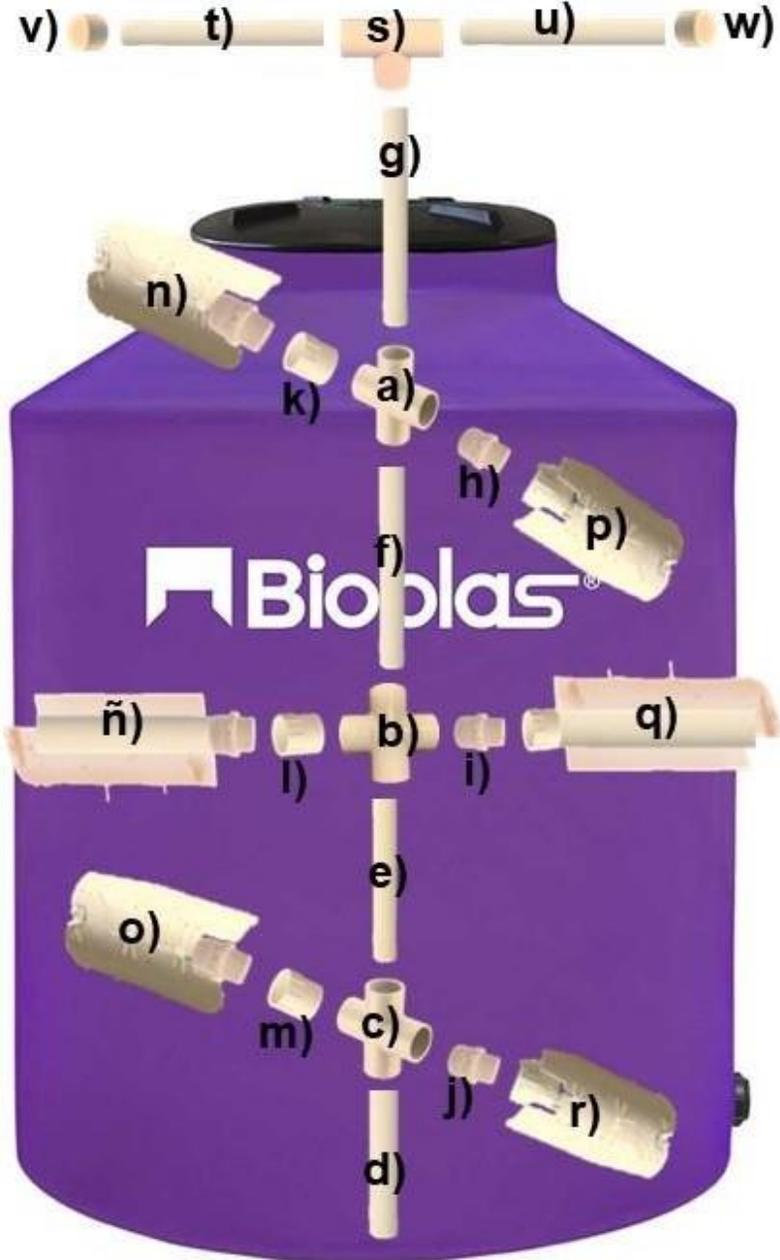
❖ Aspas macho

- a) 1 aspa fabricada con Tramo de tubo sanitarios reforzados de PVC. H. de 6" de 33 cm
- b) 1 cree de PVC H de 1/2" macho
- c) 1 tramo de tubo PVC de 1/2" de 35 cm de largo para los brazos de aspas
- d) 1 pestaña fabricada de fragmentos de PVC H. de 6" de 9 cm de largo x 2 cm de ancho
- e) 6 cintos de nilón con cierre de 28 cm.

❖ **Aspas hembra**

- f) 1 aspa fabricada con Tramo de tubo sanitario reforzados de PVC. H. de 6" de 33 cm
- g) 1 cree de PVC. H. de 1/2" hembra
- h) 1 tramo de tubo PVC de 1/2" de 35 cm de largo para los brazos de aspas
- i) 1 pestaña fabricada de fragmentos de PVC H. de 6" de 9 cm de largo x 2 cm de ancho
- j) 6 cintos de nilón con cierre de 28 cm.

ANEXO 3. ESQUEMA DEL ENSAMBLE DE ACCESORIOS DEL SISTEMA CENTRÍFUGO O DE HOMOGENIZACIÓN



- a) Cruz de PVC H. de 1/2" A)
- b) Cruz de PVC H. de 1/2" B)
- c) Cruz de PVC H. de 1/2" C)
- d) Tramo de tubo de PVC H. de 1/2" A) de 20 cm
- e) Tramo de tubo de PVC H. de 1/2" B) de 33 cm
- f) Tramo de tubo de PVC H. de 1/2" C) de 39 cm
- g) Tramo de tubo de PVC H. de 1/2" D) de 42 cm
- h) Cree macho de PVC H. de 1/2" A)
- i) Cree macho de PVC H. de 1/2" B)
- j) Cree macho de PVC H. de 1/2" C)
- k) Cree hembra de PVC H. de 1/2" A)
- l) Cree hembra de PVC H. de 1/2" B)
- m) Cree hembra de PVC H. de 1/2" C)
- n) Aspa macho de PVC H. de 1/2" ñ) Aspa macho de PVC H. de 1/2"
- o) Aspa macho de PVC H. de 1/2"
- p) Aspa hembra de PVC H. de 1/2"
- q) Aspa hembra de PVC H. de 1/2"
- r) Aspa hembra de PVC H. de 1/2"
- s) Tee de PVC H. de 1/2"
- t) Tramo de PVC H. de 1/2" A) de 21 cm para la Tee
- u) Tramo de PVC H. de 1/2" B) de 21 cm para la Tee
- v) Tapón de PVC H. de 1/2" A)
- w) Tapón de PVC H. de 1/2" B)

ANEXO 4. COLECCIÓN DE FOTOGRAFÍAS DE EQUIPO USADO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR



ANEXO 5. COLECCIÓN DE FOTOGRAFÍAS DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN



