



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA
DE CONSTRUCCIONES**

**Elaboración del modelo físico y la guía metodológica para el
ensayo de digestores anaerobios de la asignatura
Hidrosanitaria de la Universidad Del Azuay**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN
GERENCIA DE CONSTRUCCIONES

Autores:

CARLOS ANDRES MINCHALA VEGA

JOSÉ ABRAHAM ORDÓÑEZ AGUILAR

Director:

JOSÚE BERNARDO LARRIVA VÁSQUEZ

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

A Dios, por estar siempre para mí, por ayudarme a salir adelante en los momentos complicados y ser un guía en mi vida.

A mis padres, Orlando y Margarita, por ser mi apoyo incondicional, mi ejemplo de vida, por ayudarme y motivarme a cumplir este anhelo, demostrándome su apoyo en cada paso dado, y brindándome fortaleza en mis fracasos.

A mi hermano, Xavier, por acompañarme siempre, y a toda mi familia, que siempre estuvo a mi lado, apoyándome incondicionalmente a lo largo de estos años.

A mis amigos, por estar siempre en las buenas y en las malas, por su compañía y amistad a lo largo de esta etapa.

Carlos Minchala Vega

A Dios, siempre ha estado a mi lado dándome fuerzas en los momentos más duros, con sabiduría, entendimiento y pasión.

A mis padres, especialmente a mi padre Nelson Ignacio Ordóñez Paredes no solo el mejor papa sino el mejor hombre que pude conocer, el cual ya no está con nosotros pero me dejó el mejor legado a ser un hombre de bien, siempre sabiendo perdonar y amar con toda la pasión lo que uno hace, a mi madre Dorila Del Carmen Aguilar Cabrera la mujer más bella sobre la tierra quien desde pequeño me enseñó a ser fuerte y saber esmerarme por lo que me gusta, conjuntamente me enseñaron a valorar hasta los más mínimo.

A mis hermanos, Henry Nelson, Juliana y Belén, a quienes amo con mi vida y nunca me han faltado siendo pilares de mi vida.

A mis familiares y amigos, sobre todo a mi enamorada Carolina, quienes han estado para mí en estos momentos más duros y de la misma manera yo seré recíproco con ellos.

José Abraham Ordóñez Aguilar

AGRADECIMIENTO

A Dios por siempre estar nuestro lado en los momentos más difíciles siendo la guía y el apoyo en cada instante.

A la universidad del Azuay, por darnos las pautas necesarias y la oportunidad de ser parte de ella y formarnos como profesionales y personas de bien en servicio de la comunidad.

Le vamos a ser eternamente agradecidos al Ing. PhD. Josué Bernardo Larriva Vásquez por su dirección, apoyo y dedicación, que nos ha brindado, por medio de sus conocimientos reflejados en nuestra tesis y por tenernos presentes en este proyecto.

A los miembros del tribunal designado, Ing. Belén Arévalo e Ing. Cesar Arévalo, por brindarnos de su tiempo en la revisión y corrección del presente trabajo.

Por último, a cada uno de los docentes que nos formaron no solo como Ingenieros sino como personas de bien, generando ese espíritu de rectitud, por medio de sus conocimientos y experiencias, para crear futuros profesionales de alto nivel.

Carlos Andrés Minchala Vega
José Abraham Ordoñez Aguilar

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
ANTECEDENTES	1
Introducción	1
Problemática	1
Justificación	2
Objetivos específicos	2
Alcances y resultados	3
CAPITULO I	4
MARCO TEORICO	4
1.1. Digestores anaerobios	4
1.1.1. Definición de la hidrosanitaria	4
1.1.2. Digestores Anaerobios	5
1.1.3. Diseño de un reactor de digestión anaerobia	11
1.1.4. Área de tubería de entrada al reactor	11
1.1.5 Velocidad real	12
1.1.6 Caudal real	12
1.2 Elaboración de la guía metodológica.....	13

1.2.1 Definición de guía metodológica	13
1.2.2 Consideraciones generales	13
CAPITULO II.....	14
DISEÑO DEL ENSAYO DE LABORATORIO.....	14
2.1. Calculo.....	14
2.1.1. Elementos existentes en el digestor anaerobio.....	14
2.1.2. Dimensionamiento.	15
2.2. Construcción.....	26
2.3 Pruebas.....	39
2.4 Validación de datos.	43
CAPITULO III.....	46
GUIA METODOLOGICA PARA EL ENSAYO DE DIGESTORES ANAEROBIOS DE LA ASIGNATURA HIDROSANITARIA DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY	46
3.1 Ensayo de un reactor de digestión anaerobia.....	46
3.1.1 Objetivo.....	46
3.1.2 Alcance	46
3.1.3 Definiciones	46
3.1.4 Instrumentos.....	49
3.1.5 Metodología	49
3.1.6 Cálculos.....	51
3.1.7 Resultados	52
3.2 Elaboración de guías para la realización de ensayos	58
3.2.1 Ensayo en un digestor anaerobio	58
Conclusiones del capítulo 3.....	68
CONCLUSIONES.....	69
RECOMENDACIONES.	70
Bibliografía	71

ANEXOS 72

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1-1. Modelo de un digestor.	6
Figura 1-2. Proceso anaerobio.....	7
Figura 1-3. Tasa de crecimiento de microorganismos en función de la temperatura.....	9
Figura 1-4. Digestor Anaerobio de lodos.	10
Figura 1-5. Tubería PVC ½ pulgada.	11

CAPITULO II

Figura 2-1. Modelo físico (Vista frontal).	15
Figura 2-2. Tanque.	17
Figura 2-3. Base del reactor.	18
Figura 2-4. Reactor.	19
Figura 2-5. Campana y deflector.	20
Figura 2-6. Campana del modelo físico.	24
Figura 2-7. Isometría de la campana.	25
Figura 2-8. Estructura de soporte del modelo físico.	26
Figura 2-9. Composición del tanque de entrada.	27
Figura 2-10. Tanque de entrada.	28
Figura 2-11. Bomba.	28
Figura 2-12. Conexión de la bomba en el tanque.	29
Figura 2-13. Composición del tanque de salida.	30
Figura 2-14. Base del reactor.	31
Figura 2-15. Composición de la base del reactor.	31
Figura 2-16. Composición del reactor.	32
Figura 2-17. Vista frontal del reactor.	33
Figura 2-18. Vista frontal de la campana.	34
Figura 2-19. Campana del reactor.	34
Figura 2-20. Campana.	34
Figura 2-21. Vista frontal del conjunto.	35
Figura 2-22. Vistas laterales.	36
Figura 2-23. Vista en planta.	36
Figura 2-24. Isometría del modelo.	37

Figura 2-25. Recipientes utilizados.....	38
Figura 2-26. Prototipo 1.	39
Figura 2-27. Prototipo 2.	40
Figura 2-28 . Agua residual.....	40
Figura 2-29. Prototipo 2.	41
Figura 2-30. Marca de la abertura recomendada, de la llave de paso del tanque de entrada.	41
Figura 2-31. Putrefacción del agua tratada.....	42
Figura 2-32. Condiciones iniciales del sistema.	42
CAPITULO III	
Figura 3-1. Digestor anaerobio.....	47
Figura 3-2. Deflector.	48
Figura 3-3. Campana.	48
Figura 3-4. Curva de caudal acumulado.....	53
Figura 3-5. Curva de volúmenes medidos.....	54
Figura 3-6. Zonas del reactor.	57
Figura 3-7. Identificación de las zonas del reactor en el modelo real.....	57
Figura 3-8. Modelo físico.....	59
Figura 3-9. Modelo físico.....	60
Figura 3-10. Componentes del agua residual.	61
Figura 3-11. Conexión de la bomba.	61
Figura 3-12. Tanque de entrada.....	62
Figura 3-13. Bomba.....	62
Figura 3-14. Abertura de llave de paso 1.	63
Figura 3-15. Llave de paso del reactor.	63
Figura 3-16. Marcas de las alturas del reactor.	64
Figura 3-17. Tanque de salida.	65
Figura 3-18. Tratamiento de agua residual.....	65
Figura 3-19. Tanque de salida.	66
Figura 3-20. Agua tratada.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO II

Tabla 2-1. Caudal máximo y mínimo recomendado	16
Tabla 2-2. Dimensiones del modelo físico.....	43
Tabla 2-3. Listado de accesorios	44
Tabla 2-4. Detalles de la bomba.....	45

CAPITULO III

Tabla 3-1. Caudales.....	52
Tabla 3-2. Volúmenes medidos.....	54
Tabla 3-3. Cantidades de parámetros de entrada.....	55
Tabla 3-4. Cantidades de parámetros de salida	56

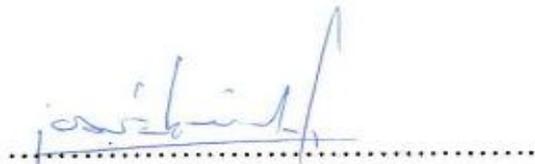
ÍNDICE DE ANEXOS.

ANEXO A. Determinación del caudal mínimo y máximo.	72
ANEXO B. Pruebas volumétricas en el modelo físico.	77

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el modelo físico y la guía metodológicas para la práctica de digestores anaerobios de la asignatura de hidrosanitaria. En el documento se detalla el fundamento teórico, cálculos, proceso de construcción y validación de datos del modelo físico que será utilizado para la práctica de laboratorio. Finalmente se desarrolla la guía metodológica a utilizarse para el desarrollo de la práctica, en la misma que se especifican los pasos a seguir y los resultados a obtenerse, a partir de los cuales, los estudiantes adquirirán las destrezas necesarias para la comprensión del funcionamiento de un digestor anaerobio.

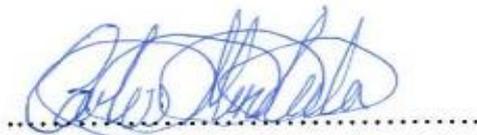
Palabras clave: sanitaria, digestor anaerobio, modelo físico, guías metodológicas.



Ing. Josué Bernardo Larriva V. PhD
Director del Trabajo de Titulación



Ing. José Fernando Vázquez C.M.Sc
Director de la Escuela



Carlos Andrés Minchala Vega
Autor

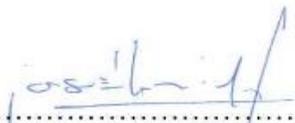


José Abraham Ordoñez Aguilar
Autor

ABSTRACT

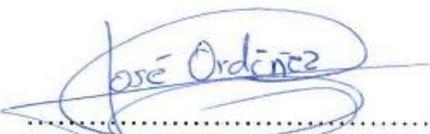
This work developed a physical model and a methodological guide for the practice of anaerobic digesters in Hydrosanitary. The theoretical foundation, calculations, construction process and validation of data of the physical model that will be used for the laboratory practice are detailed. Finally, the methodological guide for the development of the practice is presented. The guide specifies the steps to be followed and the results to be obtained so that students acquire the necessary skills to understand the functioning of an anaerobic digester.

Keywords: sanitary, anaerobic digester, physical model, methodological guides.

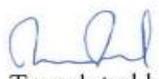

.....
Ing. Josué Bernardo Larriva V. PhD
Thesis Director


.....
Ing. José Fernando Vázquez C.M.Sc
Faculty Director


.....
Carlos Andrés Minchala Vega
Author


.....
José Abraham Ordoñez Aguilar
Author


Magariñe
UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas


Translated by
Ing. Paúl Arpi

ANTECEDENTES

Introducción.

La hidrosanitaria es la rama que se encarga de los estudios para la captación, distribución y tratamiento del agua después de su respectivo uso. Existe varios mecanismos para el tratamiento de aguas residuales; su implementación depende del lugar y la cantidad de residuos que será tratado.

Los digestores anaerobios son una gran opción para el tratamiento de aguas residuales, su funcionamiento es simple, además presenta varias ventajas tales como, una menor producción de lodos, no necesita oxígeno, menor tiempo de retención hidráulico, etc., también se puede aprovechar el biogás generado para la producción de energía.

En el presente trabajo se muestra el estudio y diseño de un reactor de digestión anaerobia, que explica detalladamente el cálculo del reactor, dimensionamiento, un modelo físico que muestra todo el proceso de operación de digestión anaerobia y finalmente una guía metodológica que servirá para las prácticas de laboratorio que se realicen sobre este tema.

Próximamente, la Universidad del Azuay dispondrá de un laboratorio de Hidráulica, esto será de gran ayuda para los estudiantes ya que, mediante las prácticas de laboratorio, reforzarán los conocimientos adquiridos a lo largo de cada curso relacionado con este campo.

Problemática.

La hidrosanitaria es una disciplina donde no basta con tener los conocimientos teóricos, sino también se debe combinar con la parte práctica para mejorar el entendimiento de cómo se comportan los fluidos y así poder utilizar estos conocimientos.

Uno de los elementos dentro de la hidrosanitaria son los digestores anaerobios, elementos que muchas veces es complicado entender su comportamiento sin tener un conocimiento previo, en caso de contar con una guía se facilita el desarrollo de la práctica de laboratorio.

Además de aprender a elaborar una práctica de estos digestores se debe entender qué es lo que está ocurriendo con el flujo, con el tipo de líquido que entra al digestor, ya que eso dependerá la calidad de tratamiento a la que se le someterá. Siendo esta la parte más complicada debido a que no se puede asumir que el diseño va a funcionar si no conocemos el comportamiento del sistema que estamos realizando. Todo esto ocurre debido a que no existen maneras didácticas para que el estudiante entienda y pueda observar el funcionamiento de los digestores anaerobios y mucho menos manuales o guías para la práctica de laboratorio de dicho sistema.

Justificación.

El motivo de este proyecto es contribuir con la Universidad del Azuay a equipar del laboratorio de Hidráulica, una rama en la que es necesario prácticas de laboratorio para un mejor entendimiento de los conceptos que se estudian a lo largo de la cadena de hidráulica.

Es muy importante conocer el funcionamiento de los mecanismos, como se dimensiona, sus parámetros de diseño, en qué se aplica, sus ventajas y desventajas, etc. con la finalidad de que los estudiantes conozcan a lo que se enfrentarán en su vida profesional. Los modelos físicos son de mucha importancia porque ayudan a entender el funcionamiento de los distintos mecanismos, estos cuentan con una guía metodológica, la que se detalla paso a paso el proceso que se debe seguir para realizar las prácticas de laboratorio.

Con esto se garantiza, que los estudiantes entiendan de mejor manera los conceptos vistos en clase, de una manera didáctica y sencilla al realizar las prácticas de laboratorio.

Objetivo general.

Elaboración del modelo físico y la guía metodológica para la práctica de un reactor de digestión anaerobia, utilizando agua residual sintética.

Objetivos específicos.

- Definir conceptos básicos sobre guía metodológica y digestores anaerobios.
- Construir un modelo físico que indique el funcionamiento del sistema en cuestión, manteniendo todos los parámetros constantes, salvo el tiempo de retención.

- Elaborar una guía metodológica de la práctica de laboratorio, en el que se utilizará una sustancia sintética.

Alcances y resultados.

El presente trabajo de titulación contendrá una descripción detallada, una ficha formato y los cálculos de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio concernientes a la asignatura de hidrosanitaria; para lo cual será necesario:

- Realizar el cálculo del caudal que va a llegar a la cámara del reactor de digestión anaerobia.
- Determinar la sección adecuada de la tubería de entrada al reactor.
- Conocer la sección del reactor.
- Medir la altura de agua provocado por el flujo vertical.
- Calcular el caudal real de salida a un tanque después de haberse realizado el tratamiento.
- Determinar el porcentaje de reducción de contaminación del flujo, que se da en el modelo físico.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1. Digestores anaerobios.

1.1.1. Definición de la hidrosanitaria.

Antes de hablar de los digestores anaerobios es necesario saber el área de donde se originan estos mecanismos.

La hidrosanitaria también conocida como sanitaria es la materia encargada de la captación, distribución y mantenimiento del agua, en el campo del mantenimiento se encuentran los sistemas de tratamiento, los cuales se pueden emplear en diferentes mecanismos, para ello es necesario tener el conocimiento del área en donde se van a poner en funcionamiento y cuál es el tipo de agua que se va a tratar.

Estaciones depuradoras de aguas residuales.

Previo a los digestores anaerobios se debe seguir una serie de tratamientos, a los que se deben someter las aguas residuales, por medio de procesos físicos, químicos y biológicos; estas estaciones tiene la finalidad de depurar aguas residuales, recolectando de una población o industria, y posteriormente reducir la contaminación para poder devolver el fluido hacia un cauce receptor como un río, embalse, mar, etc.

Recolección y conducción.

Las aguas residuales domiciliarias se transmiten por medio de un conjunto de tuberías, las mismas pueden fluir por bombeo o por gravedad. Generalmente, son sistemas que recogen conjuntamente aguas pluviales y sanitarias, siempre controlando el caudal y en caso de existir exceso, liberando caudal por medio de derivadores.

Pretratamiento y tratamiento primario.

Se da una primera limpieza del agua la cual se denomina pretratamiento, en este punto se elimina solidos gruesos, arenas y aceites por medio de desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado, respectivamente. Luego se procede al tratamiento primario que consiste en la decantación primaria, en este punto se da la eliminación de sólidos en suspensión que no se ha conseguido con el pretratamiento.

Tratamiento secundario.

Se procede a depurar el agua residual mediante una serie de importantes procesos de naturaleza biológica, que tienen en común la utilización de microorganismos para eliminar materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta y compuestos que contienen elementos nutrientes. (Lo Guzzo, 2017).

1.1.2. Digestores anaerobios.

Si bien existen diferentes procesos para tratar el agua, vamos a centrarnos en este trabajo en los digestores anaerobios; como su nombre lo expresa, anaerobios (sin oxígeno), son mecanismos que no tiene presencia de oxígeno en su funcionamiento, es decir se dan en una cámara cerrada.

Definición y uso.

Los digestores son mecanismos para depuración biológica de aguas residuales y residuos orgánicos fermentables, usados principalmente en zonas urbanas con temperaturas altas para la eliminación de sustancias orgánicas y compuestos químicos (Ruiz, Álvarez, & Soto, 2001).

La digestión anaerobia era usada para suspensiones diluidas o material participado, a partir de los años 70 con la crisis energética, creció el interés de producir metano a partir de residuos sólidos. Después de 1973 con el desarrollo de investigaciones para producir biogás a partir de residuos sólidos y eliminar la contaminación existente en el medio ambiente, surgieron los procesos de digestión anaerobia, remplazando por sustratos biológicamente biodegradables los combustibles fósiles no renovables (Acosta & Obaya, 2005).

Los digestores anaerobios consisten de una cámara con ausencia de oxígeno, en donde un número elevado de microorganismos trabajan en serie o en serie-paralelo degradando la materia orgánica en sucesivas etapas, principalmente elimina gran parte de los sólidos suspendidos totales (SST) y la demanda bioquímica de oxígeno medido transcurridos cinco días DBO_5 . Entre las cualidades ventajosas que tienen son:

- Menor producción de lodos en el proceso anaerobio que en el aerobio.
- No es necesario oxígeno, disminuyendo la energía de bombeo de aire.

- Existe un mayor grado de mineralización, concentración y fácil deshumidificación.
- Se tiene menores TRH, de esta manera se necesita menos volúmenes, abaratando el costo de instalaciones.
- Se recupera cierta cantidad de energía por medio de biogás.

Proceso.

El proceso anaerobio se da sin presencia de oxígeno, el mismo consiste de cuatro etapas fundamentales, primero la hidrólisis, después la de acidogénesis, luego la de homoacetogénesis-acetogénesis y por último la de metanogénesis.

- Hidrólisis: En esta primera etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas.
- Acidogénesis: En este punto los compuestos solubles que resultan de la hidrólisis se convierten en ácidos orgánicos como acético, propiónico y butírico.
- Acetogénesis: Se la conoce también como acidogénesis intermedia, ya que en esta etapa se convierte la materia orgánica en ácido acético, hidrógeno y CO_2 .
- Metanogénesis: Es una etapa metabólica, en donde a partir del ácido acético o de mezclas de H_2 y CO_2 se genera el CH_4 (Metano).

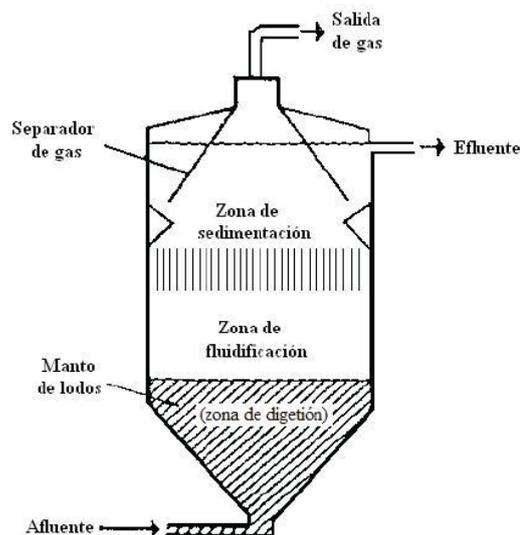


Figura 0-1. Modelo de un digestor.
Fuente: Scielo.

Cada una de las etapas tiene disminución de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), en el proceso de hidrólisis y de acidificación la reducción es mínima, siendo la mayor en la etapa de metanogénesis donde se da la mayor eliminación. En sí se considera a las bacterias metanogénicas las principales en el proceso anaerobio, por su baja velocidad de crecimiento y los bajos requerimiento necesitarías de redox y pH (Bernache & Bocco, 2000).

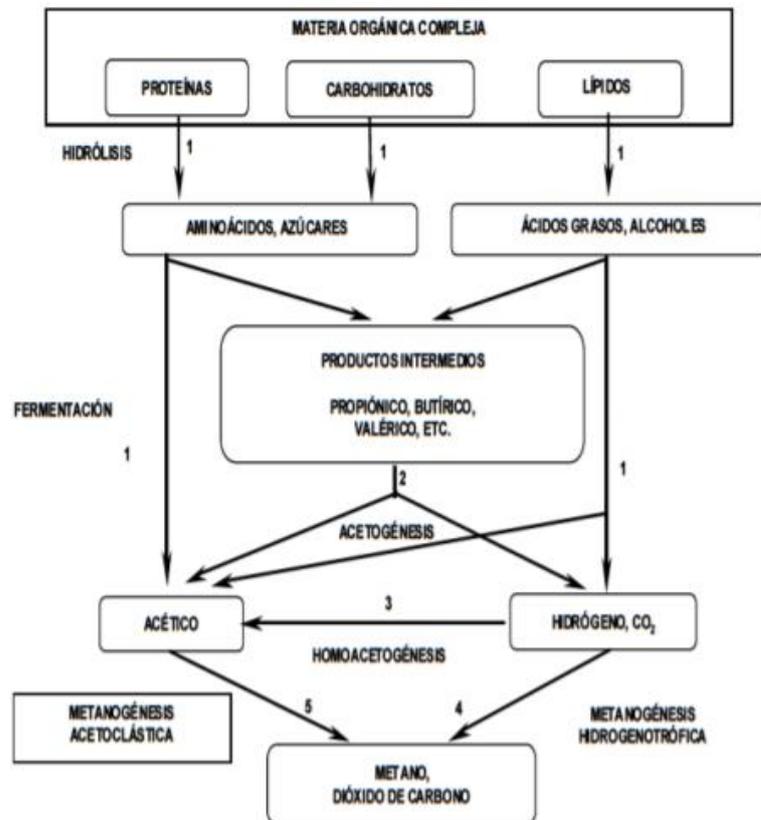


Figura 0-2. Proceso anaerobio.
Fuente: Giraldo-Gómez (1991).

Biogás.

Debido a la generación de metano (CH₄), en este proceso, existe la aparición de biogás, el cual es un compuesto gaseoso que se produce de la degradación de la materia orgánica debido a la digestión anaerobia, siendo este un proceso biológico, este compuesto tiene energía, que puede ser usado en la combustión en motores de turbinas o en calderas.

En la Tabla 1-1 se encuentra las características generales que posee el biogás.

Tabla 1-1. Características del biogás.
Fuente: Pérez, J (2010).

Composición	55-70% metano
	30-45% Dióxido de carbono
	Trazas de otros elementos
Energía contenida	6,0 – 6,5 Kwh./m ³
Equivalente en combustible	0,6 – 0,65 L petróleo/m ³ biogás
Limite de explosión	6 - 12 % biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750 ° C (según metano contenido indicado)
Presión crítica	75 89 bares
Temperatura crítica	-82.5° C
Densidad normal	1,2 Kg./m ³
Olor	Huevos en mal estado
Masa molar	16,043 Kg./kmol

Composición y factores en los digestores anaerobios.

En los procesos biológicos es necesario elementos que no siempre están presentes en el medio ambiente, por lo tanto, se necesita agregar diferentes elementos, para poder generar microorganismos para la biodegradación.

a) Factores físicos y químicos.

- Temperatura: Se busca tener temperaturas altas que llegue alrededor de los 35°C.
- Acidez: Es lo que determina la cantidad de metano en el biogás, se busca tener un pH óptimo de 6.6 y 7.6.
- Contenido de sólido: Para tener una mejor operación se busca tener cantidades menores al 10%.
- Nutrientes: Se debe disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y sales minerales para el crecimiento y actividad bacteriana.

Hay que tener en cuenta que, en este proyecto al usar agua sintética, haremos previamente mediciones de acidez, contenido de sólidos y nutrientes, para que después del proceso realizar mediciones y ver las reducciones de los compuestos usados.

b) Composición residual.

Mientras más complejas son las sustancias que conformen el rendimiento del CH₄ es mayor. Según como vemos en la Tabla 1-2 podemos reflejar el nivel de destrucción.

Tabla 1-2. Rendimiento del gas metano para diferentes sustratos.
Fuente: Acosta & Obaya (2005).

Componente	% CH ₄	m ³ /kg SV destruido
Carbohidratos (C ₆ H ₁₀ O ₅)	50	0,886
Grasas (C ₅₀ H ₉₀ O ₆)	70	1,335
Proteínas (6C.2NH ₃ .3H ₂ O)	84	0,587

c) Relación C: N: P (balance de nutrientes).

Existen diferentes criterios para estimar esta relación, se debe buscar una relación aproximada a 100:1.75:0.25 basándose en la DQO. Al existir mucho nitrógeno se puede producir exceso de amoníaco.

d) Efecto de la temperatura.

Es un parámetro que influye principalmente en la velocidad de reacción, se trabaja en dos rangos el mesofílico que va desde los 20 a 45°C, y el termofónico que va desde los 45 a 60°C. Las temperaturas óptimas deben ser de 35 y 55 °C respectivamente para cada rango. Al parecer es mejor trabajar en el segundo rango, pero no siempre es tan factible por lo económico, ya que se necesita un mejor control por las elevadas temperaturas y equipos como válvulas, tuberías y accesorios de una mayor calidad (Acosta & Obaya, 2005).

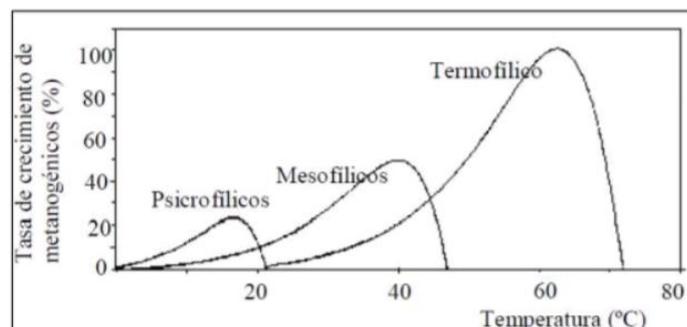


Figura 0-3. Tasa de crecimiento de microorganismos en función de la temperatura.
Fuente: Lo Guzzo (2017).

Para este proyecto se va a trabajar en el rango mesofílico, a una temperatura ambiente.

Distribución de un digester anaerobio.

A continuación, se va describir lo que es una instalación de digestión anaerobia, y el funcionamiento que se cumple en cada punto, en donde se toma en cuenta los procesos de digestión, los accesorios de seguridad y los depósitos de almacenamientos al producto final, biogás y el fango residual resultante.

Digestor.

Es la parte más importante, ya que en este punto se produce el proceso biológico anaerobio, en el mismo se debe estimar el tamaño dependiendo de la masa de materia orgánica que se va a tratar, el volumen de biogás que se va producir y principalmente el tiempo de retención que se proyecta dar a la depuración, también es importante la espuma que se va producir con esto obtener el volumen total.

El digester más común es el de mezcla completa, que consiste en un cilindro con un sistema de agitación que permite homogeneizar la materia a tratar, de esta manera evitando que sedimenten y se depositen en el fondo los sólidos en el reactor.

En el digester se debe buscar una temperatura óptima, para una correcta función de las bacterias, la misma se mantiene mediante un sistema intercambiador de calor, hay que tener en cuenta que para este trabajo se proyecta el tratamiento estableciendo una temperatura constante, la cual será temperatura ambiente.

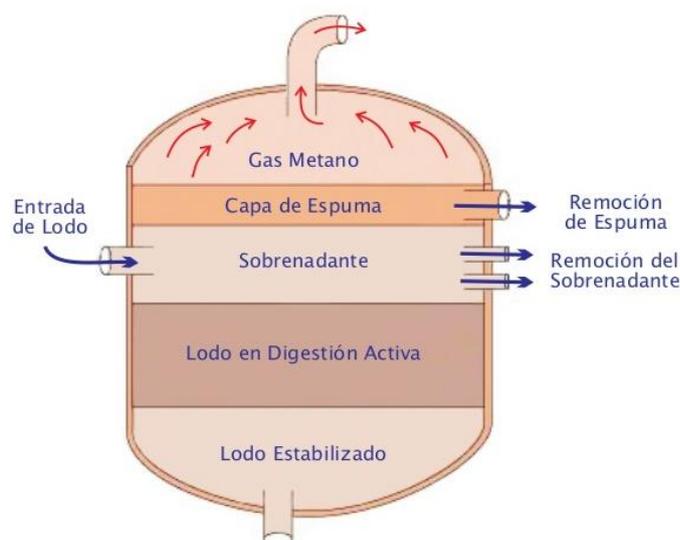


Figura 0-4. Digestor Anaerobio de lodos.
Fuente: Calameo.

Depósitos de entrada y salida para materia sólida.

En un sistema de digestión anaerobia se debe tener depósitos de entrada y salida, estos son cámaras de mezcla y depósito tampón, respectivamente.

Las cámaras reciben el flujo de lodo, que se origina de los decantadores primarios y secundarios. Hay que aclarar en que este proyecto se va usar agua sintética por lo cual no se va usar estos depósitos.

1.1.3. Diseño de un reactor de digestión anaerobia.

En el diseño del digester anaerobio se debe tener en cuenta diferentes factores, como: el tipo de fluido a tratar (aclarando que el mismo es sintético y posteriormente se va detallar su preparación), el tiempo de retención hidráulico que se tiene en el reactor, el caudal, el área de la tubería, la velocidad de flujo real y una temperatura ambiente; para poder dimensionar el digester.

1.1.4. Área de tubería de entrada al reactor.

El área de la tubería puede variar dependiendo de la cantidad de agua residual y la capacidad volumétrica del reactor, para nuestro caso la velocidad y caudal de circulación es sumamente importante y por ende la tubería que utilizamos es de ½ pulgada, que tiene un área nominal de 1.26 cm² y para el caudal que circula por la tubería es lo óptimo evitar obstrucciones y tener una correcta conducción.



Figura 0-5. Tubería PVC ½ pulgada.
Fuente: Catálogo de Plastigama.

1.1.5 Velocidad real.

La velocidad real básicamente es la velocidad de ascenso que tiene el flujo en el reactor y se la calcula de la siguiente manera (Castro & Harris, 2018):

$$V = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Donde:

V es la velocidad de ascenso.

Q es el caudal.

A es el área de la sección del reactor.

1.1.6 Caudal real.

El caudal depende directamente de la abertura de la llave de paso, se realizó varias pruebas para determinar un rango de aberturas para tener un caudal aparentemente constante. Según Seghezzo (2004), las pequeñas variaciones en el caudal no representan riesgos en el funcionamiento del digestor, razón por la cual se escogió un caudal promedio como parámetro de diseño.

Para obtener el caudal promedio se realizó varias mediciones dentro del rango de aberturas en el que determinamos en que tiempo se llena un determinado volumen del reactor.

1.2 Elaboración de la guía metodológica.

1.2.1 Definición de guía metodológica.

Una guía metodológica es un texto de ayuda en el cual se redactan los pasos a seguir para realizar un ensayo o trabajo en específico, estas guías sirven de ayuda para personas que no tienen experiencia o no saben mucho del tema (Gálvez González, 2003). Masapanta (2016) dice que es un conjunto de normas para cumplir un fin.

1.2.2 Consideraciones generales

Según Mass-Sossa (2011) una guía metodológica debe cumplir los objetivos y para ello debe seguir los siguientes pasos:

1. Analizar los objetivos, en esta etapa se valora como tratar cada objetivo planteado al comienzo de la práctica, con el fin de cumplirlos todos a cabalidad.
2. Analizar la relación entre objetivos contenido, métodos y condiciones de estudio, esto se lo hace con el fin de identificar el objetivo, el contenido correspondiente y el método que debe usarse.
3. Relacionar los contenidos, busca que las personas que realicen la práctica, usen lo que han aprendido en sus años de estudio (hechos, conceptos, teorías, leyes).
4. Designar tareas para el grupo, esto pretende que los estudiantes puedan relacionar diferentes opiniones y sugerencias, respetar diferentes criterios, desenvolverse de una mejor manera en el ámbito grupal

Evaluar la práctica realizada, se deberá elaborar un informe sobre la práctica realizada, en la cual los estudiantes demostraran lo aprendido, también se podría evaluar mediante una prueba escrita con el fin de examinar lo aprendido, en caso de que los resultados no sean satisfactorios, se deberá mejorar la metodología

CAPITULO II

DISEÑO DEL ENSAYO DE LABORATORIO

2.1. Cálculo.

2.1.1. Elementos existentes en el digestor anaerobio.

Se debe tener presente que este proyecto es para un laboratorio que será empleado en la Universidad del Azuay, por lo cual su uso va ser destinado para estudiantes, las dimensiones que va tener el digestor va estar en función del flujo que va ser tratado.

El digestor anaerobio es de flujo ascendente desde su parte inferior, el mismo tiene que estar dotado de un afluente y un efluente constante, con estos puntos claros se puede partir con el diseño, que posteriormente servirá para pruebas de tratamiento en aguas sintéticas y residuales.

El reactor anaerobio, físicamente está constituido por cinco partes.

- Efluente: el reactor consta de una red que dota constantemente agua residual o en nuestro caso agua sintética, la misma debe poseer un caudal constante, el mismo nos da el tiempo de retención que se tiene en el digestor y también nos sirve para dimensionar el reactor.
- Campana de entrada: en la parte inferior del digestor es por donde ingresa el flujo, en este punto debe tener una forma prismática, es un cono piramidal invertido para que no existan zonas muertas.
- Deflector: una vez que el flujo haya alcanzado una determinada altura, debido a que se va tratar materia orgánica existirá producción de biogás, el mismo es desviado por medio de un deflector hacia la campana de biogás.
- Afluente: el flujo es constante por todo el reactor hasta que llega al punto en donde el tiempo de retención deseado se ha cumplido, y el fluido es transportado afuera del digestor.
- Campana de biogás: los microorganismos retienen diferentes compuestos debido a la acumulación de los mismos en la parte inferior, el resto conjuntamente con todo el flujo es enviado al afluente, pero una parte de la materia organiza se convierte en biogás, el cual es desviado desde el deflector hacia la campana de biogás, para este proyecto no se dará uso al biogás.

2.1.2. Dimensionamiento.

El tratamiento debe constar de tres puntos; tanque de entrada, digestor y tanque de salida, los mismos cuentan con su red de distribución en la cual se empleó una tubería de media pulgada y todos los accesorios necesarios, debido a que con esta dimensión de tubería no existirá ninguna falla en el sistema. En la siguiente Figura 2-1 se muestra la distribución que tendrá el sistema.

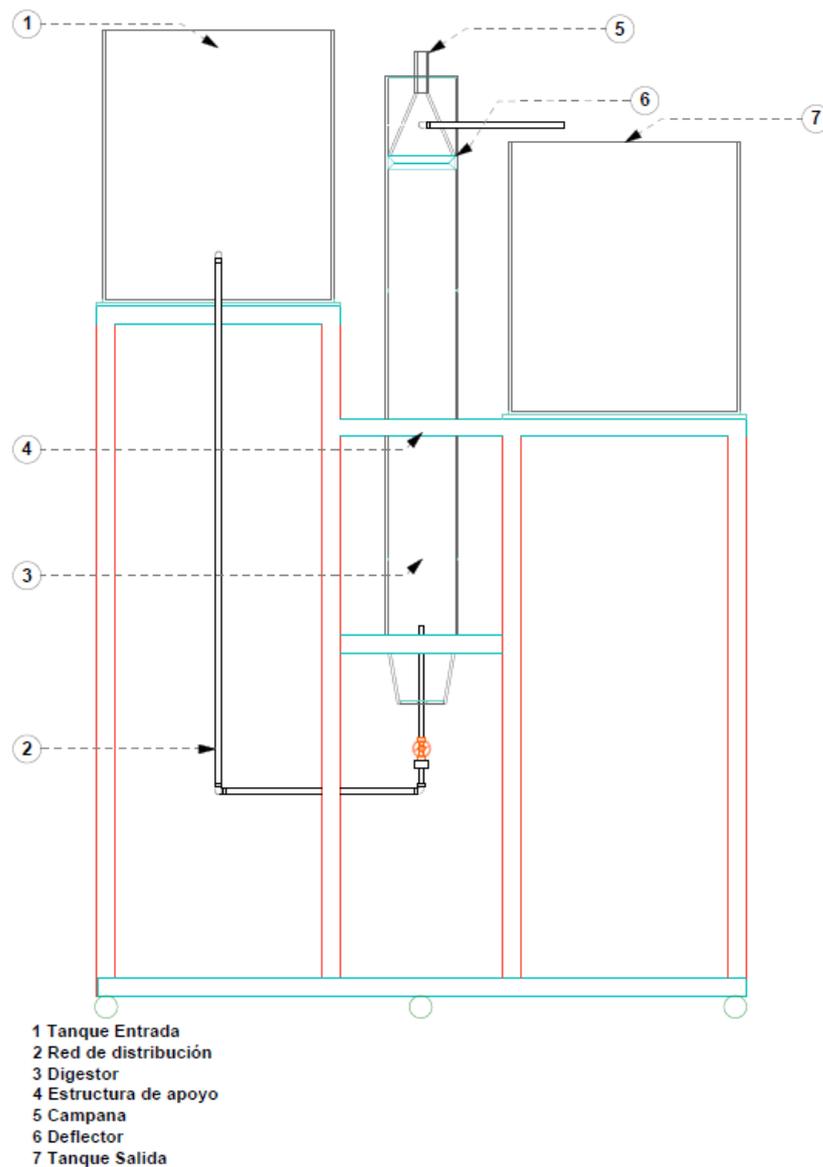


Figura 2-1. Modelo físico (Vista frontal).
Fuente: Autores.

Con los datos previamente expuestos, en el digestor debe existir un tiempo de retención hidráulico, el mismo puede variar debido a la densidad del fluido que va pasar por el mismo, con ello se debe partir también con un caudal conocido, agregado a esto se tomará una sección cuadrada en el reactor con dimensiones de 15x15cm. Usando el método de cálculo empleado por Caicedo(2006), partimos con la siguiente Tabla 2-1, teniendo claro que tanto el caudal mínimo y máximo se obtuvo del prototipo, que fue realizado con una tubería de PVC de 110mm, dándonos un flujo mayor de 40.62cm³/min y menor de 24.24cm³/min.

Tabla 2-1. Caudal máximo y mínimo recomendado.
Fuente: Autores.

Tiempo de retención hidráulica (TRH). (días)	Caudal mínimo (Q). (ml/min)	Dimensión de lado de sección del digestor. (cm)	Caudal máximo (Q). (ml/min)
0.8	24.24	15	40.62

Tanques de entrada y de salida.

Tanto el tanque de entrada y de salida cumplen la misma función, almacenamiento, debido a esto deben poseer la misma capacidad, con ellos se puede estimar la cantidad de agua que se podrá tratar, vamos a realizar el proceso para un aforo de 125 litros, con una sección rectangular y una altura constante de 60cm, pero hay que tomar en cuenta que la altura real máxima que emplearemos por motivos de desborde de agua será de 50cm, (Figura 2-2).

$$VT = A * H \quad (2)$$

Donde:

VT es el volumen total del tanque cm³.

A es el área de la sección transversal del tanque cm².

H es la altura real máxima del tanque en cm.

$$125000\text{cm}^3 = A * 50\text{cm}$$

$$A=2500\text{cm}^2$$

$$A = l * l \quad (3)$$

Donde:

A es el área de la sección transversal del tanque cm^2 .

l es el lado de la sección transversal del tanque en cm.

$$2500\text{cm}^2 = l * l$$

$$l = 50\text{cm}$$

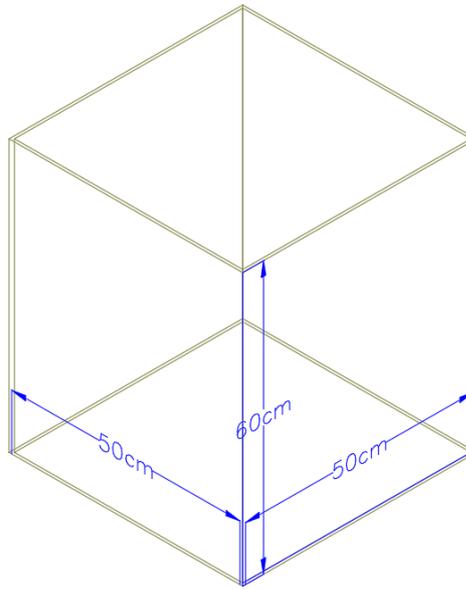


Figura 2-2. Tanque.
Fuente: Autores.

Diseño del digestor.

- **Volumen del reactor.**

$$Vr = Q * TRH \quad (4)$$

Donde:

Vr es el volumen real del digestor en ml.

Q es el caudal mínimo en ml/min.

$$Vr = 0.8d * (24.24\text{ml}/\text{min}) * (60\text{min} * 24\text{h}) = 27924.48\text{ml}.$$

Por razones constructivas usaremos 27950 ml como el volumen del reactor.

- **Altura efectiva del digestor.**

Hay que tener claro que un principio el reactor posee forma de tronco de pirámide invertido, con una altura de 15cm la mismo sería la primera altura y teniendo en la parte más baja una sección de 8x8 cm, poseyendo el siguiente volumen.

$$V1 = \frac{h * (a1 + a2 + \sqrt{a1 * a2})}{3} \quad (5)$$

Donde:

V1 es el volumen del prisma piramidal en ml.

h es la altura vertical del prisma piramidal en cm.

a1 es el área inferior del prisma piramidal en cm².

a2 es el área superior del prisma piramidal en cm².

$$V1 = \frac{15cm * (64cm^2 + 225cm^2 + \sqrt{225cm^2 * 64cm^2})}{3} = 2045ml$$

En la siguiente Figura 2-3 se muestra la forma que posee el prisma de estrada para el digestor teniendo una altura de 15 cm.

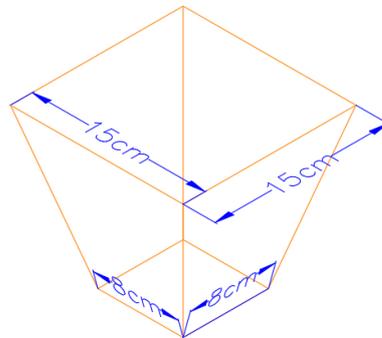


Figura 2-3. Base del reactor.
Fuente: Autores.

$$V2 = Vr - V1 \quad (6) = 25875ml$$

Donde:

V2 es el volumen del cuerpo del digestor en ml.

Vr es el volumen real del digestor en ml.

V1 es el volumen del prisma de entrada del digestor en ml.

- **Altura del cuerpo del digestor.**

$$h_2 = \frac{V_2}{a_2} \quad (7)$$

Donde:

h_2 es la altura del cuerpo del digestor cm.

V_2 volumen del cuerpo del digestor cm^3 .

a_2 área superior del prisma, que se convierte en la sección del cuerpo del digestor en cm^2 .

$$h_2 = \frac{25875\text{cm}^3}{225\text{cm}^2} = 115\text{cm}$$

Por lo tanto, la altura final del digestor es de 130cm hasta su efluente, y se debe agregar 10cm más para el posicionamiento de la campana dándonos una altura total de 140cm de los cuales 125cm comprende el cuerpo del digestor. En la siguiente Figura 2-4 se ven las dimensiones.

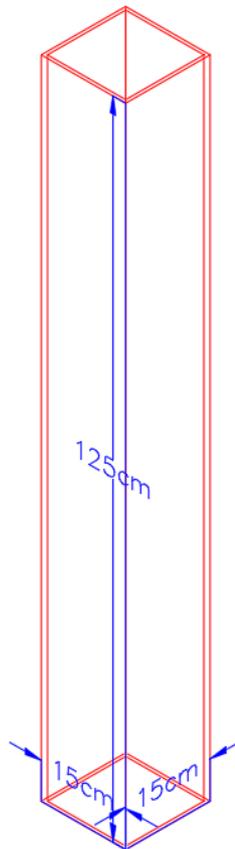


Figura 2-4.Reactor.
Fuente: Autores.

- **Carga hidráulica.**

$$CH = \frac{Q}{a2} \quad (8)$$

Donde:

CH es la carga hidráulica en cm/h.

Q es el caudal mínimo en cm³/min.

a2 es el área superior del prisma, que se convierte en la sección del cuerpo del digestor en cm².

$$CH = \frac{24.24\text{cm}^3/\text{min}}{225\text{cm}^2} = \frac{0.107\text{cm}}{\text{min}} = 6.46\text{cm/h}$$

Diseño de la campana.

En el digestor anaerobio los elementos que se encuentran después del cuerpo del reactor son los deflectores y la campana respectivamente; posee diferentes puntos que deben ser diseñados por medio del caudal máximo, en la siguiente Figura 2-5 se muestra el corte y los elementos a ser diseñados.

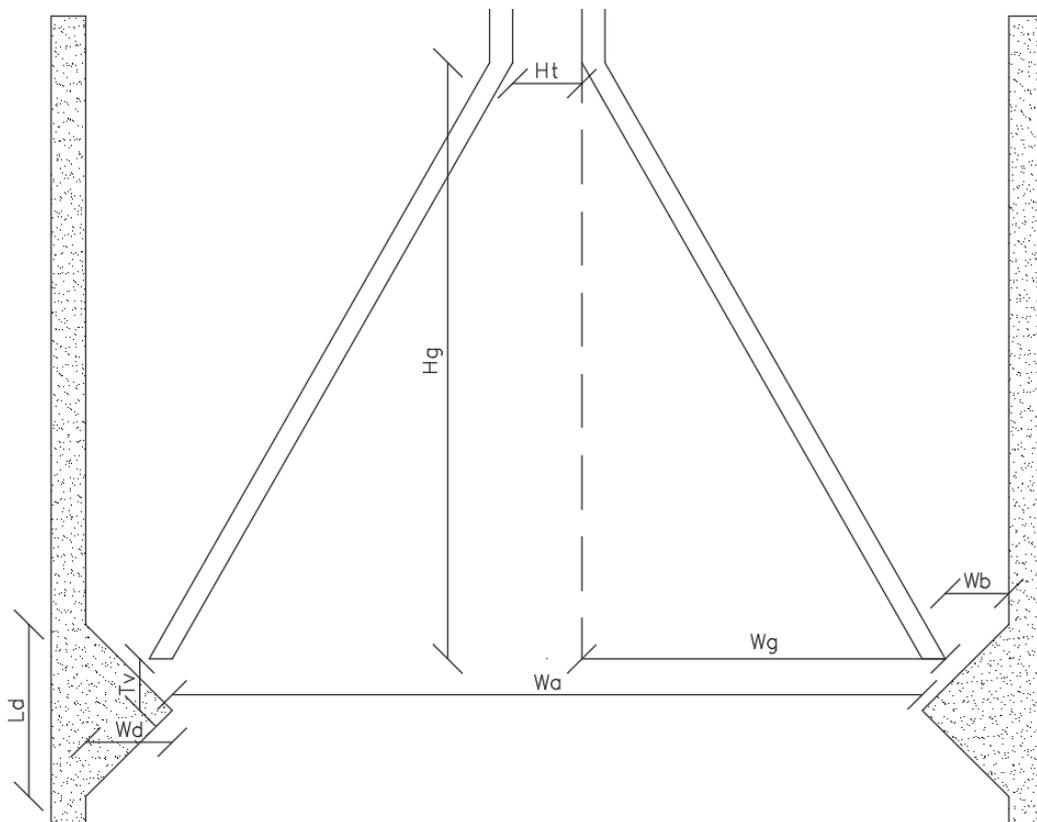


Figura 2-5. Campana y deflector.
Fuente: Autores.

Dependiendo del flujo o de la geometría que posee el digester existe un factor de flujo que va cambiar el flujo en la campana. En este punto se debe usar el flujo máximo, para poder trabajar con la carga hidráulica más alta. Esta recomendación fue tomada de la tesis de doctorado de Caicedo (2006), debido a que aumenta el biogás a mayor caudal

$$CH = \frac{Q}{a2} \quad (8)$$

Donde:

CH es la carga hidráulica del digester en cm/h.

Q es el caudal máximo del digester en cm³/min.

a2 es el área superior del prisma, que se convierte en la sección del cuerpo del digester en cm².

$$CH = \frac{40.62\text{cm}^3/\text{min}}{225\text{cm}^2} = \frac{0.1805\text{cm}}{\text{min}} = 10.83\text{cm}/\text{h}$$

El factor recomendado que tomaremos para el diseño de la campana es 4.

$$CHc = 4(CH) \quad (9)$$

Donde:

CHc es la carga hidráulica en la campana en m/h.

CH es la carga hidráulica del digester en cm/h.

$$CHc = 4 * \frac{10.83\text{cm}}{\text{h}} = \frac{43.32\text{cm}}{\text{h}} = 0.4332\text{m}/\text{h}$$

- **Área de abertura.**

$$Aaber = \frac{Q}{CHc} \quad (10)$$

Donde:

Aaber es el área de abertura libre fuera de la campana en cm².

Q es el caudal máximo del digester en cm³/h.

CHc es la carga hidráulica en la campana en cm/h.

$$A_{aber} = \frac{2437.2 \text{ cm}^3/h}{43.320 \text{ cm/h}} = 56.26 \text{ cm}^2$$

- **Ancho de la abertura.**

$$W_a = \sqrt{a_1 - A_{aber}} \quad (11)$$

Donde:

W_a es el ancho de abertura en la parte inferior de la campana en cm.

A_{aber} es el área de abertura libre fuera de la campana en cm^2

a_1 es el área superior del prisma, que se convierte en la sección del cuerpo del digestor en cm^2 .

$$W_a = \sqrt{225 - 56.26} = 13 \text{ cm}$$

Debido a que esta abertura es interna y se va a construir con vidrio de 4 mm de espesor el espesor final es de 13,8 cm.

- **Ancho libre en los extremos de la campana.**

$$W_b = \frac{\text{Ancho interno}}{2} - \frac{W_a}{2} \quad (12)$$

Donde:

W_b es el ancho libre en los extremos de la campana en cm.

Ancho interno en el cuerpo del digestor en cm.

W_a es el ancho de abertura en la parte inferior de la campana en cm.

$$W_b = \frac{15}{2} - \frac{13.8}{2} = 0.6 \text{ cm}$$

- **Ancho libre interno de los extremos de la campana.**

En la parte superior de la campana debe tener una abertura para que fluya el biogás, el mismo vamos a asumir un valor de 2 cm.

$$Wg = \frac{\text{Ancho interno}}{2} - Wb - 0.5Ht \quad (13)$$

Donde:

Wg es el ancho libre interno de los extremos de la campana en cm.

Ancho interno en el cuerpo del digestor en cm.

Wb es el ancho libre en los extremos de la campana en cm.

Ht es el ancho de abertura de la parte superior para la salida del biogás en cm.

$$Wg = \frac{15}{2} - 0.6 - 0.5(2) = 5.9cm$$

- **Altura de la campana.**

$$Hg = Wg * \tan(\alpha) \quad (14)$$

Donde:

Hg es la altura de la campana cm.

Wg es el ancho libre interno de los extremos de la campana en cm.

α es el ángulo de inclinación de la campana en grados.

$$Hg = 5.9 * \tan(60) = 10.22cm$$

Por temas constructivos asumiremos el valor de 10,4cm.

Diseño de los deflectores.

En los deflectores de la entrada a la campana debe existir un traslape entre la punta del extremo de la campana y la esquina de los deflectores. Se asume un 150 por ciento a la dimensión del ancho libre en los extremos de la campana.

$$Tv = 1.5(Wb) \quad (15)$$

Donde:

Tv es el traslape entre la punta del extremo de la campana y la esquina del deflector en cm.

Wb es el ancho libre en los extremos de la campana en cm.

$$Tv = 1.5(0.6) = 0.9cm$$

- **Ancho de los deflectores.**

$$Wd = Tv + Wb \quad (16)$$

Donde:

Wd es el ancho de los deflectores en cm.

Tv es el traslape entre la punta del extremo de la campana y la esquina del deflector en cm.

Wb es el ancho libre en los extremos de la campana en cm.

$$Wd = 0.9 + 0.6 = 1.5\text{cm}$$

- **Longitud de los deflectores.**

$$Ld = 2Wd * \tan(45^\circ) \quad (17)$$

Donde:

Ld es la longitud vertical del deflector en cm.

Wd es el ancho de los deflectores en cm.

$$Ld = 2 * 1.5 * \tan(45^\circ) = 3\text{cm}$$

Una vez realizado todo el diseño se tiene las siguientes dimensiones tanto en la campana como los deflectores, Figura 2-6.

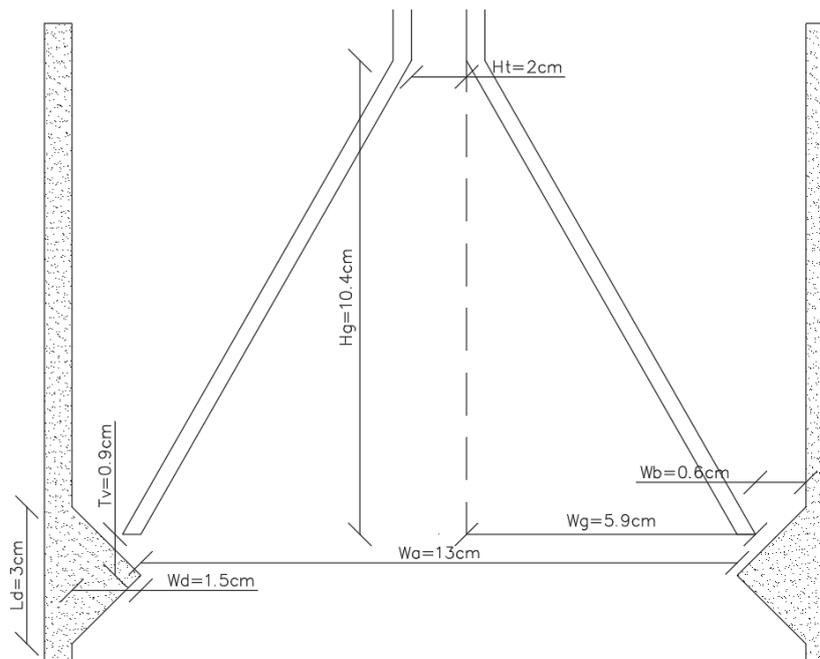


Figura 2-6. Campana del modelo físico.
Fuente: Autores.

Forma que tomara la campana en isometría, Figura 2-7.

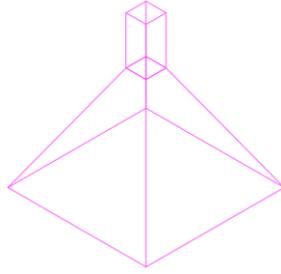


Figura 2-7. Isometría de la campana.
Fuente: Autores.

2.2. Construcción.

Una vez ya realizado el diseño se prosiguió con la construcción, el cual fue hecho con vidrio y su estructura de apoyo en aluminio, con ruedas de goma en su parte inferior, la distribución se realizó con tubería de media pulgada de PVC, de la marca comercial Plastigama, hay que aclarar que la red está unida por medio de nudos para facilitar su desmontaje al momento de su limpieza.

El modelo físico consta de 6 partes las cuales detallaremos a continuación.

- La primera es la estructura de soporte, la cual está hecha con aluminio y posee 6 ruedas en su parte inferior 4 con freno de pie estático y dos sin el mismo, posee dos pilares uno en cada extremo, el primero se encuentra a una altura de 136cm, el segundo a una altura de 106cm, en la parte media tiene un apoyo para el reactor con dos apoyos separados entre sí 16,8 centímetros para la colocación del digestor. Toda la estructura está hecha con tubos de aluminio unidos con pernos y con bases de madera para los pilares. Como se muestra en la Figura 2-8.

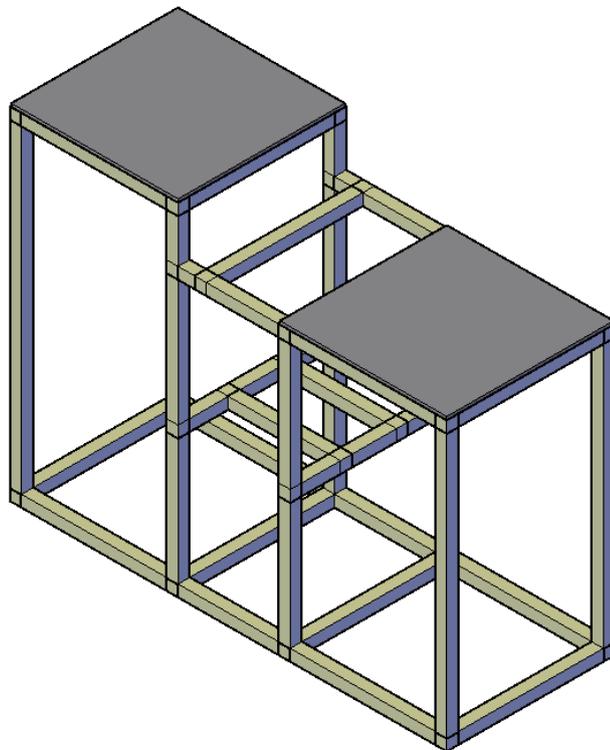


Figura 2-8. Estructura de soporte del modelo físico.
Fuente: Autores.

- La segunda y tercera parte consta de dos tanques de idénticas dimensiones, ambos tienen una sección interna de 50x50cm con una altura de 60cm, el primero es el encargado de almacenar el agua residual o el agua sintética que se va a tratar, el cual posee un orificio para tubería de media pulgada, en donde se coloca un accesorio que consta de empaques para impedir fugas, esta perforación está a una altura de 5 cm desde la base del tanque, el cual se une a la red de distribución con una llave de paso para posteriormente llevar el flujo al afluente del digestor, en las siguientes imágenes (Figura 2-9) se detalla cada una de las caras con sus debidas dimensiones para poder cumplir con la sección interna de 50x50cm, luego de la construcción se realizó una marca a los 50cm Figura 2-10, en donde se debe asegurar que se encuentra el líquido en un principio para empezar con el proceso.

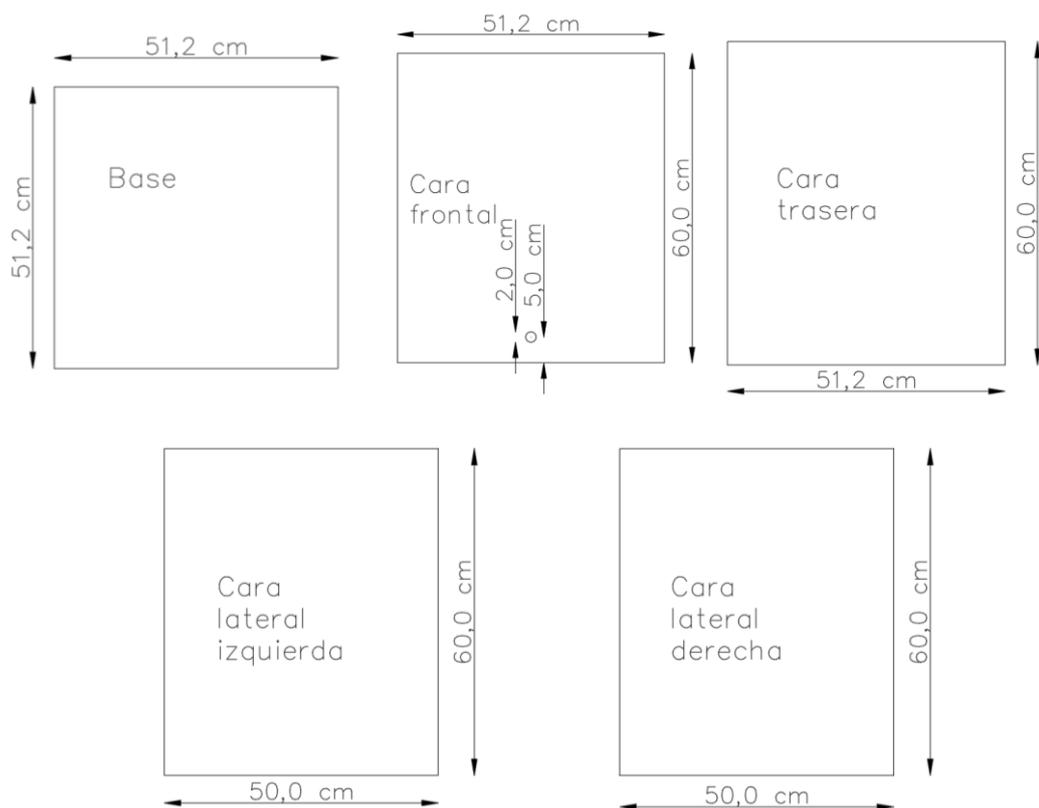


Figura 2-9. Composición del tanque de entrada.
Fuente: Autores.



Figura 2-10. Tanque de entrada.
Fuente: Autores.

En este punto para asegurar que el flujo sea constante, se usó una bomba (Figura 2-11) de altura máximo 65cm, con una potencia baja, que en todo momento bombea líquido, hay que tener claro que dependiendo del tipo de fluido que se va usar, es decir de la densidad del mismo va variar su rendimiento. Su función es transportar el agua desde el tanque inicial hacia la llave de paso, teniendo en cuenta que el caudal de la bomba es constante y la que va a dar la velocidad de salida es la llave de paso, que tiene la abertura deseada para cumplir con el flujo planteado en un principio, para que llegue al digestor.



Figura 2-11. Bomba.
Fuente: Autores.

La bomba se encuentra unida al accesorio de salida del tanque por medio de una manguera de 50cm de largo y media pulgada de diámetro, como se muestra en la Figura 2-12.



Figura 2-12. Conexión de la bomba en el tanque.
Fuente: Autores.

El segundo tanque con las mismas dimensiones es en el cual va ser dirigido el flujo que se trató en el digestor previamente, el agua residual depurada a una altura de 166cm es enviada a este tanque por medio de dos tuberías que salen del digestor hacia el depósito final.

Cada uno de estos tanques constan de cuatro paredes de 50x60cm y una pared de 50x50 que hace las veces de base, cada una de ellas son unidas por medio de silicón estructural, para asegurarnos de que no existiese fugas se los llenó durante un día entero con líquido (agua o agua residual) para asegurar de que no exista fallas. Este tanque posee las mismas dimensiones que el primer tanque, en las siguientes imágenes (Figura 2-13) se detalla cada una de las extensiones.

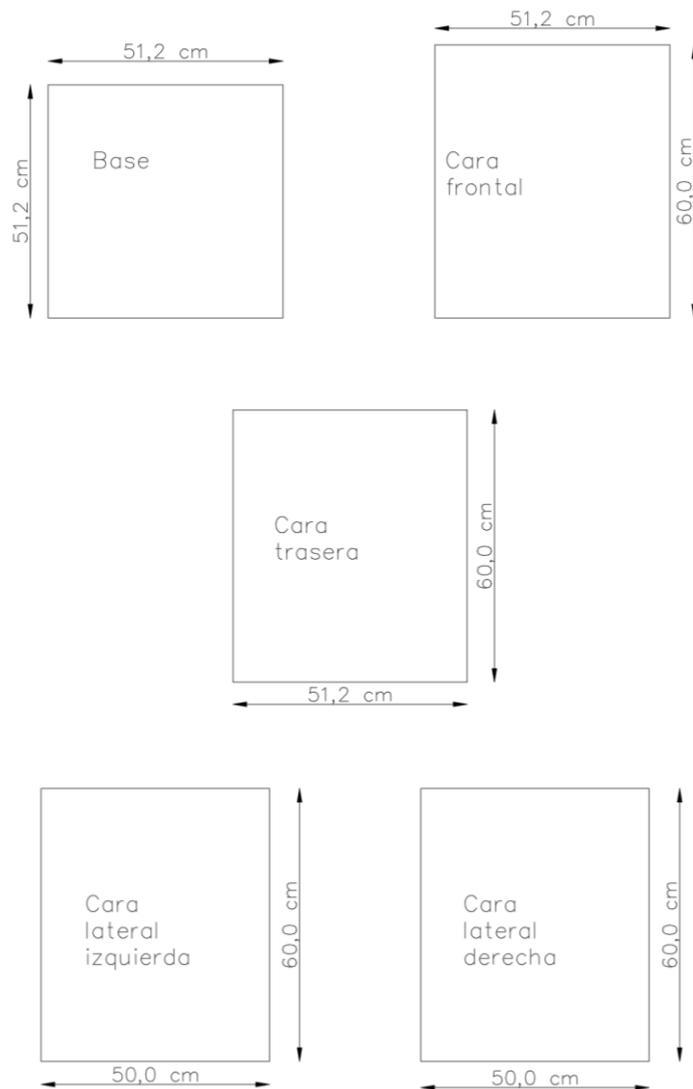


Figura 2-13. Composición del tanque de salida.
Fuente: Autores.

- En el digestor es en sí donde están comprendidas todas las tres partes restantes, comprendido del prisma de entrada, el cuerpo del digestor y la campana de salida del biogás.

El digestor fue previamente diseñado cada una de sus partes y sus dimensiones, el prisma de entrada, está hecho con vidrio, tiene en su parte inferior una sección cuadrada de 8x8cm y en la parte superior una sección de 15x15cm, con una altura de 15cm.

En la parte inferior el prisma posee un orificio para una tubería de media pulgada, esta tubería tiene un sobrante dentro del digestor de 22cm para que no exista taponamientos en la base del digestor, en este punto se colocó un accesorio con empaques (impide

fugas), para unir con la red de distribución del afluente, en el punto más alto se tiene una sección de 15x15cm, en este lugar se colocó cejas de aluminio en cada pared y empaques sobre las mismas, el propósito del mismo es que el digestor sea desmontable para poder facilitar su limpieza Figura 2-14. Cada una de las caras del prisma son idénticas, unidas las cuatro caras nos da una altura de 15cm, y cada cara tiene 15,4cm sin estar unidas, en la siguiente imagen (Figura 2-15) se detallan las dimensiones.



Figura 2-14. Base del reactor.
Fuente: Autores.

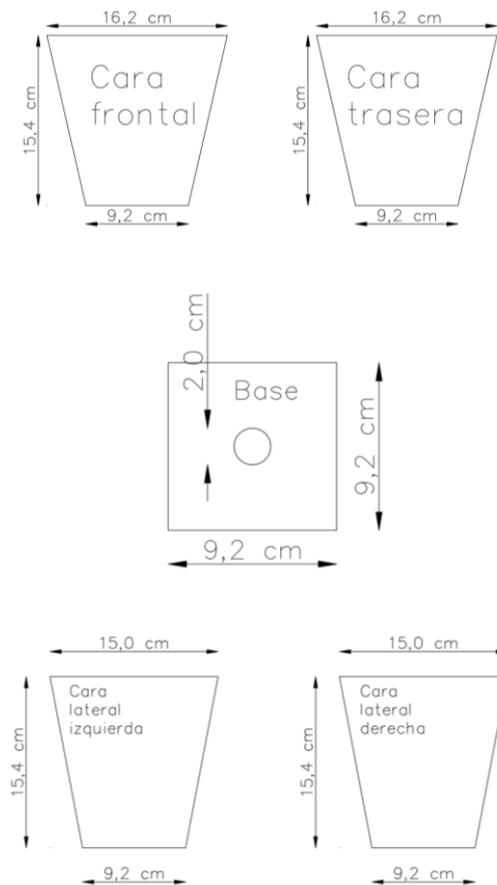


Figura 2-15. Composición de la base del reactor.
Fuente: Autores.

El cuerpo del digestor es de 125cm de altura, posee cuatro caras cada una hecha con vidrio de 6mm de espesor, con una sección interna de 15x15cm, unidas a cada una con silicón estructural, cada pared posee un deflector, que al unirse todos forman el deflector de gases que desvía el biogás que se produce en el proceso, se encuentran a una altura de 106.3cm, las dimensiones fueron previamente diseñadas, tienen forma de pirámide con una altura de 1.5cm y una base de 3cm.

Las cuatro caras poseen diferencias entre ellas, la cara posterior posee una altura de 125cm, 16,2cm ancho y con un orificio el cual va con un accesorio con empaques que se unen a la red de salida y hacen las veces de efluente del digestor, enviando el fluido al tanque de salida y un deflector a una altura de 106.3cm. Las dos caras laterales poseen una altura de 125cm y 16,2 cm de ancho, con deflector a 106.3cm de altura, un orificio a una altura de 115cm. En las siguientes imágenes (Figura 2-16) se detalla cada una de las dimensiones de las tres caras.

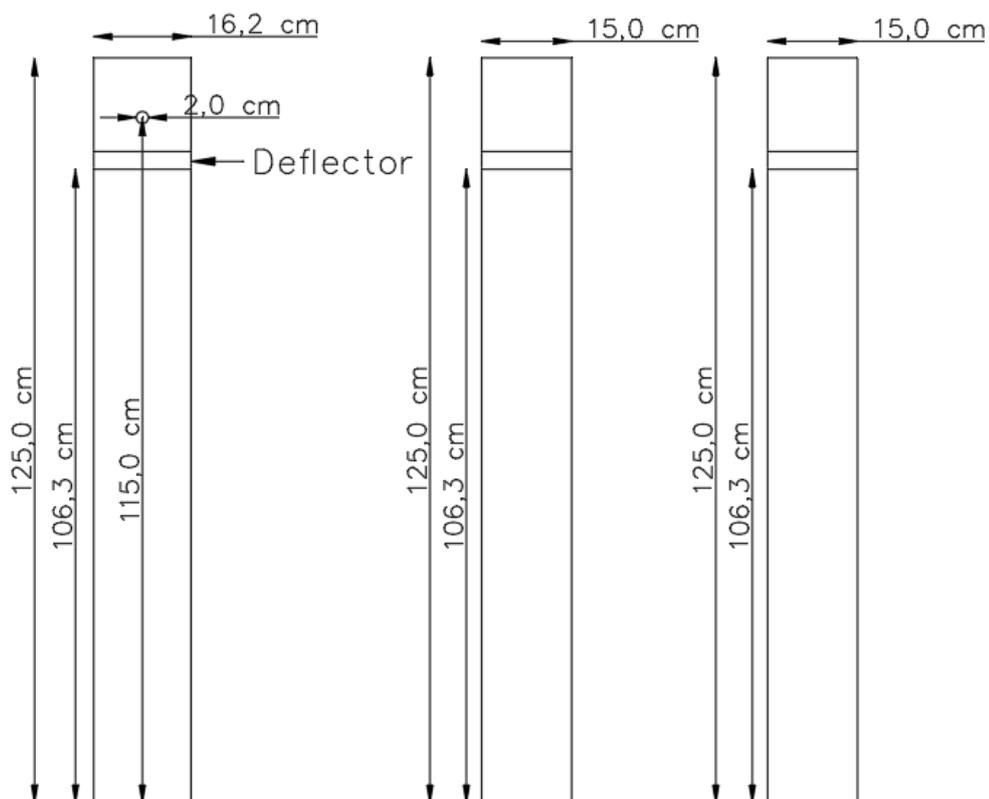


Figura 2-16. Composición del reactor.
Fuente: Autores.

La cara frontal tiene una altura de 125cm y un ancho de 16,2 cm, con un deflector a una altura de 106.3cm, esta pared tiene un orificio a una altura de 30 cm, con un accesorio con empaques y una llave la cual sirve para vaciar el digestor para su

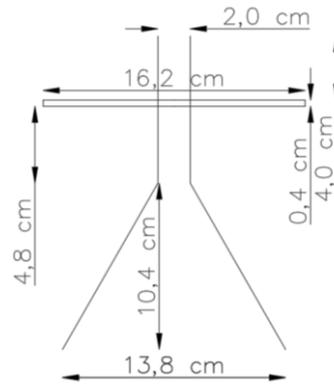


Figura 2-18. Vista frontal de la campana.
Fuente: Autores.

La siguiente Figura 2-19 y Figura 2-20, no indica como es la isometría de la campana sin y con la tapa del digestor unida a la cámara de salida

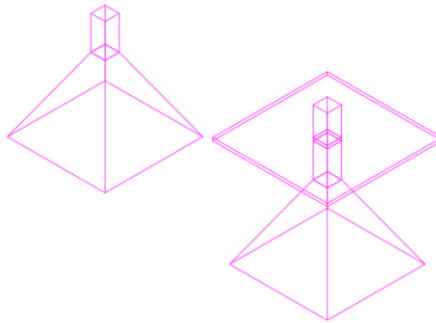


Figura 2-19. Campana del reactor.
Fuente: Autores.



Figura 2-20. Campana.
Fuente: Autores.

Vistas del modelo físico.

- Vista frontal, Figura 2-21.

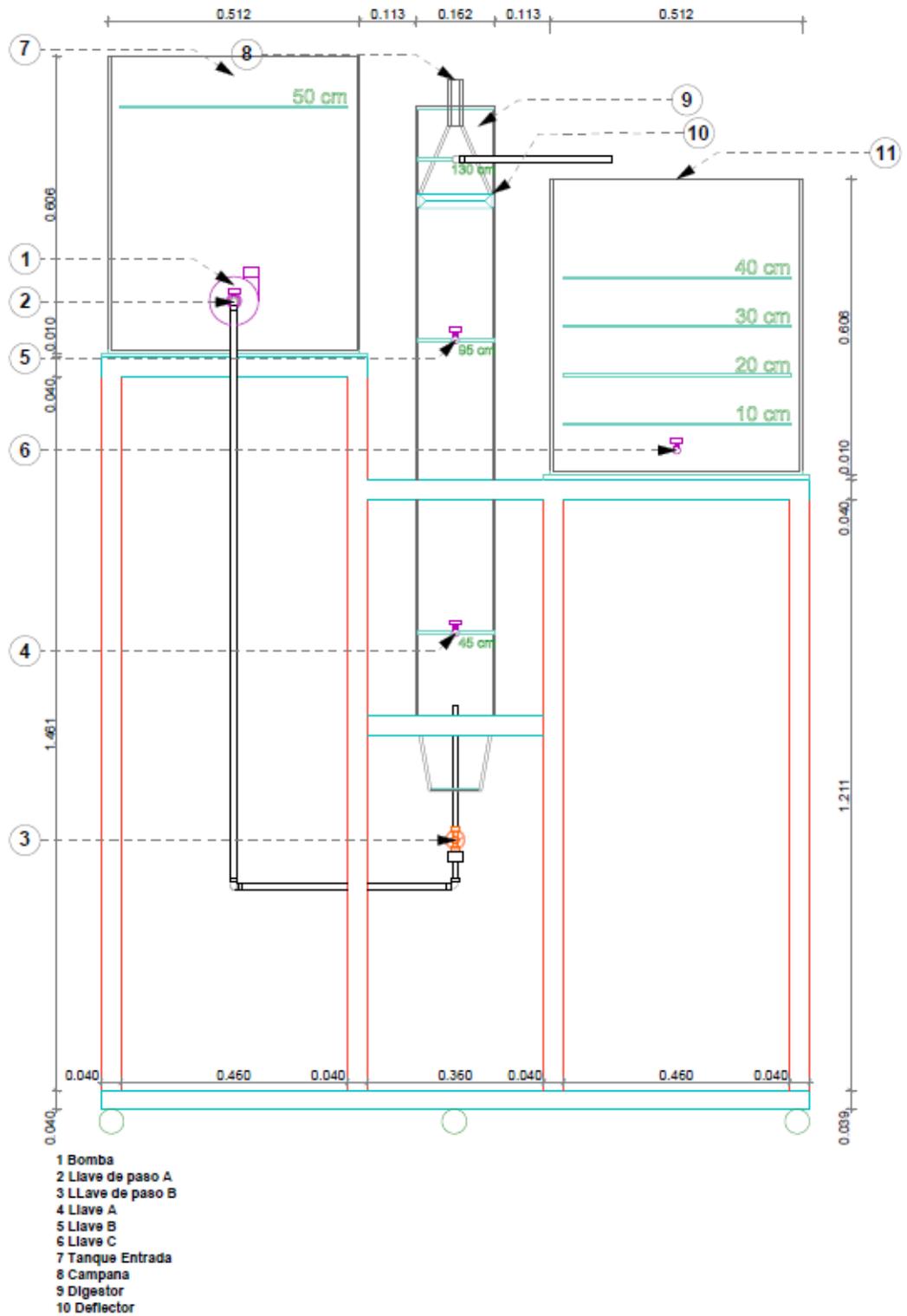


Figura 2-21. Vista frontal del conjunto.
Fuente: Autores.

- **Vista lateral izquierda y derecha.**

En la siguiente Figura 2-22 se muestra la vista lateral izquierda y derecha respectivamente.

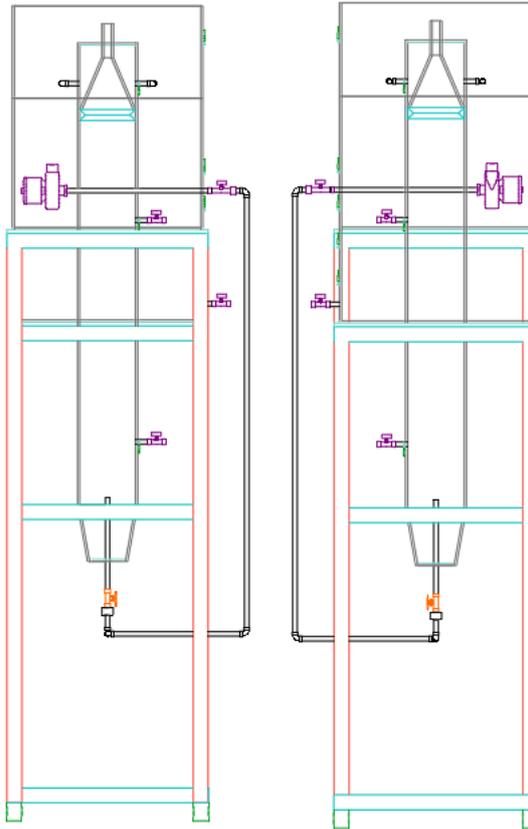


Figura 2-22. Vistas laterales.
Fuente: Autores.

- **Vista superior, Figura 2-23.**

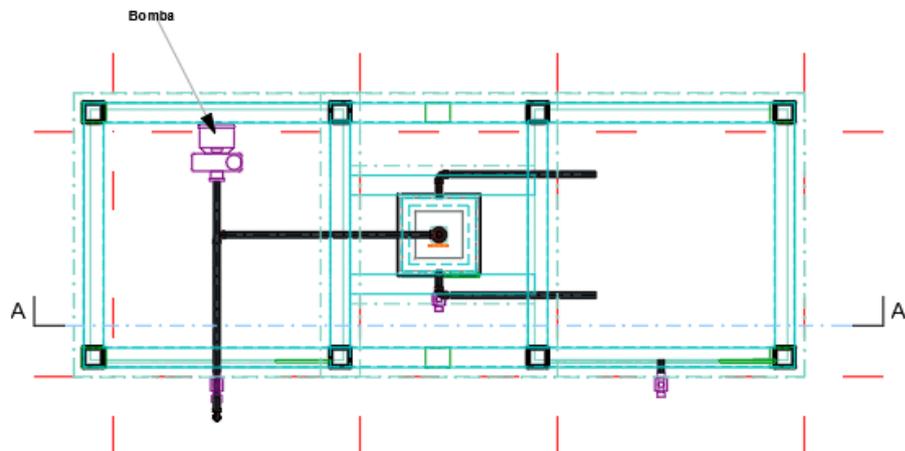


Figura 2-23. Vista en planta.
Fuente: Autores.

- **Isometría, Figura 2-24.**

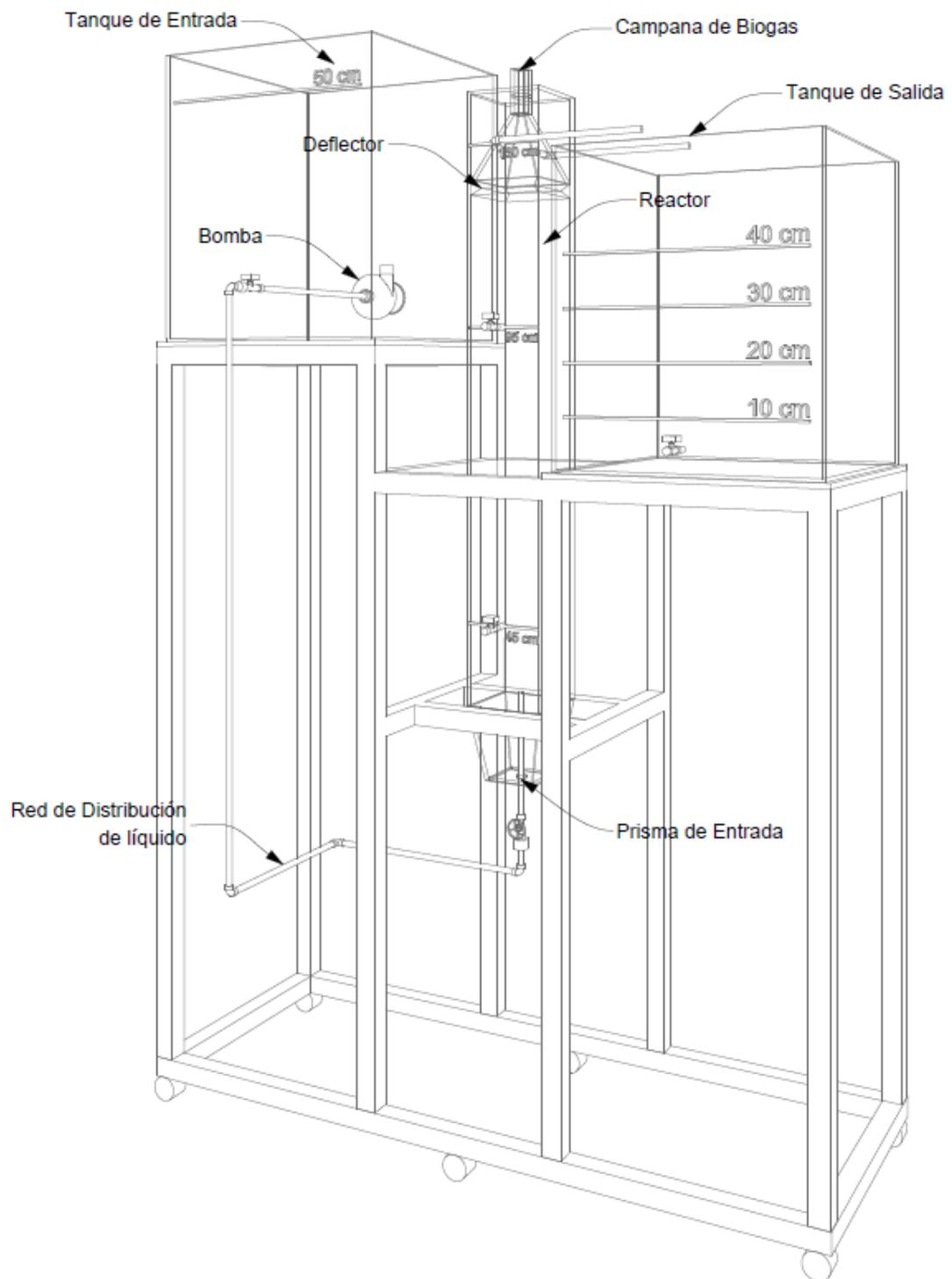


Figura 2-24. Isometría del modelo.
Fuente: Autores.

Limpieza y mantenimiento.

Al ser un modelo físico que se encuentra expuesto a constantes bacterias y contaminantes, se debe realizar una limpieza total periódica cada vez que se realice una prueba, el sistema es totalmente manejable ya que todos sus accesorios son desmontables, se recomienda usar diferentes detergentes en su limpieza, y seguir los siguientes pasos.

1. Retirar todo el líquido de los tanques y el digestor, en este punto se debe tener baldes para poder desalojar el fluido, Figura 2-25.
2. Desunir los tanques y el digestor de la red por medio de los nudos existentes.
3. Mover a un lugar más manejable tanto tanques como el digestor.
4. Separar el prisma de entrada y el cuerpo del digestor, con un desarmador estrella.
5. Arrojar constante agua limpia, potable si es posible, a los elementos.
6. Realizar el enjuague y el posterior lavado de cada elemento.
7. Realizar el posterior secado y colocado de cada elemento en su lugar, para un correcto uso futuro.



Figura 2-25. Recipientes utilizados.
Fuente: Autores.

2.3 Pruebas.

Desde un principio se tuvo claro que el punto clave es la estabilización del caudal, teniendo claro que es sumamente bajo debido a los tiempos de retención altos, se tuvo que usar una bomba de pecera que nos asegura el flujo ascendente.

Se empezó haciendo pruebas con botellas y un equipo de venoclisis, el cual aseguraba un flujo muy pequeño, pero al momento de aumentar la altura de agua en el digestor dejaba de fluir Figura 2-26, este condicionante hizo cambiar el flujo del líquido por medio de la ayuda de una bomba.



Figura 2-26. Prototipo 1.
Fuente: Autores.

Se pudo ver que aun con el uso de bomba el caudal tiende a ser constante, para esto usamos un tanque de reserva, un tubo de 110 mm de diámetro, donde el primer tanque posee una diferencia de altura con la base del digestor de 45cm, Figura 2-27, se pudo notar que, debido a que el sistema de distribución se realizó por medio de una manguera el flujo tendía a variar, por lo tanto se realizó la distribución por medio de tubería rígida de media pulgada sin que haya mayores inconvenientes, como se mencionó previamente del diseño del digestor, este prototipo fue fundamental ya que nos aseguró cual sería el caudal máximo y el mínimo para el diseño siendo $24,24\text{cm}^3/\text{min}$ el menor y el mayor $40,62\text{cm}^3/\text{min}$. En el Anexo A, precisamente en la determinación del caudal mínimo y máximo, se detalla con tablas las pruebas realizadas en la medición del caudal por medio de un recipiente de 240ml, agregado a esto en el mismo Anexo en la parte del prototipos del modelo físico, los dos modelos con los que se empezó inicialmente, el primero dándonos una pauta de cómo funciona el flujo ascendente, y el segundo dejándonos claro no solo el acenso del flujo, sino también el volumen que se trata en un determinado tiempo, dándonos así el caudal a emplear en el modelo definitivo.



Figura 2-27. Prototipo 2.
Fuente: Autores.

Se pudo encontrar que el flujo puede variar dependiendo de la densidad a tratar, aumentando los tiempos de retención y por ende el caudal siendo más bajo, en caso de tener densidades altas en el fluido, debido al rendimiento de la bomba, se debe realizar una inspección previa de la rejilla de bombeo, para asegurar que no existe taponamiento, de esta manera garantizando el flujo del caudal. En la Figura 2-28 se puede ver los tipos de fluidos con los que se trabajó.



Figura 2-28 . Agua residual.
Fuente: Autores.

Se observó que existe una cierta diferencia de caudal a lo que transcurre el tiempo, la misma es mínima, esta discrepancia se da debido a la presión que se da al momento que el digestor se encuentra lleno y el tanque de almacenamiento inicial pierde volumen de agua, altura y presión, por ello fue necesaria la bomba ya que asegura el proceso de manera correcta, ya que si se realizaba por medio de gravedad al momento de igualar las altura de agua entre el digestor y el primer tanque, no existe caudal alguno. Esto se pudo evidenciar desde que se trabajó con la maqueta prototipo Figura 2-29.



Figura 2-29. Prototipo 2.
Fuente: Autores.

Otro causante de que el caudal pierda su flujo constante, es que al tratar con aguas residuales las mismas poseen sólidos que taponan las tuberías, sin que en un principio den mayor problema, pero que a medida que transcurre el tiempo nos presentan obstrucciones en los accesorios, para ello en la base del digestor en el orificio de entrada, la tubería tiene una salida de 22cm para que no exista taponamiento en el principio del digestor.

La clave de asegurar el caudal bajo se encuentra en la abertura de la primera llave la misma posee una marca Figura 2-30, debido a la presión baja que se le puede dar con el pulso de la mano encontramos un intervalo de posibles caudales con lo que se va a realizar el proceso, este caudal debe ser medido al momento de que el digestor este lleno por medio de la tubería efluente. Hay que asegurar que el caudal este entre estos dos puntos.



Figura 2-30. Marca de la abertura recomendada de la llave de paso del tanque de entrada.
Fuente: Autores.

El proceso se debe asegurar para un determinado tiempo, que no sobrepase los tres días, debido a que el agua ya tratada se encuentra expuesta al ambiente, la misma al estar almacenada sin hallarse en un proceso va a volver a contaminarse. Como se ve en la Figura 2-31 el fluido empieza a tomar otro color al estar estancada.



Figura 2-31. Putrefacción del agua tratada.
Fuente: Autores.

Con estos puntos se llegó a la conclusión, de que se debe asegurar la limpieza de los accesorios y la rejilla de la bomba, y que el volumen en el tanque inicial se encuentre en la marca previamente señalada, para asegurar que el caudal va ser el que previamente se proyectó. Por lo tanto, se debe iniciar el proceso con el sistema totalmente limpio Figura 2-32.



Figura 2-32. Condiciones iniciales del sistema.
Fuente: Autores.

2.4 Validación de datos

Hay que tener claro que el flujo en un principio se uso una maqueta prototipo, con tubería de PVC de 110mm, con el mismo sistema de bombeo y taques de entrada y salida más pequeños, debido a que el volumen del digestor y altura que se uso era menor, con estas medidas se pudo estimar un flujo y el volumen que se transporta en un determinado tiempo para el modelo físico. Hay que aclarar las medidas presentadas son las medidas reales internas del modelo y solamente en las tapas del digestor se coloca con el espesor de las paredes. En la siguiente tabla se presenta detalladas las medidas que se usó (Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Dimensiones del modelo físico.
Fuente: Autores.

Modelo Físico			
Tanque de entrada			
Ancho(cm)	Largo(cm)	Altura(cm)	Espesor(cm)
50	50	60	0,6
Tanque de salida			
Ancho(cm)	Largo(cm)	Altura(cm)	Espesor(cm)
51,2	51,2	60	0,6
Prisma de entrada			
Base mayor(cm)	Base Menor(cm)	Altura(cm)	Espesor(cm)
15	8	15	0,6
Campana de biogás			

Base mayor(cm)	Base Menor(cm)	Altura(cm)	Espesor(cm)
13	2	10,4	0,4
Cámara de salida de biogás			
Ancho(cm)	Largo(cm)	Altura(cm)	Espesor(cm)
2	2	9,2	0,4
Tapa del digestor			
Ancho(cm)	Largo(cm)	Espesor(cm)	
16,2	16,2	0,4	
Tapa de entrada del digestor			
Ancho(cm)	Largo(cm)	Espesor(cm)	
9,2	9,2	0,6	

Tanto la campana de biogás, la cámara de salida de biogás y la tapa del digestor, se encuentran unidos y forman un solo cuerpo.

Los siguientes accesorios fueron utilizados para la red de distribución del flujo, todos son de sección media pulgada, cada uno esta detallado en la siguiente (Tabla 2-3).

Tabla 2-3. Listado de accesorios.
Fuente: Autores.

Accesorios		
Tipo	Material	Cantidad
Manguera	Caucho	1,5m
Tubería	PVC	6m

En la bomba su por la abertura de la la boba consume muy características son la 4).

Codo	PVC	6
Neplo	PVC	8
Adaptador de tanque	PVC	7
Llave de paso	PVC	2
Nudo	PVC	2
Adaptador de manguera	PVC	1
Unión	PVC	1
Llave	Metal	3

caudal va ser marcado primera llave de paso; poca energía, sus siguientes (Tabla 2-

Tabla 2-4. Detalles de la Fuente: Autores.

bomba.

Características Bomba	
Hmax	0,65m
Frecuencia	60Hz
Potencia	9,84W

CAPITULO III

**GUIA METODOLOGICA PARA EL ENSAYO DE DIGESTORES
ANAEROBIOS DE LA ASIGNATURA HIDROSANITARIA DE LA
UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

3.1 Ensayo de un reactor de digestión anaerobia.

Para la realización de esta práctica se utilizará el modelo físico, que esta detallado en el capítulo anterior, que al entrar en funcionamiento ayudará a entender de una manera clara y concreta cómo funciona el tratamiento de agua residual en un digestor anaerobio.

3.1.1 Objetivo.

El objetivo es elaborar una guía metodológica concisa y didáctica, para que los estudiantes comprendan el proceso de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de digestores anaerobios.

3.1.2 Alcance.

Con esta práctica de laboratorio esperamos que el entendimiento sobre el funcionamiento de un reactor de digestión anaerobia sea más didáctico, ya que se puede observar cómo funciona cada elemento del modelo físico detallado en el capítulo anterior, también existe la posibilidad de disminuir el caudal para que aumente el tiempo de retención y así se podrá observar que existe un mejor tratamiento del agua residual empleada.

3.1.3 Definiciones.

Digestor anaerobio. - Son mecanismos que no tienen presencia de oxígeno en su funcionamiento, es decir se dan en una cámara cerrada. Sirven como mecanismos para depuración biológica de aguas residuales y residuos orgánicos fermentables, usados principalmente en zonas urbanas.



Figura 3-1. Digestor anaerobio.
Fuente: Autores.

Deflector. – Es un instrumento que sirve para separar gas y líquidos, sirve para canalizar el gas generado en la digestión anaerobia hacia la campana.



Figura 3-2. Deflector.
Fuente: Autores.

Campana. – Parte del reactor, cuya función es captar el biogás generado producto del proceso de digestión.



Figura 3-3. Campana.
Fuente: Autores.

3.1.4 Instrumentos.

Modelo físico. - Maqueta detallada en el capítulo anterior, cuenta con dos tanques de 125 litros cada uno, el digestor, en el primer tanque se coloca el agua residual, en él se encuentra una bomba pequeña (una bomba para pileta). La campana y la base del rector son desmontables para poder facilitar su limpieza.

Balanza, empleada para pedir la cantidad en gramos de los elementos necesarios para el agua sintética.

Recipiente de volumen conocido, deberá tener un volumen de 50 mililitros.

Cronómetro, para poder tomar el tiempo en que se llena el recipiente.

Destornillador, sirve en el desmontaje del modelo físico, para su posterior limpieza.

Playo, sirve en el desmontaje del modelo conjuntamente con el destornillador para que no roten los pernos.

3.1.5 Metodología.

Se realizó dos ensayos, con agua sintética y agua residual.

Para realizar el agua sintética nos guiamos en la tesis de Avendaño (2018), en donde tomamos los compuestos que son sencillos de conseguir ya que no todos se los obtiene con facilidad, la mayoría de ellos son de uso diario, sugerimos que se utilicen los siguientes elementos: leche en polvo, gelatina sin sabor, sal común, azúcar y jabón líquido; cada uno de estos compuestos tienen su distribución la cual hemos cuantificado para un volumen de 50 litros el cual va a ser el recipiente en donde se va a realizar el mezclado.

Cantidades:

Leche en polvo: 100 gramos.

Gelatina sin sabor: 7.5 gramos.

Sal común: 100 gramos

Azúcar: 300 gramos.

Jabón de tocador: 50 mililitros.

Cada uno de estos compuestos deben de ser mezclados para asegurar la homogeneidad, en dónde se debe de realizar un movimiento constante durante un tiempo aproximado máximo de 5 minutos o hasta asegurar que se disuelvan todos los compuestos del agregado.

1. Llenar el primer tanque hasta la marca 50 cm de altura con el agua residual que será tratada.
2. Mediante una prueba de laboratorio se determina la cantidad de DBO que posee el agua residual que será tratada.
3. Abrir la llave de paso hasta la marca que se encuentra en ella o aproximadamente cerca de la misma. No se recomienda abrir la llave de paso más allá de la marca para garantizar que no se sobrepase el caudal óptimo.
4. Esperar que se llene el reactor y dejar que se estabilice para luego proceder a calcular los caudales.
5. Mediante el recipiente de volumen conocidos de 20 ml y ayudado por el cronómetro se mide el tiempo en el que se llena el recipiente.
6. Procedemos a calcular el caudal mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde:

V es el volumen del recipiente (20 ml).

t es el tiempo que se demora en llenar el recipiente.

7. Realizar el paso 5 y 6 al menos tres veces para poder determinar el caudal medio mediante la siguiente fórmula:

$$Q_m = \frac{\sum Q}{n} \quad (18)$$

Donde:

$\sum Q$ es la sumatoria de caudales.

n el número de muestras.

8. Tomar una muestra del tanque de salida, medir la cantidad de DBO y compararla con la cantidad de entrada.

9. Volver a repetir todo este proceso si se desea aumentar o disminuir el caudal (abrir o cerrar la llave de paso).

3.1.6 Cálculos.

Caudales.

Medir el tiempo en el que se llena el recipiente de 20 ml:

$$t_1 = 35.7 \text{ segundos}$$

$$t_2 = 36.8 \text{ segundos}$$

$$t_3 = 37.1 \text{ segundos}$$

Después se obtiene los caudales mediante la siguiente expresión (1).

$$Q_1 = \frac{0.02}{35.7} = 0.00056 \frac{lt}{s} = 33.61 \text{ ml/s}$$

$$Q_2 = \frac{0.02}{36.8} = 0.000543 \frac{lt}{s} = 32.61 \text{ ml/s}$$

$$Q_3 = \frac{0.02}{37.1} = 0.000539 \frac{lt}{s} = 32.35 \text{ ml/s}$$

Con estos datos se puede mediante la ecuación (18):

$$Q_m = \frac{33.62 + 32.61 + 32.35}{3} = 32.86 \text{ ml/s}$$

A partir de esto se puede obtener el tiempo de retención hidráulico (TRH)

3.1.7 Resultados.

Volumen y caudal.

El caudal debido a cuestiones de taponamiento en la tubería tiene una reducción paulatina, por ello se pudo definir por medio de diferentes pruebas la reducción del caudal que existe a medida que pasa el tiempo, en la siguiente Tabla 3-1 se dan los resultados del caudal en un tiempo de 4 días.

Tabla 0-1. Caudales.

Fuente: Autores.

TRAMO	RANGO DE TIEMPO(h)	TIEMPO ACUMULADO(h)	VOLUMEN (cm³)	CAUDAL (cm³/h)	CAUDAL (cm³/min)
Llenado del digestor	11,46	11,46	27920	2436,65	40,61
Primeros 10 cm del tanque de salida	11,41	22,86	25000	2191,38	36,52
Primer día	1,14	24,00	2458	2155,80	35,93
Segundo día	25,13	48	43330	1724,01	28,73
Tercer día	24	72	39490	1645,42	27,42
Cuarto día	24	96	38510	1604,58	26,74
Quinto día	24	120	35000	1458,33	24,31

Sabiendo que el caudal mínimo que fue diseñado el digestor es de 24,24 cm³/min(este valor se obtuvo en el prediseño realizado con la tubería de 110mm de PVC) se puede asegurar un total de 5 días sin realizar ninguna limpieza en la red de distribución, ya que en el quinto día se tiene un caudal promedio de 24,31 cm³/min, si se llega a sobrepasar este tiempo, es necesario la limpieza para tener un caudal mayor que el

mínimo recomendado, la siguiente Figura 3-4 nos muestra como es la disminución del caudal en función del tiempo.

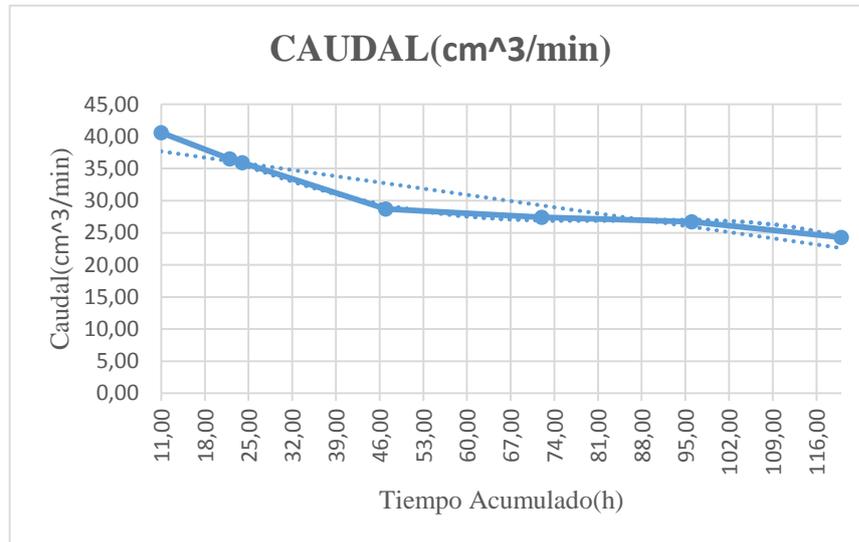


Figura 3-4. Curva de caudal acumulado.
Fuente: Autores.

Hay que recalcar que la medición del caudal se realizó midiendo el volumen que fluía diariamente, se realizó cuatro pruebas las cuales fueron de cinco días para poder medir el caudal (se encuentran detalladas en el Anexo B pruebas volumétricas en el modelo físico), se determinó el promedio de volumen diario que se trata, los cuales detallamos en la siguiente Tabla 3-2.

El volumen al estar en función del caudal se puede tener cual será la cantidad de agua mínima que se necesita en un día para cumplir con el flujo mínimo, el volumen que se puede tratar en 24 horas con un caudal de 24,24cm³/min es de 34905.6 ccm³, con este dato y los datos obtenidos se pudo corroborar que el flujo se cumple con normalidad durante cinco días, sumado a esto se encontró una ecuación matemática que define el volumen que se puede tratar diariamente, con un error aceptable de menos del uno por ciento, la cual se detalla en la Figura 3-5.

Tabla 0-2. Volúmenes medidos.
Fuente: Autores.

TIEMPO (días)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN PROYECTADO (cm³)	ERROR (%)
1	55378	55378,4	0,00142296
2	43330	43328,4	0,00369259
3	39490	39495,2	0,01316789
4	38510	38510	3,7787E-14
5	35000	35004	0,01142857
Sumatoria			0,02971201
Desviación			0,01328762

El volumen proyectado tiene un error muy bajo y aceptable menor al uno por ciento.

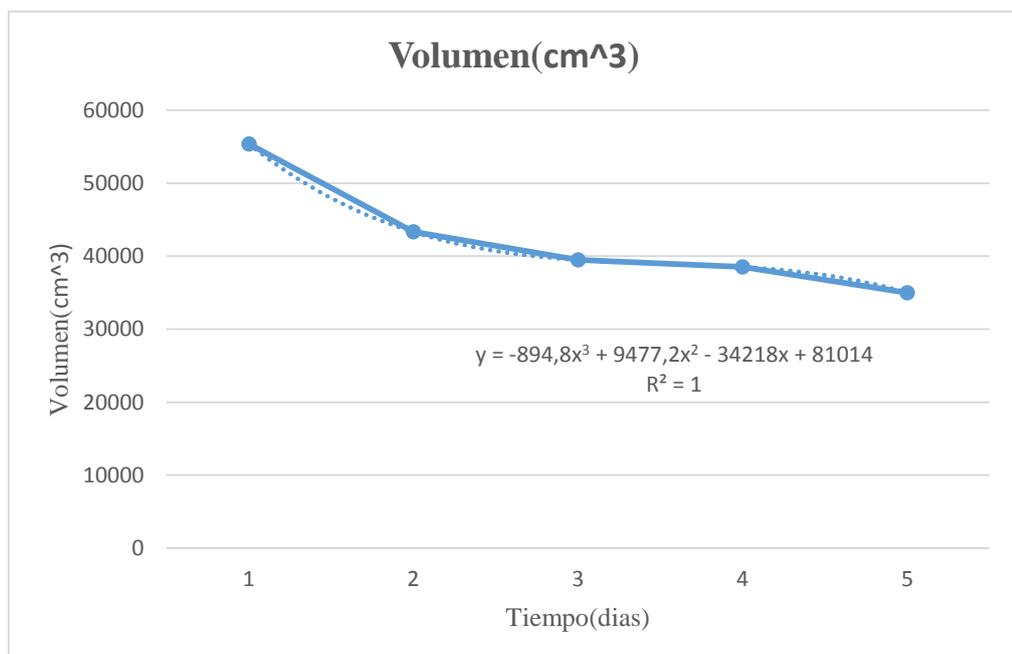


Figura 3-5. Curva de volúmenes medidos.
Fuente: Autores.

Ecuación del volumen en función del tiempo.

$$V = -894.8t^3 + 9477.2t^2 - 34218t + 81014 \quad 0 < t \leq 5 \quad (19)$$

Donde:

V es el volumen que transporta el digester en un determinado día en cm^3 .

t es el tiempo específicamente el día en donde se quiere saber el volumen en días.

Depuración del digester.

Uno de los alcances principales que tiene el modelo es la depuración del agua residual. El grado de contaminación del agua vamos a cuantificar por tres factores: contenido de DBO_5 , DQO y sólidos suspendidos totales.

Se realizó pruebas de laboratorio de saneamiento al agua residual que fue tratada en el reactor anaerobio, para determinar el contenido de DBO_5 , DQO y sólidos totales, dando como resultado los siguientes contenidos (Tabla 3-3):

Tabla 0-3. Cantidades de parámetros de entrada.

Fuente: Autores.

DBO₅	100 mg/l
DQO	256 mg/l
Sólidos Suspendidos Totales	456 mg/l

Esta agua residual fue tratada en un digester anaerobio, bajo condiciones ambientales normales, temperatura ambiente media (alrededor de 20°C); el agua residual que llega a la planta de tratamiento de Ucubamba, posee un pH estable, por lo que ya no se considera este parámetro en el tratamiento.

Esta agua residual comenzó a ser tratada un día lunes, luego de 48 horas de haber iniciado el tratamiento, y bajo las mismas condiciones iniciales, se procedió a tomar una muestra del contenido que ya fue tratado, se realizó pruebas de laboratorio, lo que dio como resultado lo siguiente (Tabla 3-4):

Tabla 0-4. Cantidades de parámetros de salida.
Fuente: Autores.

DBO₅	39 mg/l
DQO	105 mg/l
Sólidos Suspendidos Totales	36 mg/l

Al comparar los resultados pudimos observar que el tratamiento es muy eficaz, con una tasa de remoción de alrededor del 60% de DBO₅, DQO y sólidos suspendidos totales.

Altura del flujo vertical.

Como se pudo ver en la imagen 1 del capítulo inicial, existen diferentes zonas den los digestores, las mismas poseen su respectiva altura; el afluente de encuentra en la zona inicial del sistema es decir a una altura de cero, la primera zona llamada de digestión en nuestro modelo físico posee una altura de 22,5 cm, siendo en esta zona donde se depositan la mayor cantidad de microorganismos; la zona de fluidificación posee una altura de 98.8 cm desde la zona de digestión; la zona de sedimentación es imperceptible para la vista siendo sumamente pequeña.

Al igual que la zona de sedimentación, la franja de espuma no existe o es demasiado pequeña para poder medir, pero lo que sí se puede ver es una ligera salida de gases en la cámara de biogás cuando el modelo ha trabajado por más de tres días.

Se detalla las alturas de las zonas existentes en las siguientes figuras: Figura 3-6 y Figura 3-7.

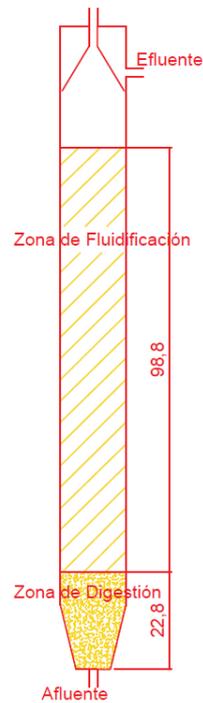


Figura 3-6. Zonas del reactor.
Fuente: Autores.



Figura 3-7. Identificación de las zonas del reactor en el modelo real.
Fuente: Autores.

3.2 Elaboración de guías para la realización de ensayos.

3.2.1 Ensayo en un digestor anaerobio.

Objetivo.

El objetivo es elaborar una guía metodológica concisa y didáctica, en la que se detallará paso a paso los puntos que se debe seguir para poder llevar a cabo la práctica de laboratorio sin ningún inconveniente o contratiempo, para que al final se pueda obtener los resultados esperados y que los estudiantes comprendan el proceso de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de digestores anaerobios.

Descripción.

Los digestores anaerobios son mecanismos para el tratamiento de aguas residuales, este dispositivo consiste de una cámara (reactor), en este caso de flujo asciende lentamente, dando la oportunidad de la proliferación de microorganismos en la base del reactor, estos son los encargados de realizar el proceso de digestión anaerobia (sin la presencia de oxígeno).

Este último punto es muy relevante, ya que, al no contar con la presencia de oxígeno, se genera biogás, que es canalizado mediante el deflector hacia la campana recolectora, para ser expulsada del reactor.

Fórmulas utilizadas.

Ecuación de caudal.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde:

Q= caudal.

V= Volumen del recipiente conocido (litros).

t= tiempo en el que se llena el recipiente tomado por cronómetro (segundos).

Ecuación del caudal medio.

$$Q_m = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} \quad (18)$$

Donde:

Q_m = caudal medio.

Q_1 = Primer caudal calculado (litros/segundo).

Q_2 = Segundo caudal calculado (litros/segundo).

Q_n = n caudal calculado (litros/segundo).

n= Número de muestras.

Se recomienda mínimo 3 muestras.

Modelo físico.

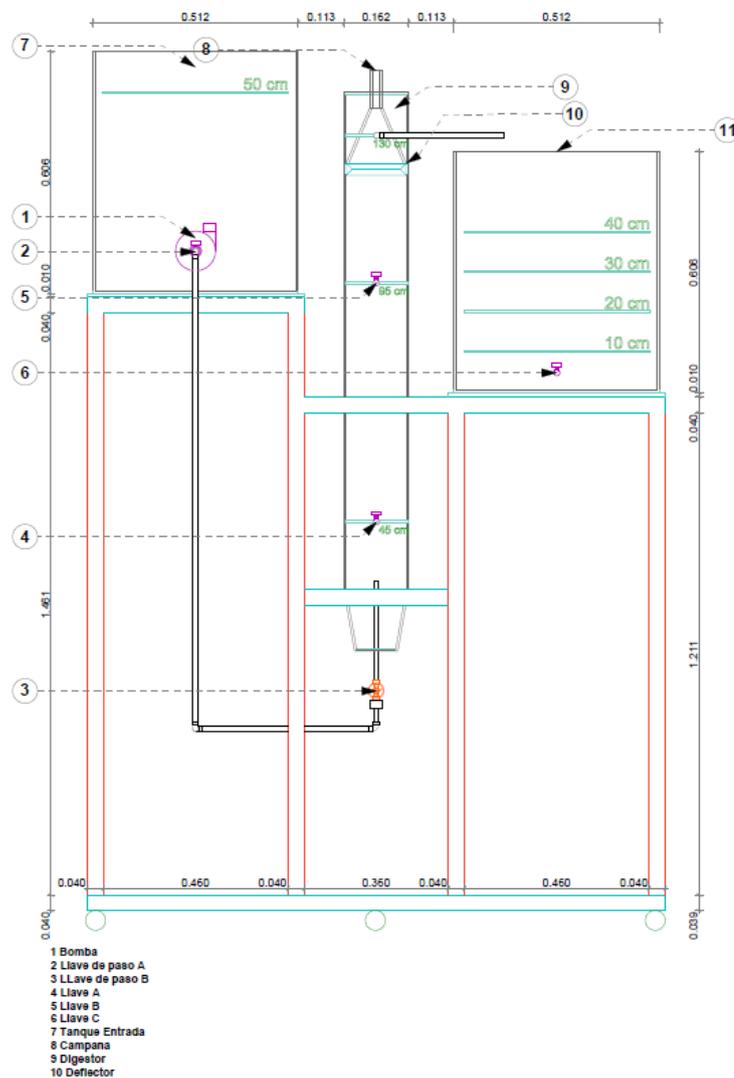


Figura 3-8. Modelo físico.
Fuente: Autores.



Figura 3-9. Modelo físico.
Fuente: Autores

Guía para realizar la práctica del reactor anaerobio.

Previamente se debe preparar el agua sintética, la que será utilizada para la práctica de laboratorio.

1. Llenar el recipiente de 50 litros con agua potable, esto se debe realizar hasta tener 125 litros, respetando las proporciones.

2. Pesarse cada uno de los compuestos en una balanza electrónica.

Cantidades:

Leche en polvo: 100 gramos.

Gelatina sin sabor: 7.5 gramos.

Sal común: 100 gramos

Azúcar: 300 gramos.

Jabón de tocador: 50 mililitros.



Figura 3-10. Componentes del agua residual.
Fuente: Autores.

3. Proceden los compuestos en el recipiente.
4. Mover constantemente la próxima 5 minutos asegurarse que se disolvieron los compuestos para asegurar la medida de la mezcla.
5. Posicionar la bomba en el tanque A, verificar que la manguera esté conectada correctamente a la bomba y al accesorio de salida del tanque.



Figura 3-11. Conexión de la bomba.
Fuente: Autores.

6. Llenar el tanque A hasta la altura indicada, para garantizar un volumen útil de 125 litros.



Figura 3-12. Tanque de entrada.
Fuente: Autores.

7. Determinar mediante pruebas de laboratorio la cantidad de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) que posee el agua que será tratada.
8. Conectar la bomba, evitar mojar el enchufe.



Figura 3-13. Bomba.
Fuente: Autores.

9. Abrir la llave de paso del tanque A, hasta la marca indicada, no sobrepasar la señal.



Figura 3-14. Abertura de llave de paso 1.
Fuente: Autores.

- 10.** Abrir la llave de paso del reactor, previamente cerrar las llaves laterales de la cámara para evitar la fuga de agua.
- 11.** Asegurar que después de 3 a 7 minutos empiece a fluir por medio de la tubería el líquido en el digestor, en caso de que no fluya, abrir el nudo 1 y asegurarse que fluya abriendo suavemente un poco más la llave de paso sin sobrepasar la marca, esperar que se cumpla en flujo en el tiempo antes mencionado



Figura 3-15. Llave de paso del reactor.
Fuente: Autores.

- 12.** Esperar que se llene el reactor hasta los 130 cm, el tiempo que tomará en llenarse está alrededor de 9 a 12 horas y esperar que se estabilice, luego de ello, utilizando los recipientes de volumen conocido y con ayuda del cronómetro, tomar el tiempo en el que se llenan estos para proceder a calcular los caudales.



Figura 3-16. Marcas de las alturas del reactor.
Fuente: Autores.

- 13.** Con ayuda de una cámara fotográfica capturar el estado del reactor, para determinar las características visuales, En la parte inferior en donde se generarán microorganismos en mayor cantidad, en la marca de la llave a 45 cm, en la segunda llave a 95 cm y en la salida del reactor los 130 cm.
- 14.** Anote los valores en la hoja correspondiente al ensayo, tanto los valores de caudales y las características visuales que se observan en cada marca previamente indicada.
- 15.** Calcular el caudal mediante la fórmula (1).
- 16.** Repetir los pasos 11, 13 y 14 las veces que considere necesario (se recomienda mínimo 3 veces) y luego calcular el caudal medio mediante la fórmula (18).
- 17.** Una vez calculado el caudal, y que se haya estabilizado el reactor, tomar una muestra de la llave 1, llave 2 y de las tuberías de descarga hacia el tanque F en los envases de muestras, después de 12 horas, es decir, que haya transcurrido un día desde el inicio de la práctica, asegurarse que en el tanque F esté levemente sobre la marca de los 10 cm.



Figura 3-17. Tanque de salida.
Fuente: Autores.

18. Tomar fotos de cada una de las muestras, y anotar las características que presenta el agua en la entrada, en las llaves y a la salida hacia el tanque F.



Figura 3-18. Tratamiento de agua residual.
Fuente: Autores.

- 19.** Dejar que el reactor trabaje durante 24 horas, asegurándose que la altura de agua en el tanque F este próxima a la línea de 30cm.



Figura 3-19. Tanque de salida.
Fuente: Autores.

- 20.** Realizar el muestreo de las llaves y las tuberías de salida, de la misma manera que en el paso 16 y 17.
- 21.** Realizar más agua sintética de la misma manera que en los pasos 1, 2, 3 y 4, para un volumen de 100 litros y verter en el tanque A.
- 22.** Vaciar el tanque F por medio de la llave.
- 23.** Observar después de 48 horas el estado del tratamiento, observando que el líquido se encuentra en el tanque F este sobre la línea de 30cm, hay que dejar claro que el caudal va ir disminuyendo por el taponamiento de las tuberías, en este punto se debe también repetir el paso 20.



Figura 3-20. Agua tratada.
Fuente: Autores.

24. Repetir el paso 21 y 22, se debe tener en cuenta que en este punto solamente se necesita 50 litros más para completar los cinco días para los cuales está diseñado el modelo físico, una vez cumplido este tiempo se procede a la limpieza de la red de distribución, hay que saber que el caudal disminuye en este tratamiento mientras más lento es el flujo es más óptimo, a esto hay que agregar que el proceso se puede dar hasta un tiempo determinado mientras no exista taponamiento total en las tuberías, eso va depender de la cantidad de sólidos y la densidad del agua sintética a tratar, con esto se puede agregar el volumen de agua sintética necesaria dependiendo del tiempo que proponga el profesor para la práctica.
25. Completada la limpieza de la red de distribución se repite cada uno de los puntos anteriores hasta cumplir con el tiempo propuesto por el profesor, respetando la limpieza de la red a un lapso de cada cinco días.
26. Una vez cumplido el tiempo proyectado, tomar una muestra del tanque F, y por medio de pruebas de laboratorio encontrar el contenido de DBO₅. Hacer una comparación entre la demanda bioquímica inicial y la final.

Limpieza.

27. Cerrar las llaves de paso.
28. Desunir los nudos, tanto el digestor y tanque A de la red de distribución.
29. Abrir totalmente la llave de paso del tanque A, del digestor y del tanque F, de esta manera liberando de fluido al sistema.

Debido a que en el prisma de entrada existe un nepló, el cual impide que el fluido ingrese por la base, sino a una altura de 25 cm, el prisma estará con líquido, por lo tanto, se debe desmontar el digestor.

30. Proceder a retirar la placa de seguridad del digestor.
31. Retirar la campana de biogás.
32. Con sumo cuidado, retirar el reactor de la estructura de apoyo y proceder a desunir el prisma de la base del resto del digestor, con la ayuda de un destornillador tipo estrella y unas pinzas, para evitar que se aíslen las tuercas.
33. Desunir la bomba del sistema.
34. Retirar los tanques A y F de la estructura.

35. Proceder a la limpieza, con sumo cuidado humedecer cada una de las paredes, y enjabonarlas para evitar bacterias y malos olores, tener un mayor cuidado en las esquinas, debido a que son zonas muertas y se generan microorganismos en mayor cantidad, posteriormente proceder con enjuague y secados del modelo físico.
36. Volver a montar el modelo físico, teniendo sumo cuidado en la unión del prisma de entrada con el cuerpo del digestor.

Así el modelo físico estará listo para una nueva práctica, asegurando sus condiciones iniciales.

Conclusiones del capítulo 3.

Gracias al modelo físico es más fácil entender el funcionamiento que tiene el digestor anaerobio y con la ayuda de la guía metodológica se tiene los pasos necesarios para realizar la práctica de laboratorio de una manera práctica y sencilla, con lo cual los estudiantes no tendrán problemas en el desarrollo de la aplicación del sistema, evitando inconvenientes tal como repetir el tratamiento, etc. También se muestra los cuidados que se debe tener para con el reactor para que la vida útil del modelo físico sea larga y los estudiantes puedan sacarle el máximo provecho.

El punto crucial para evitar fallar es la constante inspección diaria del proceso para evitar taponamientos, tomando en cuenta cada una de las consideraciones y recomendaciones que se debe aplicar en el proceso.

CONCLUSIONES.

Con la construcción del modelo y la elaboración de la guía metodológica, se pudo ejemplificar claramente como es un proceso de digestión anaerobia, dejando claro cuál es la utilidad y los resultados que genera este tratamiento.

Se dio a conocer cada uno de los conceptos necesarios para el tratamiento de digestión anaerobia y las condiciones tanto físicas, mecánicas y ambientales que interviene; dejando clara la pauta teoría para la aplicación del modelo físico.

En el segundo capítulo se realizó la construcción del modelo físico, mostrando cada una de las condicionantes y falencias que se originaron, realizando pruebas con diferentes recipientes previamente, con dimensiones más pequeñas, dejando claro como es el proceso para el prototipo final, generando como resultados dos tanques de 50 x 50 x 60 centímetros, un digestor compuesto de: un prisma de base superior 15 centímetros, base inferior 8 centímetro y altura de 15cm; un cuerpo de digestión de 15 x 15 x 125 centímetros; y una campana de biogás de forma prismática de base superior 2 centímetros, base inferior 13 centímetros, altura de 10,4 centímetros y cámara de salida de 4,8 centímetros, con una red de distribución de PVC con diámetro de media pulgada y una bomba de altura máxima 65 centímetros.

El capítulo final explicamos cómo es la aplicación en si del modelo físico en una práctica de laboratorio, por medio de una guía metodológica, dando una explicación detallada de los pasos a seguir para una correcta aplicación del sistema.

RECOMENDACIONES.

Para partir con el proceso se debe tener un conocimiento previo claro de la teoría, en los digestores anaerobios, cuál es su mecanismo y sus condicionantes, para poder identificar de manera concisa los resultados que se van a obtener, en la aplicación de la práctica de laboratorio.

Antes de empezar el proceso se debe tener sumo cuidado con los elementos, debido que son de vidrio por ello se debe asegurar que los frenos de pie de encuentren puestos para evitar movimientos no deseados o en lo peor situación la ruptura del modelo físico.

Antes de empezar asegurarse que el modelo físico se encuentre en óptimas condiciones iniciales, es decir, limpio, sin taponamiento, con energía la bomba y abertura de llaves correcta.

Seguir cada uno de los puntos de la guía metodológica respetando cada uno, sin omitir ninguno de ellos, ya que en caso de hacerlo se obtendrán resultados fallidos.

En caso de que el proceso se encuentre estancado, se debe cerrar totalmente las llaves de paso y proceder a desunir la red de distribución por medio de los nudos, y realizar el des taponamiento en la tubería, para el posterior tratamiento.

Es el punto clave de este proceso es el flujo ascendente, el cual su fluidez debe ser sumamente baja, al momento de tomar las medidas se debe asegurar que el flujo este en el rango previamente proyectado, respetando la abertura de la primera llave.

Una vez concluido el proceso ya que se va tratar agua sintética o residual, se debe realizar una minuciosa limpieza del modelo físico dejándolo en condiciones iniciales, para una futura aplicación del mismo.

Bibliografía

- Acosta, Y., & Obaya, M. C. (2005). *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I*. La Habana: Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar .
- Avendaño, P. (2018). *Producción de agua residual sintética como candidato a material de referencia en los parámetros de pH, sólidos suspendidos totales y demanda química de oxígeno*. Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Bernache, G., & Bocco, G. (2000). La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 19-26.
- Caicedo, F. (2006). *Diseño, construcción y arranque de un reactor U.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Castro, L., & Harris, W. (2018). *Elaboración del modelo físico y guía metodológica para el ensayo de compuertas hidráulicas de la asignatura Mecánica de Fluidos de la Universidad Del Azuay*. Cuenca.
- Gálvez González, A. (2003). Gálvez González, A. M. (2004). *Guía metodológica para la evaluación económica en salud*. La Habana: Revista Cubana de Salud Pública.
- Lo Guzzo, D. (2017). *Diseño de un digestor de fangos anaerobio con producción de biogás*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Masapanta, M. (2016). *Lectura crítica*. Cotopaxi: Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Mass-Sossa, A. (2011). *Guía metodológica para el diseño, ejecución y control de tareas docentes integradoras en Morfofisiología Humana*. La Habana: MediSur.
- Ruiz, I., Álvarez, J. A., & Soto, M. (2001). Ruiz, I., Álvarez, J. A., & Soto, M. (2001). *El potencial de la digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales urbanas y efluentes de baja carga orgánica*. Campus da Zapateira: Universidad de la Coruña.
- Seghezzo, L. (2004). *Tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas en regiones subtropicales*. Wageningen: Wageningen University.

ANEXOS

ANEXO A. Determinación del caudal mínimo y máximo.

Tablas de pruebas.

Tabla Anexo A. Mediciones de las pruebas en el prototipo.

Fuente: Autores.

PRUEBA 1 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	6,2	38,71	0,20

PRUEBA 2 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	7,2	33,33	0,24

PRUEBA 3 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	8,5	28,24	0,28

PRUEBA 4 EN VASO DE 240ML							
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	9,9	24,24	0,32

PRUEBA 5 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	6,5	36,92	0,21

PRUEBA 6 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	6,9	34,78	0,23

PRUEBA 7 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	7,4	32,43	0,24

PRUEBA 8 EN VASO DE 240ML							
----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	8,4	28,57	0,28

PRUEBA 9 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	6,3	38,10	0,21

PRUEBA 10 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	7,8	30,77	0,26

PRUEBA 11 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	8,50	28,24	0,28

PRUEBA 12 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	9,3	25,81	0,31

PRUEBA 13 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	5,91	40,62	0,19

PRUEBA 14 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	6,98	34,38	0,23

PRUEBA 15 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	8,4	28,57	0,28

PRUEBA 16 EN VASO DE 240ML							
-----------------------------------	--	--	--	--	--	--	--

DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	9,4	25,53	0,31

PRUEBA 17 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	6,2	38,71	0,20

PRUEBA 18 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	7,4	32,43	0,24

PRUEBA 19 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)
11	120	95,03	11403,98	240	8,65	27,75	0,29

PRUEBA 20 EN VASO DE 240ML							
DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm²)	VOLUMEN (cm³)	VOLUMEN VASO (ml)	TIEMPO (min)	CAUDAL (ml/min)	TRH (días)

11	120	95,03	11403,98	240	9,7	24,74	0,32
----	-----	-------	----------	-----	-----	-------	------

ANEXO B. Pruebas volumétricas en el modelo físico.

Tablas de pruebas volumétricas.

Tabla Anexo B. Mediciones de volúmenes en prototipos.
Fuente: Autores.

PRUEBA 1	
TIEMPO (días)	VOLUMEN (cm ³)
1	56120
2	43420
3	39510
4	38430
5	34560

PRUEBA 2	
TIEMPO (días)	VOLUMEN (cm ³)
1	55620
2	43410
3	39540
4	38620
5	35160

PRUEBA 3	
TIEMPO (días)	VOLUMEN (cm ³)
1	54620

PRUEBA 4	
TIEMPO (días)	VOLUMEN (cm ³)
1	55152

2	43520
3	38410
4	36920
5	35050

2	42970
3	40500
4	40070
5	35230

