



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR DOMÉSTICO PARA PRODUCIR BIOGÁS

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

SKARLET ALEJANDRA GUERRA ACOSTA
skarlet.guerra@epn.edu.ec

ISRAEL DAVID PÁEZ MALQUIN
israel.paez@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ANGEL ADALBERTO PORTILLA AGUILAR, MSC.
Angel.portilla@epn.edu.e

Quito, Octubre 2022

DECLARACIÓN

Nosotros, Israel David Páez Malquin y Skarlet Alejandra Guerra Acosta, declaramos bajo juramento que el trabajo escrito es de nuestra propia autoría, que no ha sido presentado previamente para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.



Israel David Páez Malquin



Skarlet Alejandra Guerra Acosta

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Israel David Páez Malquin y Skarlet Alejandra Guerra Acosta, bajo mi supervisión.



Ing. Ángel Adalberto Portilla Aguilar, MSC.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mi padre por apoyarme aun cuando las circunstancias de la vida no han sido favorables, por haberme enseñado el valor del esfuerzo y trabajo duro, y por siempre brindarme su amor y confianza. A mis profesores por haberme brindado el conocimiento y las herramientas suficientes que ahora aplico en mi vida profesional. A la Facultad de ingeniería mecánica y a los amigos que en ella forme, a mi gran amiga y compañera de Tesis Skarlet Guerra por su apoyo y amistad, y a nuestro tutor de tesis, el ingeniero Ángel Portilla, quien con sus conocimientos y ayuda nos permito sacar este proyecto adelante....

Israel David Páez Malquin

Con este trabajo concluye una etapa de mi vida llena de anhelos, momentos increíbles, tristezas, pero sobre todo unas ganas incalculables de seguir adelante, gracias a la universidad aprendí a tener berraquera en los retos que la vida coloca frente a nosotros, me siento muy agradecida con mi mama, Aleyda Acosta por el gran apoyo que me ha brindado en la vida y en la universidad, gracias a mi madre por las palabras de aliento y ayudarme a ver las cosas con una perspectiva diferente, gracias a mis tías por estar pendientes de mi desarrollo como profesional, gracias a mis amigos, a los que han pasado por mi vida y a los que ahora forman parte de ella, gracias a mi compañero de tesis Israel Páez por ser un gran amigo y un gran apoyo en este trabajo, gracias a la señora Lorena Malquin madre de mi compañero de tesis, quien nos apoyó desde el día uno en este proyecto, gracias a Sayra Zambrano por creer en nosotros y estar pendiente de nuestra tesis, gracias a nuestro director de tesis Ángel Portilla por ser un gran apoyo, finalmente termino agradeciendo a Dios y a la vida por permitirme seguir acá.

Skarlet Alejandra Guerra Acosta

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a dios, a mi padre por haber depositado siempre su confianza en mí, a José Julio Díaz por ser una guía en mi vida, y a mi madre por ser mi pilar y fortaleza.

A Sayra Zambrano por ser un soporte en mi vida y a mi león Bobby Fischer por regalarme todo su amor y cariño.

Israel David Páez Malquin

Dedico este trabajo a mi madre Aleyda, que es una mujer llena de fortaleza, honestidad, lealtad, compromiso, un gran corazón y grandes conocimientos de la vida.

Skarlet Alejandra Guerra Acosta

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
General	3
Específicos.....	3
1 MARCO TEÓRICO:	4
1.1 Clasificación de los residuos.....	4
1.1.1 Según su origen	4
1.1.2 Según su composición.....	4
1.2 Generación de residuos en el país	4
1.3 Composición de los residuos	5
1.4 Manejo de residuos solidos	6
1.5 Biomasa	7
1.5.1 Tipos de biomasa	7
1.6 Biogás	7
1.6.1 Características del biogás.....	8
1.6.2 Composición de biogás	9
1.6.3 Digestión anaeróbica y sus etapas	9
1.7 Biodigestores.....	11
1.7.1 Modelos de biodigestores domésticos	11
1.7.2 Partes del biodigestor	13
1.8 Factores que influyen en el proceso de digestión anaeróbica.....	13
1.8.1 Alcalinidad y PH	14
1.8.2 Relación carbono/nitrógeno	14
1.8.3 Concentración de solidos	15
1.8.4 Temperatura.....	15
1.8.5 Agitación.....	16
1.8.6 Tiempo de retención	16
1.8.7 Sustancias inhibidoras del proceso.....	16
2 Metodología	17
2.1 Ubicación geográfica del proyecto	19
2.2 Condiciones ambientales del sector	19
Fuente: (The weather Company, 2021)	20
2.3 Caracterización de residuos	20

2.3.1	Disponibilidad de Biomasa.....	20
	Fuente: Propia	21
2.3.2	Reporte de análisis de residuos.....	22
	Fuente: (Jaramillo, 2011)	22
2.4	Consumo de GLP en los hogares	22
2.5	Determinación del consumo de biogás	23
2.5.1	Determinación de la cantidad de sustrato necesaria.....	24
2.6	Diseño del biodigestor	26
2.6.1	Dimensionamiento de biodigestor y sistema de almacenamiento	26
2.6.2	Selección de elementos secundarios.....	31
2.7	Construcción.....	33
2.7.1	Montaje del biodigestor y accesorios	33
2.8	Protocolo de pruebas.....	37
2.8.1	Prueba de Hermeticidad sin carga.....	38
2.8.2	Prueba de temperatura.....	39
2.8.3	Prueba de pH	41
2.8.4	Prueba de calidad de biogás	41
2.8.5	Prueba de calidad del biol y biomasa	42
2.8.6	Prueba de combustión del biogás.....	43
2.8.7	Prueba de generación de biogás	44
3	Resultados y discusión.....	51
3.1	Prueba de hermeticidad sin carga	51
3.2	Prueba de generación de biogás	52
3.3	Prueba de Temperatura.....	54
3.4	Prueba de Ph.....	56
3.5	Prueba de calidad de biogás	57
3.6	Prueba de calidad del biol y biomasa	58
3.7	Prueba de generación de biogás	60
3.7.1	Cantidad estimada de biogás producido.....	60
3.7.2	Determinación de cantidad de biogás consumido.....	61
3.8	Costos del biodigestor	64
3.8.1	Costos Directos	64
3.8.2	Costos Indirectos.....	66
4	Conclusiones y Recomendaciones	67
4.1	Conclusiones.....	67
4.2	Recomendaciones.....	67
5	Bibliografía.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Caracterización de residuos sólidos receptados (EMGIRS, 2013) 6

Figura 1.2 Proceso de digestión Anaeróbica (Cusi, 2018) 10

Figura 1.3 Biodigestor (Pizano, 2018)..... 11

Figura 1.4 Biodigestor semicontinuo (Varnero, 2011) 12

Figura 1.5 Biodigestor tipo Batch (Ecoinventos, 2021)..... 12

Figura 2.1 Metodología. Fuente: Propia..... 18

Figura 2.2 Ubicación del proyecto (GOOGLE MAPS, 2021) 19

Figura 2.3 Diagrama de temperaturas (The weather Company, 2021)..... 20

Figura 2.4 Biomasa de la familia del caso de estudio. Fuente: Propia. 21

Figura 2.5 Pesaje de la biomasa disponible. Fuente: Propia..... 21

Figura 2.6 Factor de corrección para el tiempo de retención (Olaya, 2009) 25

Figura 2.7 Perforación lateral del tanque. Fuente: Propia. 34

Figura 2.8 Conexión agujero superior lateral del tanque. Fuente: Propia. 34

Figura 2.9 Conexiones laterales del biol y limpieza. Fuente: Propia..... 35

Figura 2.10 Unión de tanque y adaptador PVC. Fuente: Propia..... 35

Figura 2.11 Conexión de la boca de carga. Fuente: Propia..... 35

Figura 2.12 Conexión de la salida de biogás. Fuente: Propia. 36

Figura 2.13 Conexión Filtro de Sulfuro de Hidrógeno. Fuente: Propia. 36

Figura 2.14 Soldadura del tanque. Fuente: Propia..... 37

Figura 2.15 Soldadura y pintura del tanque. Fuente: Propia. 37

Figura 2.16 Conexión de compresor a biodigestor. Fuente: Propia..... 38

Figura 2.17 Temperatura interior y exterior del biodigestor. Fuente: Propia. 40

Figura 2.18 Volumen de control. Fuente: Propia. 45

Figura 2.19 Esquema del calentamiento de agua. Fuente: Propia. 46

Figura 2.20 Lectura de manómetro con carga. Fuente: Propia 49

Figura 2.21 Verificación de temperaturas con agua caliente. Fuente: Propia. 50

Figura 3.1 Caída de presión en función del tiempo. Fuente: Propia 52

Figura 3.2 Incremento de presión en manómetro. Fuente: Propia..... 52

Figura 3.3 Monitoreo de presión en el biodigestor. Fuente: Propia. 54

Figura 3.4 Monitoreo de temperaturas del biodigestor. Fuente: Propia. 56

Figura 3.5 Prueba de pH. Fuente: Propia..... 56

Figura 3.6 Gráfica pH vs Tiempo. Fuente: Propia. 57

Figura 3.7 Calidad del Biol Producido. Fuente: Propia..... 59

Figura 3.8 Cocción de Alimentos. Fuente: Propia. 60

Figura 3.9 Color de la llama del biogás. Fuente: Propia.....	60
--	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición promedio de subproductos Estación de Transferencia SUR	5
Tabla 1.2 Características fisicoquímicas de los distintos tipos de residuos	6
Tabla 1.3 Energía equivalente del Biogás vs otras fuentes	8
Tabla 1.4 Biogás producido en función de los sólidos volátiles	8
Tabla 1.5 Composición de biogás de acuerdo al tipo de biomasa.....	9
Tabla 1.6 Relación Carbono/nitrógeno de diferente tipo de materia orgánica	15
Tabla 1.7 Rangos de temperatura y tiempo de fermentación	16
Tabla 1.8 Sustancias inhibitoras en la digestión anaeróbica	17
Tabla 2.1 Temperaturas de la Tola año 2021	20
Tabla 2.2 Promedio de toma de muestras	21
Tabla 2.3 Relación C/N.....	22
Tabla 2.4 Volumen del Biodigestor en función de biomasa y demanda	27
Tabla 2.5 Estimación de Biogás y Metano producido.....	31
Tabla 2.6 Equipos prueba de Hermeticidad sin carga.....	39
Tabla 2.7 Equipos para prueba Temperatura.....	40
Tabla 2.8 Equipos para prueba de pH	41
Tabla 2.9 Materiales necesarios para prueba de calidad de biogás	42
Tabla 2.10 Materiales necesarios para prueba de biol y biomasa	43
Tabla 2.11 Equipos para prueba de Hermeticidad con carga.....	50
Tabla 3.1 Resultados de prueba de hermeticidad sin carga.....	51
Tabla 3.2 Presión en el biodigestor.....	53
Tabla 3.3 Temperatura ambiente, y temperatura interior del biodigestor.....	54
Tabla 3.4 Resultados de medición de pH.....	57
Tabla 3.5 Características de biogás.....	58
Tabla 3.6 Propiedades de biogás	58
Tabla 3.7 Datos de presión y volumen del biodigestor.....	61
Tabla 3.8 Temperaturas del agua y el ambiente	61
Tabla 3.9 Propiedades termo físicas del aire.	62
Tabla 3.10 Propiedades termo físicas del agua	63
Tabla 3.11 Resultados del biogás consumido y producidos	64
Tabla 3.12 Costos directos de materiales y accesorios.....	65
Tabla 3.13 Costos de Mano de Obra Directa. Fuente: Propia.....	65
Tabla 3.14 Costos de Máquinas y Herramientas. Fuente: Propia.....	66
Tabla 3.15 Costos Indirectos.	66
Tabla 3.16 Costo total.....	66

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Planos de Conjunto, Ensamble y Taller	
Anexo 2. Reporte de caracterización de Biomasa.....	
Anexo 3. Reporte de caracterización de Biogás.....	
Anexo 4. Reporte de caracterización de Biol.....	
Anexo 5. Especificaciones del Tanque tipo botella de polietileno.....	
Anexo 6. Verificación de la sonda en agua helada.....	
Anexo 7. Verificación de la sonda en agua a temperatura ambiente.....	
Anexo 8. Verificación de la sonda en agua caliente.	
Anexo 9. Propiedades termo físicas del aire.	
Anexo 10 Propiedades del agua	

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un biodigestor doméstico para la generación de biogás a través de residuos orgánicos. El proceso inicio con la ubicación del proyecto en la tola, barrio de la ciudad de Quito, seguido de la caracterización de la biomasa, donde se verifico que la biomasa del caso de estudio tiene las características suficientes para el correcto funcionamiento del biodigestor, luego se procedió a diseñar el mismo en función de la demanda energética y de la disponibilidad de biomasa. Una vez construido, se procedió a evaluar el desempeño del biodigestor mediante un protocolo de pruebas donde se vio la hermeticidad, pH y temperatura, teniendo valores de pH de 7 y rangos de temperatura promedio de 19 a 40 °C, se verifico que el biodigestor estaba dentro de los rangos establecidos para la formación de bacterias metanogénica y la generación de biogás. Pasados los 52 días de retención se continuo con el protocolo de pruebas y se evaluó la calidad del biol producido, obteniéndose que la biomasa del caso de estudio tenía una relación C/N de 13,86, y el biol una concentración de 2% de nitrógeno, 1% de fosforo y 3% de potasio, demostrando así que el biol del caso de estudio tiene mejores características que otro tipo de Bioles orgánicos.

Para evaluar la calidad del biogás se realizó un análisis cromatográfico en el laboratorio de análisis instrumental del departamento de ingeniería Química de la EPN, donde se reportó que el biogás producido tiene una concentración de metano de 21,11% y un poder calorífico de 7152,35 KJ/m³. Debido a las características anteriormente mencionadas el uso del biogás estuvo direccionado a la cocción de alimentos de baja demanda energética como desayunos, recalentados y algunos fritos, llegándose a obtener un tiempo de cocción máximo de 20 minutos.

En cuanto a la producción, luego de los 52 días del tiempo de retención se tiene una producción de biol diaria de 2 litros, y una producción de biogás 31,25 litros, donde esta última fue determinada de manera indirecta y verificada experimentalmente, finalmente de acuerdo con el protocolo de pruebas se concluyó que el biodigestor domestico funciona adecuadamente.

Palabras clave: Biodigestor, Biomasa, Biol, Biogás.

ABSTRACT

The objective of this work is to design a domestic biodigester for the generation of biogas from organic waste. The process started with the location of the project in la tola, a neighborhood in the city of Quito, followed by the characterization of the biomass, where it was verified that the biomass of the case study has sufficient characteristics for the proper functioning of the biodigester, then proceeded to design it according to the energy demand and the availability of biomass. Once built, the performance of the biodigester was evaluated by means of a test protocol where the airtightness, pH and temperature were checked, having pH values of 7 and average temperature ranges from 19 to 40 °C, it was verified that the biodigester was within the established ranges for the formation of methanogenic bacteria and the generation of biogas. After 52 days of retention, the testing protocol was continued and the quality of the biogas produced was evaluated, obtaining that the biomass of the case study had a C/N ratio of 13.86, and the biogas had a concentration of 2% nitrogen, 1% phosphorus and 3% potassium, thus demonstrating that the biogas of the case study has better characteristics than other types of organic biogas.

To evaluate the quality of the biogas, a chromatographic analysis was carried out in the instrumental analysis laboratory of the Chemical Engineering Department of the EPN, where it was reported that the biogas produced has a methane concentration of 21.11% and a calorific value of 7152.35 KJ/m³. Due to the aforementioned characteristics, the use of biogas was aimed at cooking foods with low energy demand, such as breakfast, reheated foods and some fried foods, with a maximum cooking time of 20 minutes.

In terms of production, after 52 days of retention time, the daily production of biol was 2 liters, and the biogas production was 31.25 liters, where the latter was determined indirectly and verified experimentally, finally, according to the test protocol, it was concluded that the domestic biodigester works properly.

Keywords: Biodigester, Biomass, Biol, Biogas.

INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país que tiene una alta producción de residuos, misma que debido al incremento de la población se vuelve incontrolable, evidenciándose la necesidad de establecer nuevas alternativas para el manejo de los mismos. Rellenos sanitarios como el Inga ubicado en el norte de Quito, no se dan abasto con la cantidad de basura recibida a diario de los habitantes. Para lo cual se han planteado diferentes propuestas para disminuir este problema, entre las que se tiene la ampliación de espacios y creación de nuevos depósitos para seguir colocando los residuos, alternativas que lejos de mitigar el problema incrementan el número de personas afectadas por la producción de gases tóxicos y lixiviados generados por la basura (Costales, 2020)

Una alternativa que puede aprovechar los desechos generados en los hogares ecuatorianos son los biodigestores, que luego del proceso de digestión anaeróbica producen biogás que puede ser usado para la cocción de alimentos y calentamiento de agua.

Países como China, India y Nepal aprovechan su densidad poblacional y su generación de residuos mediante biodigestores, siendo estos países los que lideran las cifras en cuanto a construcción de biodigestores a escala familiar (Ferrer , Uggetti, Poggio, & Velo, 2015). Si bien en la región también se han realizado varios trabajos orientados a la construcción de biodigestores, estos no están enfocados en el sector doméstico como tal, sino más bien son biodigestores pequeños aplicados al campo para el aprovechamiento del excremento de ganado, como lo son los trabajos de Palacios en Perú y Cusí en Ecuador (Cusi, 2018). Dentro de la región entre los trabajos más orientados a la construcción de biodigestores domésticos se tiene el propuesto por Jaramillo en México, trabajo que parte de la necesidad de usar los residuos domésticos que van a los rellenos sanitarios con el fin de generar energía (Jaramillo, 2011). Pese a que en Ecuador no se han realizado trabajos investigativos de biodigestores a escala domestica para el sector Urbano, se tienen empresas que importan biodigestores de escala familiar desde Israel, mismos tiene un costo aproximado 3500 dólares americanos en su modelo más pequeño el home biogás 2.0. No obstante, este modelo tiene una dimensión de 1,3 m de alto, 3 m de largo y 2 m de ancho y requiere de una carga diaria de 6 kg al día(Miogas, 2022), carga que supera los 2 Kg de residuos al día generados por una familia Ecuatoriana conformada por 4 personas (INEC, 2018). A pesar de que el biodigestor mencionado es de escala familiar, debido a sus dimensiones y a la carga de biomasa requerida, el mismo no puede ser aplicado en todo el sector urbanos y se limita a comunidades, empresas, escuelas y demás espacios en los cuales se cuente con un amplio espacio y una buena disponibilidad de biomasa, dejando así gran parte del sector Urbano.

El presente trabajo plantea diseñar y construir un biodigestor de uso doméstico de dimensiones óptimas que pueda usarse ampliamente en las viviendas del sector urbano, y que además genere biogás para la cocción de alimentos o el calentamiento de agua, lo que permitirá ampliar el desarrollo tecnológico en cuanto a biodigestores que en los últimos años se han limitado al sector rural. Para evaluar el desempeño del biodigestor se tomará como caso de estudio una familia ubicada en la ciudad de Quito, a la que se le ayudará a gestionar los residuos de basura y a sustituir parte del GLP usado para la cocción de alimentos, creando de esta manera una cultura eco amigable en la que se puede cocinar a partir de residuos y se genera biol que puede ser comercializado con agricultores locales, o huertos orgánicos en viviendas.

OBJETIVOS

General

- Diseñar y construir un biodigestor doméstico para producir biogás.

Específicos

- Realizar un levantamiento del estado del arte de los biodigestores domésticos existentes en el mundo.
- Investigar los procesos de conversión de biomasa para la generación de biogás.
- Seleccionar un tipo de biodigestor de acuerdo a las necesidades de uso doméstico.
- Definir los parámetros de diseño para el biodigestor doméstico.
- Diseñar y seleccionar los distintos componentes del biodigestor
- Realizar el modelo 3D en un programa CAD.
- Elaborar planos de conjunto, ensamble y detalle.
- Construir el biodigestor.
- Evaluar el funcionamiento del biodigestor mediante un protocolo de pruebas.

Hipótesis o alcance

Este trabajo cubre el diseño, selección de elementos y construcción de un biodigestor domestico que funcionará con residuos orgánicos para la generación de biogás, mismo que será utilizado para la cocción alimentos, calentamiento de agua, calentados y fritos de comida en general. Además, se evaluará el desempeño del biodigestor mediante un protocolo de pruebas.

1 MARCO TEÓRICO:

1.1 Clasificación de los residuos

Basura

Son aquellos materiales que ya cumplieron su funcionalidad o fin y son desechados, mismos que pueden estar en estado sólido o semisólido. Sin embargo, al final de su vida útil son susceptibles para ser reusados, reutilizados o valorizados de algún modo (Jaramillo, 2011) . La basura se clasifica en:

1.1.1 Según su origen

Residuos sólidos urbanos

Son la basura que se produce diariamente en los hogares, tiendas, negocios, empresas, calles, etc. Estos residuos son restos de alimentos, papel, botellas, envases de metal y envases de vidrio.

Residuos Tóxicos y peligrosos

Son aquellos que provienen de procesos industriales, mismos que contienen sustancias químicas peligrosas que al contacto con algún ser humano puede producir daños en la salud. Estos pueden ser fertilizantes, tintes, productos de limpieza, combustibles, etc (Jaramillo, 2011).

1.1.2 Según su composición

Basura orgánica

Todo desecho de origen biológico, mismo que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo tales como las hojas, cascaras de frutas, restos de verduras, huesos y hojas, etc (Jaramillo, 2011)

Basura inorgánica

Todo desecho de origen no biológico, estos desechos vienen de procesos industriales, por ejemplo: papel, cartón, vidrio, chatarra y plásticos, etc (Jaramillo, 2011).

1.2 Generación de residuos en el país

En el 2016 la cifra per cápita en el Ecuador era de 0.58 kilogramos diarios, cifra que ha ido al alza desde los últimos años, ya para el año 2020 y principios del 2021 se tiene un valor de 0.86 kilogramos de basura per cápita (INEC, 2018), produciéndose 3,44 kilogramos diarios de basura en una familia de 4 personas (Romero, 2020). Aunque el valor per cápita de producción de basura al día del ciudadano ecuatoriano parezca bajo, es un factor que multiplicado por la densidad poblacional de las ciudades genera valores altos de basura al día.

Tan solo en la ciudad de Quito (Ecuador) en el año 2020, se obtuvo 1600 toneladas de basura al día en la ciudad, valor que ha incrementado un 40 % debido a la emergencia

sanitaria, llegando a producirse 2200 toneladas de basura al día (Morán, 2020). De estos residuos la mayoría son de tipo orgánico representando 57% del total, teniéndose un restante de 43% de residuos inorgánicos de acuerdo con cifras del INEC Instituto nacional de estadísticas y censos (INEC, 2018).

1.3 Composición de los residuos

En el año 2013 se realizó una consultoría para la caracterización de residuos sólidos orgánicos en las estaciones de transferencia del sur y norte del distrito metropolitano de Quito. La Tabla 1.1 muestra las características de los diferentes materiales encontrados en la basura de la ciudad de Quito mostrados en la Tabla 1.1 (EMGIRS, 2013).

Tabla 1.1 Composición promedio de subproductos Estación de Transferencia SUR

N.-	Material	%
1	Papel	2,188
2	Cartón	1,974
3	Compuestos	0,686
4	Peligrosos (pilas, baterías)	0,040
5	Botellas pet (1)	3,012
6	Plásticos alta densidad (2)	2,296
7	Fundas plásticas (baja densidad 4)	5,527
8	Polipropileno (5)	2,150
9	Poliestireno (6)	0,920
10	Inertes (losa, cerámica, tierra)	0,382
11	Orgánicos de jardín	0,054
12	Orgánicos de cocina	57,673
13	Rechazo (papel higiénico, pañales)	8,568
14	Electrónicos	0,248
15	Textiles	4,235
16	Metálicos ferrosos	0,827
17	Metálicos no ferrosos	0,181
18	Vidrio	1,556
19	Madera	0,877
20	Menor a 1 cm	6,289
21	Hospitalarios	0,314
22	Otros	0,000
Total		100

Fuente: (EMGIRS, 2013)

Para poder apreciar de mejor manera la caracterización de residuos, se muestra en la Figura 1.1 los porcentajes de residuos generados por día en la ciudad de Quito.



Figura 1.1 Caracterización de residuos sólidos receptados (EMGIRS, 2013)

La composición de los residuos, así como sus características son de gran importancia para estimar la cantidad de metano producido, en la Tabla 1.2 se muestran algunos componentes importantes de los distintos tipos de residuos, entre los que se encuentra el porcentaje de carbono, nitrógeno y sólidos volátiles.

Tabla 1.2 Características fisicoquímicas de los distintos tipos de residuos

Material (residuos secos)	% Humedad	% Sólidos totales	% Nitrógeno	% Carbono	% Sólidos Volátiles
Gallinaza	65	35	6,3	94,5	65,0
Bovinaza	86	14	1,7	30,8	80,0
Porquinaza	87	13	3,8	76,0	85,0
Basura de mercado	1,0	99	3,0	54,7	77,0
Papel periódico	7,0	93	0,1	5,0	97,1
Desechos agrícolas	7,2	37	1,2	90,0	63,0
Humanaza	73	27	6	50,0	92,0
Orina	94	6	18	14,0	75,0

Fuente: (Olaya, 2009)

1.4 Manejo de residuos sólidos

El manejo de residuos está conformado por políticas y procedimientos con el fin de realizar una gestión ambiental de los residuos económicamente viable (Jaramillo, 2011).

- a) **Generación:** Acción realizada por una persona o grupo de personas que consiste transformar un material en residuo.

- b) **Transporte:** Es el traslado de los desechos mediante camiones de recolección, en caso de derramar los desechos se procede a generar. De igual manera si el vehículo de transporte acumula desechos se procede a generar.
- c) **Tratamientos y disposición:** El tratamiento consiste en la selección y aplicación de tecnologías con el fin de controlar y tratar los desechos, en el Ecuador una vez transportado los desechos se procede a enterrar el 96% de los residuos reciclándose únicamente el 4% (Morán, 2020).
- d) **Control y supervisión:** Conjunto de normativas que permiten verificar el funcionamiento de los procesos b) y c) (Jaramillo, 2011)

1.5 Biomasa

Conjunto de materia orgánica que se utiliza como energía. Esta materia proviene de residuos y desechos de origen biológico (Europea, 2018). Las fuentes de biomasa son varias como residuos sólidos urbanos de rellenos sanitados, restos de actividades agrícolas, estiércoles y restos. Además, mediante diferentes procedimientos es posible obtener combustibles sólidos o líquidos de gran potencial energético, pero a diferencia de los combustibles comunes la biomasa es un recurso natural renovable y abundante (Renovables, 2008).

1.5.1 Tipos de biomasa

- a) **Biomasa Natural:** Se produce de forma espontánea en la naturaleza sin intervención del ser humano por ejemplo las podas naturales del bosque.
- b) **Biomasa residual seca:** Este tipo de biomasa proviene de recursos generados en las actividades agrícolas y forestales presentando un bajo contenido de agua como por ejemplo cascara de almendra, serrín.
- c) **Biomasa residual húmeda:** Proviene de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales, así como residuos ganaderos y vegetales.
- d) **Cultivos energéticos:** Son aquellos que son generados con el fin del aprovechamiento energético (Jaramillo, 2011).

1.6 Biogás

Es el gas combustible que se produce por la descomposición de la materia orgánica (biomasa) en condiciones anaeróbicas lo que quiere decir que el proceso se encuentra en ausencia de oxígeno. El compuesto que le da valor energético es el metano, CH₄, este representa entre un 50 y 75% de gas. El restante corresponde a dióxido de carbono (CO₂) y otros compuestos que usualmente actúan como impurezas (Redagrícola, 2017).

1.6.1 Características del biogás

En la Tabla 1.3 se compara el biogás con otros combustibles en función de algunas variables importantes en la quema de este tipo de combustibles

Tabla 1.3 Energía equivalente del Biogás vs otras fuentes

Valores	CH4	C02	H2 - H2S	Otros	Biogás 60/40
Proporciones volumen %	55 – 70	27 - 44	1	3	100
Valor calorífico MJ/m3	35,3	---	10	22	21,5
Valor calorífico kJ/kg	8600	---	2581	5258	20934
Ignición % en aire	5 – 15	---	---	---	6 - 1 2
Temperatura de encendido °C	650- 750	---	---	---	650- 750
Presión crítica MPa	4.7	7,5	1,2	8,9	75- 8,9
Densidad nominal g/l	0.7	1,9	0,08	---	1.2
Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
Inflamabilidad Volumen en % de Aire	5 - 1 5	---	---	---	6 - 1 2

Fuente: (Cusi, 2018)

En la Tabla 1.4 se muestra un valor más exacto de producción de metano en función del tipo de biomasa.

Tabla 1.4 Biogás producido en función de los sólidos volátiles

Material	Proporción (%)	m ³ de biogás /kg de materia	Ch4 (%)
Gallinaza	100	0,3111	59,8
Bovinaza	100	0,0871	65,2
Porquinaza	100	0,3234	65
Basura de cocina	100	0,2110	61,9
Residuos de papel	100	0,2178	67,1
Desechos agrícolas	100	0,2999	60,0

Fuente: (Olaya, 2009)

Como se puede apreciar en la Tabla 1.4 la mayor producción de biogás por kilogramo de materia orgánica se da en la porquinaza. No obstante, la basura de cocina conformada en su gran mayoría por desechos orgánicos como verduras y residuos de comida, llegan a tener alrededor de 0,2110 metros cúbicos de biogás por Kg de materia orgánica, con un porcentaje aproximado de 61.9 % de metano a diferencia de los residuos de papel que llegan a tener 67,1 % de Metano en su composición. El porcentaje de metano dentro de esta mezcla de biogás resulta de gran importancia, ya que en función de este varían las propiedades de combustión del biogás. Para que el biogás tenga la característica de ser inflamable debe superar el 45% de Metano dentro de su composición, caso contrario no se podrá dar la combustión del biogás.

1.6.2 Composición de biogás

En la Tabla 1.5 se presenta la composición del biogás según el tipo de desechos.

Tabla 1.5 Composición de biogás de acuerdo al tipo de biomasa

Gases	Desechos agrícolas	Desechos industriales	Relleno sanitario	Propiedades
Metano	50-80 %	50 -70 %	46 - 65 %	Combustible
Dióxido de carbono	30-50 %	30 -50 %	34 -55 %	Acido, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo, reduce valor calorífico
Hidrogeno	0-2%	0 - 2 %	0 - 1 %	Combustible
Sulfuro de hidrogeno	100-700 ppm	0-8 %	0,5 - 100 ppm	Corrosivo, toxico, oloroso
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Corrosivo
Monóxido de carbono	0 - 1 %	0 - 1 %	Trazas	Toxico
Nitrógeno	0 - 1 %	0 - 1 %	0- 20 %	Inerte
Oxigeno	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 5 %	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	5 ppm, (hidrocarburos)	Corrosivo, oloroso

Fuente: (Cusi, 2018)

1.6.3 Digestión anaeróbica y sus etapas

El proceso de digestión anaeróbica consta de 4 fases relacionadas entre sí como se puede apreciar en la Figura 1.2. En la que se observan las 4 fases de digestión anaeróbica, entre ellas la Hidrolisis que permite transformar las proteínas, carbohidratos y lípidos de la materia orgánica en materia orgánica soluble como lo son los aminoácidos, azúcares y ácidos. Luego de esto los productos solubles pasan a transformarse en Alcoholes por el proceso de Acidogénesis. En la tercera etapa de este proceso llamada Acetogénesis se procede a transformar los productos en Acetatos para finalmente ser transformado en metano por el proceso de Metanogénesis. De este proceso de biodigestión se obtiene principalmente metano, así como dióxido de carbono, la intensidad y duración de este proceso depende de varios factores, entre los principales se tiene el tiempo al que se da la biodigestión, existiendo una relación inversamente proporcional entre el tiempo en el que se da el proceso y la temperatura a la que se mantiene el biodigestor, con el fin de evitar la pérdida de calor en el biodigestor, en algunos casos se opta por aislar este térmicamente.

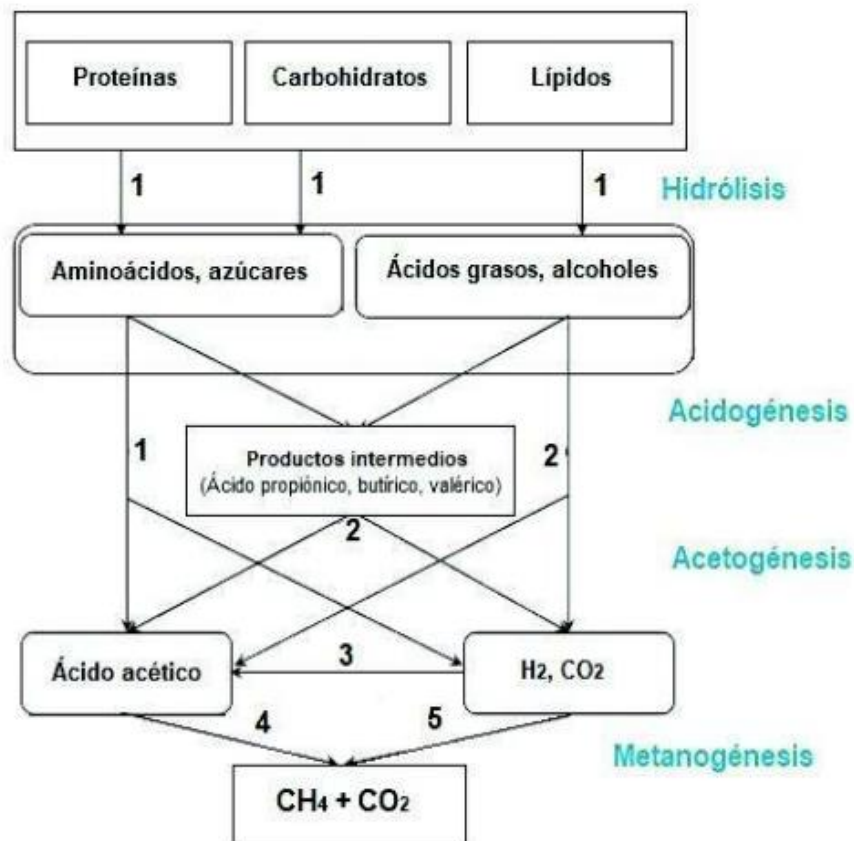


Figura 1.2 Proceso de digestión Anaeróbica (Cusi, 2018)

1.6.3.1 Hidrólisis

Es el primer proceso de digestión anaeróbica que mediante la acción de extraer enzimas de bacterias hidrolíticas indica la tasa de cambio de los sólidos volátiles biodegradables en el biodigestor dentro del proceso de digestión anaeróbica, y es un valor que se encuentra en función del caudal de alimentación, el volumen efectivo del reactor y la temperatura del reactor. (Haugen, 2012).

1.6.3.2 Acidogénesis

En esta etapa, el hidrógeno se produce mediante la fermentación de la glucosa. Los microbios responsables de este proceso se denominan "formadores de ácido" y son compuestos por bacterias homoacetogénicas. Este proceso representa la tasa de cambio de los sólidos volátiles biodegradables, el proceso depende del caudal de alimentación, del volumen del reactor, así como la temperatura (Haugen, 2012).

1.6.3.3 Acetogénesis

Este paso representa la producción generalizada de ácido acético por hidrogenación. Este proceso depende de la concentración de acidógenos, volumen efectivo, temperatura, caudal de alimentación, y tipo de material de alimentación (Haugen, 2012).

1.6.3.4 Metanogénesis

En esta etapa se determina la concentración de metanógenos que se utilizan para producir metano, el proceso depende algunos factores como tiempo de retención, volumen efectivo, caudal de alimentación, temperatura del reactor (Haugen, 2012).

1.7 Biodigestores

Un biodigestor como se muestra en la Figura 1.3, es un recipiente cerrado herméticamente y aislado, donde se deposita el material orgánico y una cierta cantidad de agua, mismos que experimentaran un proceso de fermentación anaeróbica por la acción de microorganismos bacterianos anaeróbicos y al cabo de un tiempo se produce biogás y biol que es fertilizante (Arrieta, 2016).



Figura 1.3 Biodigestor (Pizano, 2018)

1.7.1 Modelos de biodigestores domésticos

Existe gran variedad de biodigestores dependiendo la cantidad de residuos y su aplicación, en este caso nos enfocaremos solo en los tipos más comunes de biodigestores domésticos. Este tipo de biodigestores son pequeños y de baja velocidad, generalmente utilizados en zonas rurales con desechos de hojas, pasto, estiércol, residuos domésticos, etc.

Existen dos modos de funcionamiento de biodigestores domésticos: semi-batch o semicontinuo (biodigestor tipo hindú y taiwanés) y batch o discontinuo (biodigestor tipo chino)

Biodigestor semicontinuo: Este tipo de biodigestores se muestra en la Figura 1.4 y son utilizados generalmente en las zonas rurales o en lugares donde la materia orgánica es fácilmente obtenida, por tanto, la frecuencia de carga es diaria o cada dos días, es decir periodos de tiempo cortos. (Haro, 2017)

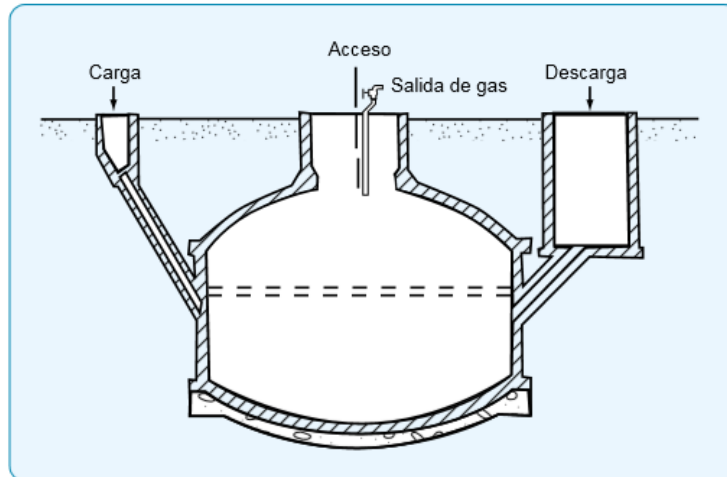


Figura 1.4 Biodigestor semicontinuo (Varnero, 2011)

Biodigestor batch: Este tipo de biodigestores solo son cargados una sola vez y se sellan herméticamente como se muestra en la Figura 1.5. Una vez sellado se tiene la producción de biogás, después se elimina los residuos producidos en el proceso anaeróbico y se procede a llenar nuevamente el biodigestor. (Haro, 2017)

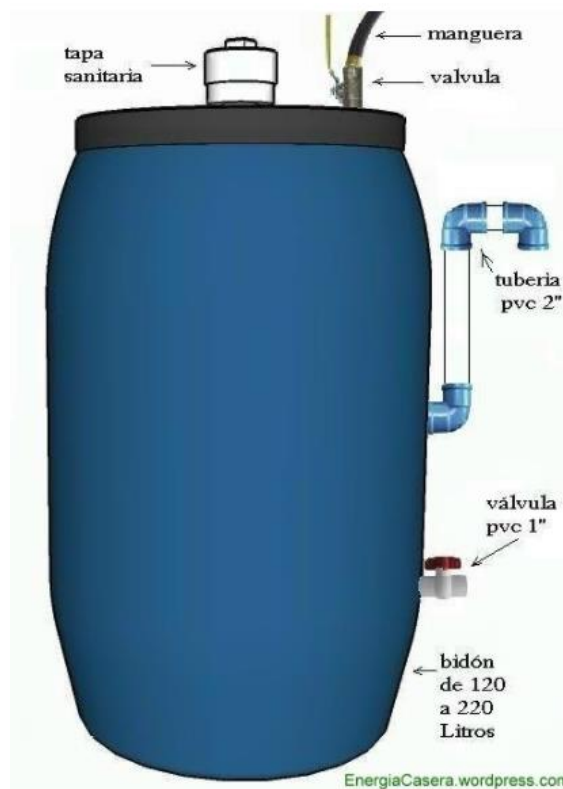


Figura 1.5 Biodigestor tipo Batch (Ecoinventos, 2021)

1.7.2 Partes del biodigestor

1.7.2.1 Biodigestor

Es la cámara central, el cual se encarga de almacenar la materia para un tiempo de retención óptimo en ausencia de oxígeno. A este elemento se le puede incluir sistemas de calentamiento o aislantes que mantengan la temperatura dentro de la cámara constante.

1.7.2.2 Tanque de descarga

Es la parte final del biodigestor, en la cual se obtiene un biofertilizante que puede ser usado como abono en plantaciones.

1.7.2.3 Conducto de carga

Es el sistema de tubería por donde circulara el sustrato, para lo cual se debe evitar cambios de sección bruscos por lo que es recomendable establecer una conducción recta.

1.7.2.4 Conducto de descarga

Es el sistema de tuberías por donde circulara el biofertilizante, al haber cumplido el tiempo de retención establecido dentro de la cámara. La forma para que se descargue es a través del principio de vasos comunicantes, de manera que para lograr este efecto debe ser colocado a una altura adecuada evitando que se estanque.

1.7.2.5 Agitador

Este elemento es opcional ya que este se encarga de que el gas no se quede estancado, si el proceso de biodigestión es continuo.

1.7.2.6 Sistema de almacenamiento

Este elemento permite almacenar el biogás generado, para su consumo paulatino.

1.7.2.7 Tubería de conducción

Es el elemento que permite que el biogás circule a través de la tubería hacia un pequeño sistema de almacenamiento.

1.7.2.8 Agitador

Este elemento es opcional ya que este se encarga de que el gas no se quede estancado, si el proceso de biodigestión es continuo.

1.7.2.9 Accesorios

Son los elementos utilizados para la conexión de las tuberías tanto en la entrada y salida del reservorio. Tales como válvulas, codos, uniones, pegamento, teflón, además de elementos de protección y medición como manómetros, trampa de agua, termocupla.

1.8 Factores que influyen en el proceso de digestión anaeróbica

Debido a que los microorganismos en la etapa de metanogénesis son sensibles a los cambios en las condiciones ambientales, es importante un monitoreo y control de estos factores. Por tanto, la digestión anaeróbica es afectada por diferentes factores tales como:

1.8.1 Alcalinidad y PH

El valor de PH en el biodigestor determina la producción de biogás y la cantidad de metano. Si se sufre un descenso en el PH se tendrá un biogás bajo en metano que produce menores cualidades energéticas. Por tanto, es importante tener un PH mayor a 6 y menor a 8 para tener un proceso satisfactorio. (López, 2017)

La alcalinidad es la capacidad de que se tiene para actuar como un amortiguador frente a cambios de PH, esta determina si es posible tratar residuos que no sean neutros, es por esto que es importante contar con un PH óptimo dentro de los rangos aceptables entre 6 y 8. (Gomez, 2012)

1.8.2 Relación carbono/nitrógeno

La relación carbono/nitrógeno ayuda a conocer si la composición de biomasa es adecuada para tener un correcto proceso de biodigestión por tanto es importante conocer la composición y naturaleza de los residuos, ya que esto determinara la cantidad y calidad del biogás producido. Las metano bacterias se alimentan principalmente de carbono y nitrógeno, estas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que se tienen relaciones optimas entre el rango de 30:1 hasta 20:1. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células, de acuerdo con (Varnero, 2011) el valor máximo de relación carbono nitrógeno es 35:1 y el valor mínimo es 8:1, para el primer caso cuando la relación C/N se encuentra en el límite superior se demora la producción de biogás, en cambio cuando la relación se encuentra en el límite inferior se inhibe la actividad bacteriana.

A continuación, se presenta la Tabla 1.6 con el tipo de materia orgánica y la cantidad de biogás que produce. Siendo esta Tabla de gran ayuda, ya que, si la mezcla de materia orgánica que se tiene en el biodigestor resulta en una relación C/N menor a 20, se podrá agregar un mayor porcentaje de ciertos componentes a esta mezcla como es el caso de los restos de fruta, debido a que estos a más de aportar fibra aportan de gran manera en la relación C/N. De los componentes orgánicos los restos de frutas son los que mayor porcentaje de relación C/N tienen, con aproximadamente una relación de 50, que podría llegar a equilibrar aquellas mezclas en las que la relación carbono nitrógeno es menor que 20.

Tabla 1.6 Relación Carbono/nitrógeno de diferente tipo de materia orgánica

Material orgánico	Sustancia orgánica seca (SO) (%)	C/N	Generación de biogás (m³/SO)
Excremento vacuno	77 - 85	10 - 20	0,18 - 0,4
Excremento de cerdo	77 - 78	8 -15	0,3 - 0,52
Excremento de gallina	75 - 83	7 - 10	0,33 - 0,65
Excremento de ovino/cabra	72	12 – 25	0,16 - 0,42
Excremento de caballo	-	18 – 25	0,2 - 0,35
Hojas de remolacha	78,5	14 - 18	0,5 - 0,73
Planta de papas	79	17 - 25	0,55 - 0,7
Lodos de aguas residuales	10	-	0,31 - 0,65
Cáscaras de manzanas	95	6 – 7	0,45 - 0,65
Cáscaras de papas	90	13 – 19	0,4 -0,7
Cáscaras de trigo	87 - 90	10 – 11	0,6 - 0,8
Restos de verduras	76	15	0,5 - 0,62
Restos de frutas	93	50	0,5 - 0,62
Restos de comida	90 - 95	15 – 20	0,6 - 0,81
Basuras orgánicas	230 - 70	40 - 80	0,29 -0,8

Fuente: (Jaramillo, 2011)

1.8.3 Concentración de solidos

La concentración de solido ayuda a determinar la eficiencia del proceso. Esta eficiencia depende del área de contacto de las bacterias, la cual disminuye con la formación de natas que se producen por la materia orgánica utilizada. En este caso se tiene residuos domésticos como desechos de frutas y verduras que contienen grandes cantidades de fibra por lo que produce mayor contenido de nata, y al procesarlas es importante controlar el contenido de sólidos. Para este tipo de residuos se recomienda un porcentaje de solidos óptimo de 7% a 15% de solidos totales de la mezcla.

1.8.4 Temperatura

La digestión anaeróbica depende fuertemente de la temperatura, es por esta razón que es importante su control. La velocidad de las reacciones químicas y biológicas depende del crecimiento de microorganismos que a su vez depende de la temperatura. A mayor temperatura se tiene mayor velocidad de crecimiento de microorganismos y aceleración del proceso de digestión que a su vez acelera la producción de biogás.

Debido a que la temperatura es un factor determinante y de hecho uno de los más importantes para el diseño de biodigestores, es importante tomar en cuenta las condiciones ambientales del lugar donde se realizara la construcción. A continuación, en la Tabla 1.7 se presenta los diferentes rangos de temperatura y fermentación anaeróbica óptimos utilizados. (Arrieta, 2016)

Tabla 1.7 Rangos de temperatura y tiempo de fermentación

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

Fuente: (Varnero, 2011)

1.8.5 Agitación

La agitación sirve para que las bacterias y el sustrato estén en contacto asegurando un proceso óptimo y un equilibrio dentro del biodigestor. La agitación tiene como principal objetivo reducir la formación de nata o sobrenadante que es una capa solida producida por la materia orgánica que no llega a digerirse por lo que impide la salida de gas. (Gomez, 2012)

1.8.6 Tiempo de retención

El tiempo de retención representa el tiempo que permanece un residuo dentro del biodigestor, por lo general este depende de la materia orgánica utilizada y del tipo de biodigestor. Para biodigestores semi continuos el tiempo de retención va a determinar el volumen de carga diaria ($m^3/día$). Por lo general se opera con tiempos de retención de 20 a 60 días y cargas diarias que varían entre 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor. Es decir, si mayor es el tiempo de retención, mayor será el tamaño del biodigestor. (Varnero, 2011)

$$\frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Tiempo de retención (días)}} = \text{Volumen de carga diaria m}^3\text{/día}$$

1.8.7 Sustancias inhibidoras del proceso

Las sustancias inhibidoras, son aquellas que afectan el proceso de producción de biogás, eliminación del biogás y por ende la falla del biodigestor. Este tipo de sustancias están directamente relacionadas con la alimentación del biodigestor y producen variaciones en la biodigestión debido a 3 aspectos principales, entre los que se tiene la aclimatación que no es más que la capacidad del microorganismo para reordenar sus recursos metabólicos. Otro aspecto importante es el antagonismo relacionado a la reducción del efecto toxico de una sustancia por la presencia de otra, y por último la sinergia relacionada con el aumento del efecto toxico por la presencia de otra sustancia. En la presente Tabla se aprecia el valor de la concentración inhibidora en función de algunos inhibidores presentes en los residuos orgánicos, siendo el NaCl uno de los inhibidores que más afecta al proceso de biodigestión.

Tabla 1.8 Sustancias inhibidoras en la digestión anaeróbica

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Noa	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200- 500 mg/l
CN	25 mg/l
Na	3500- 5500 mg/l
K	2500- 4500 mg/l
Ca	2500- 4500 mg/l
Mg	1000- 1500 mg/l

Fuente: (Cusi, 2018)

2 Metodología

La presente metodología cuenta con 4 etapas entre las que constan la investigación, el diseño, la construcción y los resultados. La etapa de investigación toma variables de la ubicación del proyecto, caracterización de la biomasa y demás datos que servirán en la siguiente etapa de diseño, ya que estos valores permiten estimar la cantidad de biomasa necesaria del biodigestor. El proceso de diseño parte de satisfacer la demanda energética al 100%, en caso de que debido a la disponibilidad de biomasa no se pueda satisfacer el 100% de la demanda energética procederá a realizar el diseño en función de la biomasa disponible para el caso de estudio y se calculara el porcentaje de la demanda que se puede satisfacer con esta cantidad de biomasa, una vez determinada la cantidad de biogás que se produce se determina el sistema de almacenamiento, con el fin de tener un sistema robusto, que sea adaptable en el hogar sin que se ocupe un espacio excesivo, este diseño del sistema de almacenamiento no solo dependerá del volumen de producción de biogás, sino también del uso que se le quiera dar, ya que este uso puede ser discontinuo o continuo como en el caso de la cocción de alimentos. Al finalizar esta etapa se procede a desarrollar la etapa de la construcción con pruebas de hermeticidad con carga y sin carga, así como la generación de biogás para cocción de alimentos. En la Figura 2.1 se puede apreciar el diagrama de flujo del proceso que se seguirá para la producción de biogás, siendo la etapa final un análisis de laboratorio que muestra el porcentaje de biogás y metano realmente producido al día, así como algunas propiedades de la mezcla como PH.

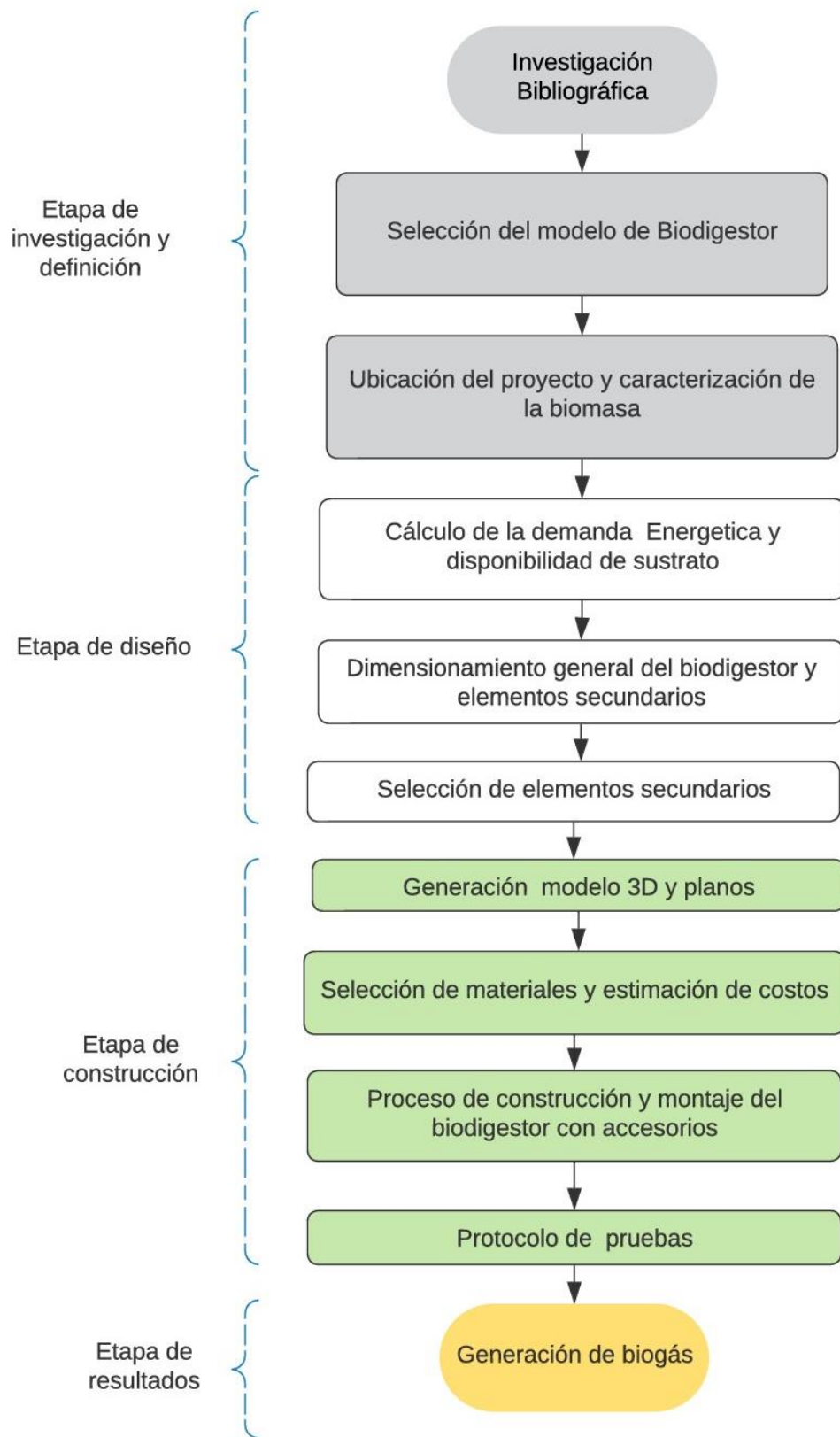


Figura 2.1 Metodología. Fuente: Propia.

2.1 Ubicación geográfica del proyecto

El proyecto se desarrollará en el barrio la Tola ubicado en la provincia de Pichincha, cantón Quito, en la calle Ríos y Concepción. En la Figura 2.2 se muestra una imagen satelital de la ubicación del proyecto con geolocalización Quito170136 (-0.225037,-78.505644).

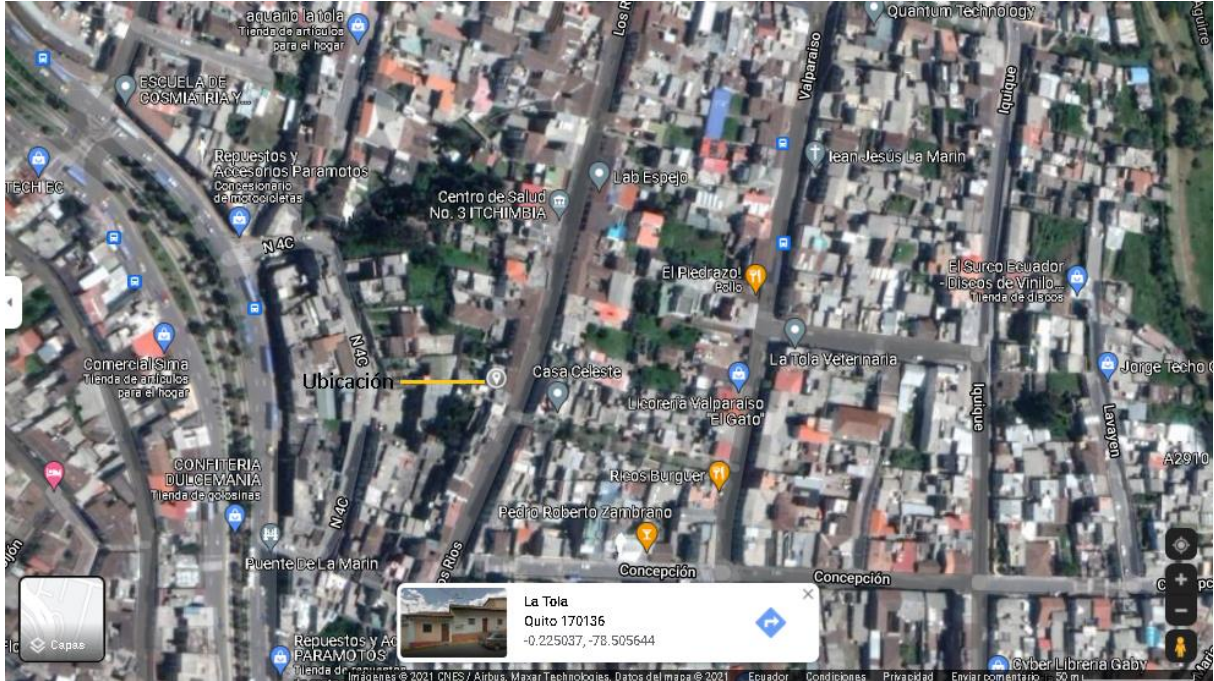


Figura 2.2 Ubicación del proyecto (GOOGLE MAPS, 2021)

2.2 Condiciones ambientales del sector

En la Figura 2.3 se muestran los datos históricos de temperatura en el año 2021 en el sector de la Tola de acuerdo con (The weather Company, 2021). Como se puede apreciar en la figura los valores de máxima producción se tendrán en los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, llegándose a tener temperaturas hasta de 20°C. No obstante, se toma una temperatura de 18 °C como temperatura de trabajo. Cabe mencionar que a medida que aumenta la temperatura de trabajo el proceso de biodigestión es más óptimo y por lo tanto se tienen menos días de retención. En el caso de los biodigestores semi continuos el tiempo de retención no es problema ya que pasado el tiempo de retención establecido, este empieza a funcionar de manera continua debido a que se ingresa materia orgánica diaria, y se tiene biogás de manera diaria debido a la biodigestión realizada en días anteriores, la única forma de parar este proceso cíclico es dejando de alimentar el biodigestor con materia orgánica, y quitando toda la materia orgánica llena de bacterias de procesos anteriores, materia que sirve como activador del proceso de biodigestión. Es por esta razón que cuando se extrae el biol, no se lo extrae completamente.

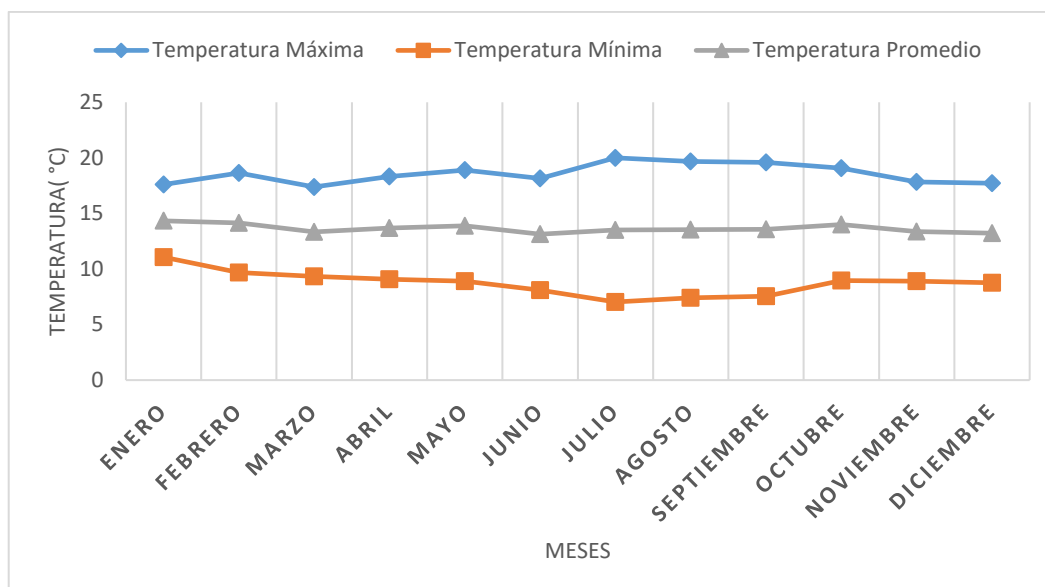


Figura 2.3 Diagrama de temperaturas (The weather Company, 2021)

La Tabla 2.1, muestra las temperaturas ambientes promedio del barrio la tola.

Tabla 2.1 Temperaturas de la Tola año 2021

Temperatura Meses	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Temperatura Promedio
Enero	17,6	11,06	14,33
Febrero	18,64	9,67	14,155
Marzo	17,38	9,32	13,35
Abril	18,33	9,06	13,695
Mayo	18,9	8,89	13,895
Junio	18,16	8,1	13,13
Julio	20	7,03	13,515
Agosto	19,67	7,41	13,54
Septiembre	19,6	7,56	13,58
Octubre	19,06	8,96	14,01
Noviembre	17,83	8,9	13,365
Diciembre	17,7	8,77	13,235

Fuente: (The weather Company, 2021)

2.3 Caracterización de residuos

2.3.1 Disponibilidad de Biomasa

Para conocer la disponibilidad de biomasa del caso de estudio, la familia tomo muestras representativas durante un periodo de 7 días.

Tabla 2.2 Promedio de toma de muestras

Días	Muestras (Kg)
1	2
2	2,3
3	1,8
4	1,9
5	2
6	2,2
7	2,1
Promedio	2,04

Fuente: Propia

De acuerdo con la Tabla 2.2 la familia tiene una disponibilidad de biomasa promedio de 2.07 Kg de materia orgánica al día, misma que está compuesta por restos de comida y frutas como se puede apreciar en la Figura 2.4 y 2.5.



Figura 2.4 Biomasa de la familia del caso de estudio. Fuente: Propia.



Figura 2.5 Pesaje de la biomasa disponible. Fuente: Propia.

Para el dimensionamiento del biodigestor existen dos métodos, el primero consiste en trabajar a partir de la biomasa disponible y el segundo a partir de la demanda energética, donde este último de gran ayuda para ver si la biomasa disponible logra satisfacer la demanda, y en el caso de no hacerlo se calcula que porcentaje de la demanda se cubre con la biomasa disponible.

Siendo el cálculo de la biomasa disponible un valor imprescindible en cualquiera de los dos métodos, para hallar este dato se toma como referencia los datos proporcionados por la familia del caso de estudio, la cual indica que se dispone de alrededor de 2Kg de materia orgánica al día, valor similar al proporcionado por el INEC, el cual indica que la producción per cápita de basura es de aproximadamente 0,86 Kilogramos por persona, llegándose a producir 3,44 kilogramos de basura en una familia de 4 personas (INEC, 2018). De estos 3,44 Kilogramos de basura alrededor del 57,67% es materia orgánica, dando un total de 1,98 Kg de biomasa disponible.

2.3.2 Reporte de análisis de residuos

De acuerdo con la toma de muestras de la familia del caso de estudio, se puede concluir que los 2 Kg de basura orgánica están conformados principalmente por restos de comida, frutas y vegetales, así como excremento de las mascotas. En la Tabla 2.3 se muestra la producción de biogás en función de la materia orgánica seca, así como las relaciones C/N para los distintos componentes orgánicos mencionadas anteriormente con excepción del excremento de mascotas. No obstante, de otra fuente se establece que el excremento de las mascotas una relación C/N igual a 20,06 según (Villalobos, 2014).

Tabla 2.3 Relación C/N

Material Orgánico	Sustancia Orgánica Seca (SO) (%)	C/N
Restos de Verduras	76	15
Resto de Frutas	93	50
Restos de comida	90-95	15-20

Fuente: (Jaramillo, 2011)

Como se puede apreciar en la Tabla 2.3 la relación C/N de los residuos orgánicos están dentro del rango proporcionado por (Varnero, 2011), el cual indica que para tener una eficiente producción de biogás no se debe tener una relación menor a 20.

2.4 Consumo de GLP en los hogares

Para determinar la demanda energética se asume que el biogás sustituirá al GLP empleado en la cocción de alimentos, estableciéndose como demanda energética el consumo de GLP en el periodo de un mes, llegándose a consumir un cilindro de 15Kg de acuerdo a los datos proporcionados por la familia del caso de estudio. No obstante, el sector urbano se puede llegar a consumir hasta 1.47 cilindros al mes (Espinosa, 2016).

2.5 Determinación del consumo de biogás

Con la ecuación 2.1 se determinará la cantidad de GLP consumido a diario, con el fin de obtener el flujo másico de GLP.

$$Cd = \frac{m_{glp}}{N} \quad (2.1)$$

Dónde

m_{glp} : Masa de GLP, equivalente a 15Kg por cilindro [Kg]

N : Número de días en un mes [días]

Cd : Consumo diario de GLP [Kg/día]

$$Cd = \frac{15 \text{ Kg}}{30 \text{ día}}$$

$$Cd = 0,5 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{día}} \right]$$

Tomando en cuenta que el consumo diario de GLP al día es de 4 horas según lo mencionado por la familia del caso de estudio, se procede a determinar la demanda de GLP en Kg/h.

$$Cd = \dot{m}_{glp} = 0,5 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} \times \frac{\text{día}}{4\text{h}} = 0,125 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right]$$

Para obtener la cantidad de biogás necesario, se procede a realizar un balance de energía entre el biogás y el GLP tomando en cuenta el poder calorífico de cada uno, según la ecuación 2.2 y 2.3 (Yunes A Cengel, 2012).

$$E_{\dot{b}io} = E_{\dot{g}lp} \quad (2.2)$$

$$\dot{m}_{biogás} \times PI_{biogás} = \dot{m}_{glp} \times PI_{glp} \quad (2.3)$$

Dónde:

$\dot{m}_{biogás}$: Flujo másico del biogás [Kg/h]

\dot{m}_{glp} : Flujo másico del GLP [Kg/h]

PI_{bio} : Poder Calorífico del biogás [KJ/Kg]

PI_{glp} : Poder Calorífico del GLP [KJ/Kg]

Datos

PI_{bio} : 20934 [KJ/Kg] de la Tabla 1.3.

PI_{glp} : 50626,4 [KJ/Kg] (Gasco, 2013)

$$\dot{m}_{biogás} = \frac{\dot{m}_{glp} \times PI_{glp}}{PI_{bio}}$$

$$\dot{m}_{biogás} = \frac{0,125 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \times 50626,4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}{20934 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}$$

$$\dot{m}_{biogás} = 0,302 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

Para el cálculo del volumen de biogás se utiliza la ecuación 2.4 propuesta por (Cengel Y., 2012).

$$\dot{v}_{biogás} = \frac{\dot{m}_{biogás}}{\rho_{biogás}} \quad (2.4)$$

Dónde

$\dot{m}_{biogás}$: Flujo másico del biogás [Kg/h]

$\dot{v}_{biogás}$: Flujo volumétrico del biogás [m^3/h]

$\rho_{biogás}$: Densidad del biogás, en donde se toma un valor de 1,2 [g/l] según la Tabla 1.3

$$\dot{v}_{biogás} = \frac{0,302 \frac{Kg}{h}}{1,2 \frac{g}{L} \times \frac{1 Kg}{1000 g} \times \frac{1000 L}{1 m^3}} = 0,251 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

El flujo volumétrico de biogás calculado permitirá estimar cuanto tiempo de cocción se podrá tener en función de la cantidad de biogás generada, hay que tomar en cuenta que este será el flujo para satisfacer el 100% de la demanda, lo que implica cocinar 4 horas al día con biogás.

2.5.1 Determinación de la cantidad de sustrato necesaria

Para calcular la cantidad de sustrato se utiliza la ecuación 2.5 según (Cusi, 2018)

$$M_{biomasa} = \frac{\dot{v}_{biogás}}{n_{biogás}} \quad (2.5)$$

Dónde

$M_{biomasa}$: Cantidad de sustrato [Kg/día]

$\dot{v}_{biogás}$: Flujo volumétrico del biogás [m^3/h]

$n_{biogás}$: Rendimiento del biogás [m^3/Kg]

Datos

$n_{biogás}$: 0,5 [m^3/Kg] de acuerdo con (Cusi, 2018)

$$M_{biomasa} = \frac{0,251 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{0,5 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]} = 0,502 \left[\frac{Kg}{h} \right] \times \frac{24 h}{1 día} = 12 \left[\frac{Kg}{día} \right]$$

Si se cubre el 100% de la demanda de GLP, la biomasa ingresada diariamente resulta insuficiente ya que se necesita de 12 kg/día y se dispone de 2 Kg/día. Debido a que la biomasa disponible es menor a la biomasa requerida, se procede a realizar el dimensionamiento en base a la biomasa disponible y se calcula el porcentaje de la demanda que se lograra satisfacer con esta cantidad de biomasa. Se halla el tiempo de

retención utilizando los criterios de (Olaya, 2009), donde se indica que para una temperatura entre 20 y 30 grados centígrados el tiempo óptimo de retorno es 20 días, valor al que toca añadirle un factor de corrección debido a las variaciones de temperatura.

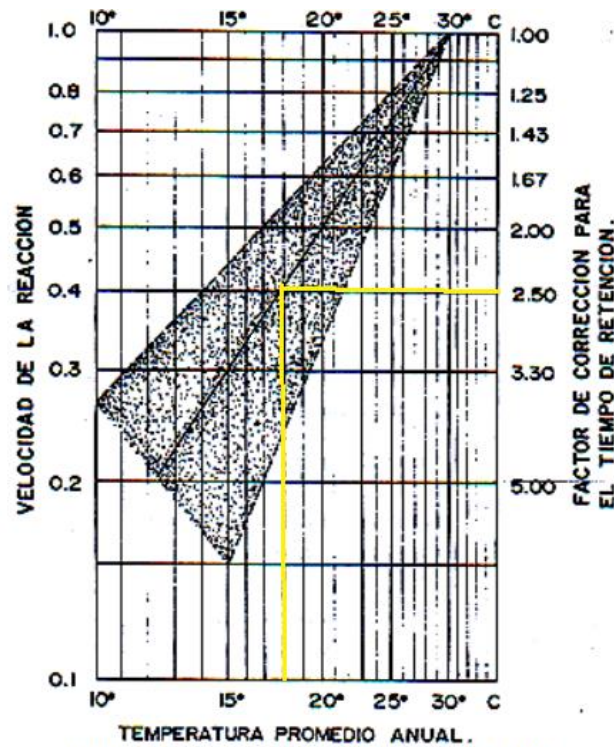


Figura 2. Influencia de la temperatura sobre el tiempo de retención [Vargas 1999].

Figura 2.6 Factor de corrección para el tiempo de retención (Olaya, 2009)

Tomando en cuenta un tiempo de retorno ideal de 20 días y una temperatura promedio anual de 18 °C, se tiene un factor de corrección de 2,5 de acuerdo con la Figura 2.6.

$$Tr = Tideal \times Fc \quad (2.6)$$

Dónde

Tr : Tiempo de retención [días]

$Tideal$: Tiempo de retorno ideal [días] (Olaya, 2009)

Fc : Factor de corrección (Olaya, 2009)

$$Tr = 20 \times 2,5 = 50 \text{ [días]}$$

Una vez obtenido el tiempo de retención, se procede a calcular la carga orgánica que será almacenada en el biodigestor de acuerdo a lo expresado en la ecuación 2.7.

$$Mtotal = M_{biomasa} \times TR \quad (2.7)$$

Donde:

$Mtotal$: Cantidad de biomasa total [Kg]

$M_{biomasa}$: Cantidad de sustrato [Kg/día]

TR : Tiempo de retención [día]

$$Mtotal = 2,04 \frac{Kg}{día} \times 50 \text{ día} = 102 \text{ [Kg]}$$

2.6 Diseño del biodigestor

2.6.1 Dimensionamiento de biodigestor y sistema de almacenamiento

En esta etapa se establece ciertos parámetros que se deben tomar en consideración para realizar un buen diseño del biodigestor, es decir los cálculos necesarios para la obtención de medidas generales para el diseño.

Determinación del volumen del biodigestor

Para determinar el volumen de la cámara de fermentación se utiliza la ecuación 2.8

$$VCF = M_{total} \times Fd \times \frac{1}{\rho_{mezcla}} \quad (2.8)$$

Donde:

VCF : Volumen total de la cámara de fermentación de mezcla [m^3]

M_{total} : Cantidad de biomasa total [Kg]

Fd : Factor de relación entre residuos orgánicos y agua

ρ_{mezcla} : Según (Salcedo, 2016), se tiene una densidad de $800 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

Datos

Fd : $2[m^3]$ debido a la relación de 1:1 de acuerdo con (Olaya, 2009).

$$VCF = (102 \text{ Kg} \times 2) \times \frac{1 \text{ m}^3}{800 \text{ Kg}} = 0,255[m^3]$$

Para el correcto dimensionamiento del biodigestor se debe tomar en cuenta el espacio ocupado por el gas, mismo que será almacenado en un espacio denominado gasómetro, que será sumado al VCF para obtener el volumen total del biodigestor. De acuerdo con (Cusi, 2018) la relación entre el gasómetro y el volumen de mezcla es de 25% a 75% como se muestra en la ecuación 2.9.

$$VG = VCF \times \frac{0,25}{0,75} \quad (2.9)$$

Donde:

VG : Volumen del gasómetro [m^3]

VCF : Volumen de la cámara de fermentación de mezcla [m^3]

$$VG = 0,255 \times \frac{0,25}{0,75}$$

$$VG = 0,085 [m^3]$$

Una vez obtenido el volumen de gas y volumen de la cámara de fermentación, se obtiene el volumen total del biodigestor de la ecuación 2.10.

$$VT = VCF + VG \quad (2.10)$$

Donde

VG : Volumen del gasómetro [m^3]

VCF : Volumen de la cámara de fermentación de mezcla [m^3]

VT : Volumen total del biodigestor [m^3]

$$VT = 0,255 + 0,085 = 0,34 \text{ [}m^3\text{]}$$

En la Tabla 2.4 se presenta la demanda de GLP cubierta de acuerdo a la cantidad de biomasa ingresada diariamente, siendo 12 kg la biomasa necesaria para satisfacer el 100 % de la demanda, ya que no todas las familias disponen de 12 kilogramos de materia orgánica al día. En la Tabla 2.4 se muestra la demanda energética que pueden cubrir las familias con la biomasa que disponen, además se presenta el volumen total del biodigestor que deberían utilizar, para poder digerir anaeróbicamente la biomasa diaria que disponen. De acuerdo con estos datos el biodigestor del caso de estudio que dispone de 2 kilogramos de biomasa podrá satisfacer el 17 % de la demanda de GLP, dado que la biomasa disponible del caso de estudio es igual a la estimación de residuos orgánicos generados por una familia ecuatoriana, se puede decir que el biodigestor doméstico en el Ecuador podrá satisfacer como máximo el 17 % de la demanda de GLP

Tabla 2.4 Volumen del Biodigestor en función de biomasa y demanda

Cantidad de biomasa [Kg/día]	VT Biodigestor [m^3]	VG Biodigestor [m^3]	Demanda cubierta %
12	2,00	0,500	100
9	1,50	0,375	75
6	1,00	0,250	50
4,8	0,80	0,200	40
3,6	0,60	0,150	30
3	0,50	0,125	25
2,4	0,40	0,100	20
2,28	0,38	0,095	19
2,16	0,36	0,090	18
2,04	0,34	0,085	17
1,92	0,32	0,080	16
1,8	0,30	0,075	15
1,2	0,20	0,050	10

Fuente: Propia

De acuerdo con la Tabla 2.4 se selecciona un biodigestor de 340 litros debido a la disponibilidad de la biomasa para el caso de estudio, así como el volumen ocupado por el biodigestor dentro del hogar.

Determinación del sistema de almacenamiento

Para determinar el sistema de almacenamiento, es necesario conocer la cantidad de biogás producido, y el porcentaje de metano que tiene este biogás.

$$VTCH4 = (M_{biomasa} \times Tr \times BP \times n_{biogás}) \times \%SV \times \%ST \times \%CH4 \quad (2.11)$$

Donde:

M_{total} : Cantidad de biomasa total [Kg/día]

$\%SV$: Porcentaje de sólidos volátiles

$\%ST$: Porcentaje de sólidos totales

$\%CH4$: Porcentaje de metano contenido en el biogás

BP : Biogás producido en función de los sólidos volátiles [m^3 / kg]

Tr : Tiempo de retención [días]

$VTCH4$: Volumen de metano producido a los 50 días [m^3]

$n_{biogás}$: Rendimiento del biogás [m^3 / Kg]

Datos:

M_{total} : se toma la biomasa del caso de estudio, equivalente a 2 Kg

$\%SV$: 77% de acuerdo con la Tabla 1.2

$\%ST$: 99% de acuerdo a la Tabla 1.2

$\%CH4$: 61,9% de acuerdo con la Tabla 1.4

BP : 0,2110 de acuerdo con la Tabla 1.4.

Tr : 50 días

$n_{biogás}$: 0,5 [m^3 / Kg] de acuerdo con (Cusi, 2018)

$$VTCH4 = 2,04 \frac{Kg}{día} \times 50 \text{ días} \times 0,5 \times 0,77 \times 0,99 \times 0,619 \times 0,211 \frac{m^3}{Kg}$$

$$VTCH4 = 5,1 [m^3]$$

Para determinar el metano producido diariamente, se procede a dividir la producción total de metano para el tiempo de retención, según la ecuación 2.12.

$$VCH4 = \frac{VTCH4}{Tr} \quad (2.12)$$

Donde:

$VCH4$: Volumen de metano producido al día [$m^3 / día$]

Tr : Tiempo de retención [días], se tiene un valor de 50 días

$VTCH4$: Volumen de metano producido a los 50 días [m^3]

$$VCH4 = \frac{5,1 m^3}{50 \text{ día}}$$

$$VCH4 = 0,10 \left[\frac{m^3}{día} \right]$$

Usando la producción real de metano en función de los sólidos volátiles y sólidos totales, se procede a calcular la producción real de biogás de acuerdo con la ecuación 2.13 y los porcentajes de composición establecidos en la Tabla 1.4.

$$VBio \times 61,9\% = VCH4 \quad (2.13)$$

Donde:

$VCH4$: Volumen de metano producido en un día [$m^3/día$]

$VBio$: Volumen de biogás producido al día [$m^3/día$]

$$VBio = \frac{0,10 \frac{m^3}{día}}{0,619}$$

$$VBio = 0,164 \left[\frac{m^3}{día} \right]$$

Para determinar cuánto tiempo se puede cocinar al día se usa la ecuación 2.14 y la cantidad de biogás producido en un día y el flujo de biogás determinado en la sección 2.5.

$$USO = \frac{VBio}{\dot{v}_{biogás}} \quad (2.14)$$

Donde

$VBio$: Volumen de metano producido en un día [m^3]

$\dot{v}_{biogás}$: Flujo volumétrico del biogás [m^3/h]

USO : Tiempo de uso al día en hora

$$USO = \frac{0,164 m^3}{0,251 \frac{m^3}{h}}$$

$$USO = 0.65 \text{ horas} = 39,2 \text{ minutos}$$

El dimensionamiento del sistema de almacenamiento depende de dos factores principales, entre los que se tiene la producción de biogás que se tiene al día y el uso que se le desea dar.

Para el diseño del biodigestor familiar en el sector urbano, lo que se requiere principalmente es que el biodigestor ocupe poco espacio dentro del hogar, que sea robusto y que no necesite mantenimiento continuo debido a fugas en las conexiones. Para dar solución a este requerimiento se pensó en un sistema de almacenamiento dentro del mismo biodigestor, para hallar la dimensión del sistema de almacenamiento se debe tomar en cuenta, que el diseño del biodigestor desde su diseño inicial ya tiene destinado un 25% de su volumen para almacenar parte del biogás producido. Razón por la cual el sistema del almacenamiento será igual a la diferencia entre el biogás producido, y el espacio ya ocupado por este dentro del biodigestor. De acuerdo con la ecuación 2.15 se determina el volumen del sistema de almacenamiento

$$VA = VBio - VG \quad (2.15)$$

Donde:

$VBio$: Volumen de biogás producido en un día [m^3]

VA : Volumen del sistema de almacenamiento en un día [m^3]

VG : Volumen del gasómetro [m^3]

$$VA = 0,164 - 0,085 = 0,079 \text{ [}m^3\text{]}$$

Siendo 0.079 m^3 el espacio que deber ser destinado diariamente para almacenar el biogás producido. No obstante, este valor puede cambiar ya que el sistema de almacenamiento dependerá del consumo que se le dé diariamente al biogás producido. De acuerdo al uso que se le dará al biogás en el caso de estudio, el sistema de almacenamiento no es suficiente, ya que se requiere acumular más tiempo el biogás con el fin de brindar un mayor tiempo de cocción.

En la Tabla 2.5 se presenta la cantidad de biogás y metano producido en función de la cantidad de biomasa ingresada al día, además se muestra el tiempo que se podría usar el biogás para la cocción de alimentos. Para el caso de estudio donde se dispone de 2,04 Kg de materia orgánica, se podrá cocinar aproximadamente 39 minutos al día, debido a que 39 minutos de uso no son suficientes para la cocción de alimentos, se diseña un sistema de almacenamiento que permita retener dos días el biogás, lográndose obtener un tiempo de uso de una hora y veinte minutos. Con la ecuación 2.16 se relaciona el volumen de almacenamiento de acuerdo a los requerimientos de almacenar el biogás 2 días.

$$VAR = VA \times T \quad (2.16)$$

Donde

VAR : Volumen real del sistema de almacenamiento [m^3]

VA : Volumen del sistema de almacenamiento en un día [m^3]

T : Tiempo de almacenamiento [día]

$$VAR = 0,079 \text{ m}^3 \times 2$$

$$VAR = 0,158 \text{ [}m^3\text{]}$$

Tabla 2.5 Estimación de Biogás y Metano producido

Biomasa [Kg/día]	Sólidos Volátiles [Kg]	Metano Producido Total [m3]	Metano Producido al día [m ³ /día]	Biogás [m ³ /día]	Almacenamiento [m ³ /día]	Uso al día [h]	Uso al día [min]
12	9,15	29,9	0,60	0,97	0,465	3,84	230,7
9	6,86	22,4	0,45	0,72	0,349	2,88	173,0
6	4,57	14,9	0,30	0,48	0,233	1,92	115,3
4,8	3,66	11,9	0,24	0,39	0,186	1,54	92,3
3,6	2,74	9,0	0,18	0,29	0,140	1,15	69,2
3	2,29	7,5	0,15	0,24	0,116	0,96	57,7
2,4	1,83	6,0	0,12	0,19	0,093	0,77	46,1
2,28	1,74	5,7	0,11	0,18	0,088	0,73	43,8
2,16	1,65	5,4	0,11	0,17	0,084	0,69	41,5
2,04	1,56	5,1	0,10	0,16	0,079	0,65	39,2
1,92	1,46	4,8	0,10	0,15	0,074	0,62	36,9
1,8	1,37	4,5	0,09	0,14	0,070	0,58	34,6
1,2	0,91	3,0	0,06	0,10	0,047	0,38	23,1

Fuente: Propia

2.6.2 Selección de elementos secundarios

Selección de válvula de seguridad

Debido a las temperaturas en las que opera el biodigestor, existe un cambio de presión dentro del mismo. Para tener total seguridad durante el uso de este es necesario el uso de una válvula de seguridad, misma que puede ser de dos tipos, la primera más rudimentaria consiste en una botella con agua unida a la tubería, en la que si la presión del biogás es mayor a la que tiene la botella esta perderá sujeción, la segunda consiste en una válvula de alivio de metal, esta resulta mucho más práctica y versátil ya que tiene un sistema más robusto que no se ve afectado por el medio ambiente.

Para el cálculo de presión se toma en cuenta la máxima temperatura que puede alcanzar el biodigestor en casos extremos, asumiendo una temperatura de 50 grados centígrados el doble de la temperatura máxima que se tiene, esto con el fin de tener un factor de seguridad. Para esto se determina primero la presión del gas de acuerdo con la ecuación 2.17 según (Cusi, 2018).

$$P_g = h_g \times p \times g \quad (2.17)$$

Donde:

P_g : Presión de la mezcla de biogás [Pa]

h_g : Altura de la mezcla de biogás equivalente [m]

p : Densidad del biogás [Kg/m³]

g : Gravedad [m/s²]

Datos:

$$h_g : 0,53[m]$$

$$p : \text{De acuerdo a la Tabla 1.3 se tiene } 1,2 [Kg/m^3]$$

$$g : 9,8[m/s^2]$$

$$P_g = 0,53 m \times 1,2 \frac{Kg}{m^3} \times 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$P_g = 6,23 [Pa]$$

Se determina la presión máxima de biogás de acuerdo a la temperatura máxima que podría alcanzar con la ecuación 2.18 (Cusi, 2018).

$$PG = \frac{P_g \times T_{max}}{T_t} \quad (2.18)$$

Donde:

$$P_g : \text{Presión de la mezcla de biogás } [Pa]$$

$$PG : \text{Presión máxima de la mezcla de biogás } [Pa]$$

$$T_{max} : \text{Temperatura máxima } [^\circ C]$$

$$T : \text{Temperatura de trabajo } [^\circ C]$$

Datos

$$T_{max} : 50[^\circ C]$$

$$T : 18[^\circ C]$$

$$PG = \frac{5,76 Pa \times 50^\circ C}{18^\circ C}$$

$$PG = 17,3 [Pa]$$

Se calcula la presión del fluido sobre las paredes del digestor con la ecuación 2.19.

$$P_T = (h_{MO} \times p_{MO} \times g) + PG \quad (2.19)$$

Donde

$$h_{MO} : \text{Altura de la mezcla de materia orgánica } [m]$$

$$p_{MO} : \text{Densidad nominal de la materia orgánica } [Kg/m^3]$$

$$g : \text{Gravedad, se tiene un valor de } 9,8[m/s^2]$$

$$PG : \text{Presión máxima de la mezcla de biogás } [Pa]$$

$$P_T : \text{Presión total sobre las paredes del biodigestor } [KPa]$$

Datos

$$h_{MO} : 0,56m [m]$$

$$p_{MO} : 800 [Kg/m^3]$$

$$g : 9,8[m/s^2]$$

$$P_T = \left(0,56 m \times 800 \frac{Kg}{m^3} \times 9,8 \frac{m}{s^2} \right) + 17,3 Pa$$

$$P_T = 4,41 \text{ [Kpa]}$$

Debido a que la presión calculada para la válvula de seguridad es menor a la presión que establecen los fabricantes comercialmente, no se ve la necesidad de seleccionar una válvula. No obstante, el filtro de agua puede actuar como una válvula de seguridad para presiones bajas.

Espesor de tanque

Se determina el espesor del tanque con la ecuación 2.20 (Cusi, 2018).

$$Kc = \frac{P_T \times De}{2 * e} \quad (2.20)$$

Donde

Kc : Resistencia a la tracción del plástico en función del espesor [KPa]

De : Diámetro exterior del tanque, se tiene un valor de 0,88[m]

e : Espesor del tanque[mm]

PT : Presión total sobre las paredes del biodigestor [KPa]

$$Kc = \frac{4,41 \text{ Kpa} \times 0,88 \text{ m}}{2 * 6 \text{ mm}}$$

$$Kc = 323,4 \text{ [Kpa]}$$

Con el espesor de 6 mm del tanque se tiene un valor de resistencia a la tracción igual a 323,4 mismo que es menor a la resistencia última a la tracción igual a 21000 KPa, por lo que este valor de espesor es óptimo para el diseño.

2.7 Construcción

En la construcción del biodigestor doméstico se deben tomar en cuenta consideraciones previas que influyen de manera significativa en la generación de biogás. Consideraciones tales como disponibilidad de espacio para la instalación, ubicación geográfica, disponibilidad de residuos orgánicos, disponibilidad de un recurso hídrico y condiciones climáticas adecuadas. Además, se toma en cuenta que el biodigestor se encuentre ubicado en una zona de la casa donde se tenga la mayor exposición del biodigestor al sol.

En base al dimensionamiento del biodigestor se elaboraron planos de conjunto y taller que se muestran en el anexo 1, los cuales servirán como guía para realizar el montaje de cada una de las partes del biodigestor.

2.7.1 Montaje del biodigestor y accesorios

Una vez adquiridos todos los materiales que se detallan en la Tabla 3.5, se procedió a realizar la instalación del biodigestor como se detalla a continuación:

2.7.1.1 Montaje para la limpieza del tanque y el protocolo de pruebas

- Realizar 3 perforaciones ubicadas de acuerdo a las especificaciones de los planos (Anexo 1) con un juego de sacabocados de ½". Figura 2.7.



Figura 2.7 Perforación lateral del tanque. Fuente: Propia.

- Para la toma de muestras se ubican las conexiones mostradas en la Figura 2.8, de acuerdo con el plano de ensamblaje (Anexo 1)



Figura 2.8 Conexión agujero superior lateral del tanque. Fuente: Propia.

2.7.1.2 Montaje salida de biol.

- Para la salida del biol, se instala las conexiones mostradas en la Figura 2.9, de acuerdo con el plano de ensamble (Anexo 1), colocando teflón en las uniones y roscando, para que quede bien sellado el tanque.



Figura 2.9 Conexiones laterales del biol y limpieza. Fuente: Propia.

2.7.1.3 Boca de carga de biomasa

- Para la entrada de biomasa se ubica en la tapa del tanque un adaptador de tanque y el tubo de alimentación, mismo que se puede ver en el plano de ensamble (Anexo 1) y en la Figura 2.10 y 2.11.



Figura 2.10 Unión de tanque y adaptador PVC. Fuente: Propia.



Figura 2.11 Conexión de la boca de carga. Fuente: Propia.

2.7.1.4 Salida de Biogás

- Para la salida de biogás se colocan las conexiones mostradas en la Figura 2.12, de acuerdo con el plano de ensamble (Anexo 1).



Figura 2.12 Conexión de la salida de biogás. Fuente: Propia.

2.7.1.5 Filtro para sulfuro de hidrógeno (H₂S)



Figura 2.13 Conexión Filtro de Sulfuro de Hidrógeno. Fuente: Propia.

- Realizar las conexiones tal, de acuerdo con el plano de ensamble (Anexo 1) y como se muestra en la Figura 2.13.

2.7.1.6 Hermetización del tanque

- Realizar una soldadura de plástico en la tapa y tanque del biodigestor para así garantizar la hermeticidad del mismo, tal como se puede ver en la Figura 2.14.



Figura 2.14 Soldadura del tanque. Fuente: Propia.

2.7.1.7 Pintura del tanque

- Se procede a pintar todo el biodigestor con spray de color negro mate con el fin de incrementar la absorción y captar los rayos del sol de manera más efectiva.



Figura 2.15 Soldadura y pintura del tanque. Fuente: Propia.

2.8 Protocolo de pruebas.

Para evaluar el correcto funcionamiento del biodigestor y garantizar la producción de biogás se realizarán distintas pruebas, sobre las cuales se evaluarán los valores medidos y se verificará si los mismos se encuentran dentro de los rangos establecidos para una correcta producción de biogás, en el caso de que estos valores no se encuentren dentro de los rangos se realizarán acciones correctivas para garantizar la producción de biogás.

Las pruebas a realizar son las siguientes:

- Prueba de hermeticidad sin Carga
- Prueba de Temperatura
- Prueba de pH

- Prueba de Calidad de biogás
- Prueba de Calidad del biol y biomasa
- Prueba de Combustión
- Prueba de Generación

2.8.1 Prueba de Hermeticidad sin carga

El objetivo de esta prueba es ver la hermeticidad del tanque y sus uniones, para esto se ingresa aire a presión dentro del biodigestor y se observa si existe caídas de presión al cabo de 15 minutos, complementariamente se usa agua jabonosa para identificar en qué lugar se ubican las fugas.

Procedimiento:

- Encender y cargar el compresor hasta una presión de 15 Psi
- Conectar la manguera de alimentación del compresor al tanque
- Abrir la llave de paso del compresor
- Presurizar el sistema del biodigestor a 2 Psi
- Cerrar la llave de paso del compresor y esperar 15 minutos
- Se coloca agua jabonosa en todas las uniones del biodigestor para ver que no existan fugas de aire
- Se verifica que la presión del tanque no caiga de los 2 Psi, presión equivalente a la presión de seguridad calculada en la sección 2.62
- Repetir el proceso al menos 5 veces, con el fin de evidenciar la hermeticidad del biodigestor.




En la Figura 2.16 se aprecia el procedimiento para realizar la prueba de hermeticidad, mientras que la Tabla 2.6 se enlistan los equipos necesarios para realizar esta prueba.



Figura 2.16 Conexión de compresor a biodigestor. Fuente: Propia.

La Tabla 2.6 muestra los equipos utilizados para la prueba.

Tabla 2.6 Equipos prueba de Hermeticidad sin carga.

Equipo	Figura	Características
Manómetro		Rango: 3 psi Resolución: 0,1 psi
Compresor		Capacidad de almacenamiento: 24 L Presión máxima de almacenamiento: 115 psi Potencia del motor: 2HP Voltaje: 110 V
Agua Jabonosa		Agua con Deja

Fuente: Propia.

Acciones Correctivas: En el caso de que se presenten fugas se debe cambiar el componente y el sellante con el que se acoplo este al sistema, si las fugas persistan se debe verificar la calidad del componente y se debe cambiar por uno de mejor calidad.

2.8.2 Prueba de temperatura

El objetivo de esta prueba es medir la temperatura interior y exterior a la que se encuentra el biodigestor durante 52 días, con el fin de verificar que este se encuentre dentro de los parámetros para el crecimiento de metanógenos y producción de biogás.

Procedimiento:

- Tomar medidas de temperatura en el interior y exterior del biodigestor a las 3 de la tarde durante 52 días.
- Verificar que las temperaturas leídas se encuentran dentro del rango establecido para que se dé el proceso de digestión anaeróbico.



En la Figura 2.17 se aprecia la toma de temperatura interior y exterior del biodigestor, donde la exterior se toma con una sonda cercana al biodigestor para registrar los ambientes, mientras que la interior se toma con una sonda ubicada dentro del biodigestor. En la Tabla 2.7 se enlista la sonda de temperatura de medición y el termómetro de exactitud conocida con el que se verificara el funcionamiento de la sonda de acuerdo con el anexo 6,7 y 8.



Figura 2.17 Temperatura interior y exterior del biodigestor. Fuente: Propia.

En la siguiente Tabla se muestran los equipos utilizados para la prueba de temperatura.

Tabla 2.7 Equipos para prueba Temperatura

Equipo	Figura	Características
Sonda de Temperatura		Rango: -50 a 110 ° C Exactitud: $\pm 1^\circ \text{C}$ Resolución: 0.1° C
Termómetro Fluke		Rango: -50 ° C a -150 ° C Exactitud: $\pm 0,011^\circ \text{C}$ Resolución: 0.1° C

Fuente: Propia.

Acciones Correctivas: En caso de que se tenga temperaturas promedio menores a los 15 grados centígrados, se debe colocar un material aislante en el biodigestor como lana de

hierro para guardar el calor en el interior de este y evitar tiempos de producción de biogás mayores a los óptimos.

2.8.3 Prueba de pH


El objetivo de esta prueba es medir el pH del biodigestor y verificar si la muestra se encuentra en el rango de pH óptimo para que se da la digestión anaeróbica., para esto se toman 8 muestras totales en los 52 días del tiempo de retención, con un intervalo de 7 días para la toma de cada muestra.

Procedimiento:

- Abrir la entrada de biomasa del biodigestor
- Introducir la cinta de pH y dejarla durante 20 segundos
- Sacar la tira de pH y comparamos el color resultante con la tira gráfica que nos proporciona el fabricante.
- La toma de muestras se realizará cada 7 días desde el primer día en que se empezó a cargar biomasa.

En la Tabla 2.8 se muestran los materiales necesarios para realizar la prueba de pH

Tabla 2.8 Equipos para prueba de pH

Equipo	Figura	Características
Tiras de pH-		Rango de pH de 0 a 14

Fuente: Propia.

Acciones Correctivas: En el caso que se tenga niveles de acidez elevados, se debe probar aumentando la cantidad de agua con el fin de tener un pH más neutro, en el caso de que los problemas de acidez persistan se debe vaciar el biodigestor y volver a llenar nuevos residuos orgánicos. Por otro lado, si se tiene niveles de acidez menores al valor de 6 se deben agregar sustancias que ayuden a mejorar estos niveles de acides, sustancias como el óxido de calcio o el hidróxido de sodio.

2.8.4 Prueba de calidad de biogás

El objetivo de esta prueba es ver las propiedades y características del biogás producido tal como se muestra en el Anexo 3, para esto se realiza un análisis cromatográfico de gases


Procedimiento:

- Se debe sacar el aire contenido dentro de la bolsa de tedlar

- Una vez sacado el aire, se abre la válvula de la bolsa de tedlar y se conecta a la manguera del biodigestor
- Se llena la bolsa e tedlar hasta que esta se encuentre a $\frac{3}{4}$ de su capacidad
- No se debe llenar al máximo la bolsa y que se puede romper, de igual manera no se debe abrir por completo la válvula ya que se puede salir.
- Una vez tomada la muestra se procede a entregar esta al laboratorio de análisis instrumental de la facultad de Química de la Escuela Politécnica Nacional.

En la Tabla 2.9 se muestran los materiales necesarios para realizar la prueba de calidad de biogás.

Tabla 2.9 Materiales necesarios para prueba de calidad de biogás

Equipo	Figura	Características
Bolsa de tedlar		Capacidad de 3 L

Fuente: Propia.

Acciones correctivas: En caso de que se tenga un porcentaje de metano de 0 en el biogás producido, se deberá vaciar el biodigestor y evaluar si la biomasa de alimentación tiene las características suficientes para que se dé la digestión anaeróbica.

2.8.5 Prueba de calidad del biol y biomasa

El objetivo de esta prueba es ver la calidad del biol producido en función de las concentraciones de N, P, K. Debido a que el biol depende de la biomasa ingresada también se realiza un estudio de esta, y se determinara su relación C/N.


Procedimiento:

- Seleccionar dos botellas de agua de 500 ml totalmente vacías, que no hayan sido expuestas a otras sustancias.
- Se abre una de las botellas y se acerca a la válvula de salida de biol
- Se abre la válvula de salida de biol y se llena completamente la botella.
- Se cierra la botella y se cerciora de que no se esté regando contenido
- Para tomar la muestra de biomasa, con ayuda de una bolsa ziploc se ingresa una muestra de la biomasa que normalmente se ingresa al biodigestor.
- Se cierra la botella y se verifica que no se esté regando el contenido.

- Se coloca el etiquetado de cada muestra y se traslada al INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias) para que analicen las muestras.

En la Tabla 2.10 se muestran los materiales necesarios para realizar la toma de muestras de biomasa y de biol

Tabla 2.10 Materiales necesarios para prueba de biol y biomasa

Equipo	Figura	Características
Bolsa Ziploc		-
Botella de Agua		Capacidad 500 ml

Fuente: Propia.

Acciones correctivas: En caso de que se tenga una relación C/N menor a 8 se deberá mezclar la biomasa con alimentos que tengan mayor porcentaje de carbono y menor porcentaje de nitrógeno.

2.8.6 Prueba de combustión del biogás

El objetivo de esta prueba es determinar si se combustiona el biogás, además de identificar el color de la llama del mismo, para esto se acerca un encendedor a la válvula del biodigestor abierta y se combustiona el gas.

Procedimiento

- Abrir la válvula de paso del biodigestor
- Colocar un encendedor cerca de la válvula
- Verificar que el biogás combustione al alejar la llama de la válvula
- Identificar el color de la llama del biogás Verificar el color de la llama del biogás

Acciones correctivas: En caso de que no combustione el gas se deberá evaluar las válvulas de salida, ya que si en estas se acumula agua se puede tener problemas de combustión.

2.8.7 Prueba de generación de biogás

El objetivo de esta prueba es estimar la producción de biogás, debido a que no se cuenta con un medidor de flujo se estima la producción de biogás de manera indirecta con la presión, ya que esta se relaciona con la cantidad de biogás almacenado en el biodigestor mediante la ley de los gases ideales, con el fin de verificar la estimación de producción de biogás se compara el valor estimado de biogás disponible con el biogás consumido en el calentamiento de agua. Para realizar esta prueba se registran los valores de presión durante 52 días, una vez obtenida la presión de trabajo se calienta 1 litro de agua, y se mide el tiempo en que el agua alcanza una determinada temperatura.

Procedimiento:

- Registrar las medidas del manómetro durante 52 días, realizar la toma de medidas a las 3 de la tarde.
- Verificar que exista aumento en la presión con el pasar de los días tal como se muestra en la Figura 2.20.
- En caso de que se sospeche que existen fugas colocar agua jabonosa en las uniones y conexiones del tanque para determinar la existencia de fugas y su ubicación
- Ubicar la olla con 1 litro de agua tal como se muestra en la Figura 2.21
- Tomar la temperatura inicial a la que se encuentra el agua
- Conectar la manguera de la cocina al biodigestor
- Abrir la válvula del biodigestor
- Encender la estufa
- Llevar el agua a una temperatura de 70 °C o 80 °C
- Tomar el tiempo en el que el agua alcanzo la temperatura deseada.

Cantidad estimada de biogás producido

Para estimar la producción de biogás disponible se relaciona la presión de trabajo leída por el manómetro y la cantidad de gas contenido en el biodigestor por medio de la ley de los gases ideales. De acuerdo con la (Cengel Y., 2012) la relación entre la presión y el gas contenido dentro de un recipiente se puede expresar mediante la ecuación 3.1 y 3.2.

$$P \times V = n \times R \times T \quad (2.21)$$

$$n = \frac{P \times V}{R \times T}$$

$$n = \frac{m}{M} \quad (2.22)$$

$$m = \frac{P \times V}{R \times T} \times M$$

Donde:

P : Presión leída por el manómetro[atm].

V : Volumen de almacenamiento[l].

n : Moles de gas [mol].

m : Masa del gas en gramos[g].

M : Peso molecular del biogás[g/mol].

R : Constante universal de los gases[l * atm/mol * K].

T : Temperatura promedio dentro del biodigestor[K].

Luego se procede a hallar el volumen de biogás estimado producido al día.

$$V_{biogás} = \frac{m_{biogás}}{\rho_{biogás}} \quad (2.23)$$

Donde:

$\dot{m}_{biogás}$: Flujo masico del biogás [Kg/s]

$\dot{v}_{biogás}$: Flujo volumetrico de biogás [m^3/s]

$\rho_{biogás}$: Densidad del biogás [Kg/m^3]

Cantidad de biogás consumido

Modelo Matemático

Se aplica la primera ley con la cual se identifica el volumen de control, tal como se muestra en la siguiente Figura 2.18.

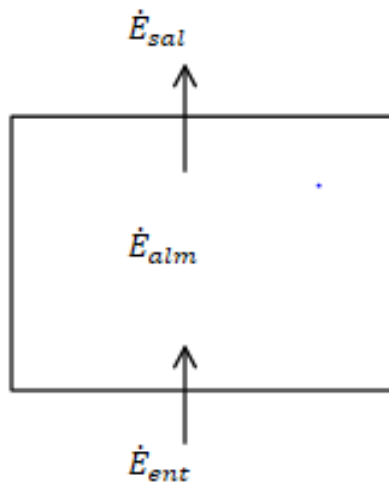


Figura 2.18 Volumen de control. Fuente: Propia.

Balance de energía

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sal} + \dot{E}_{atm} \quad (2.24)$$

Realizando el balance de energía en la ecuación 3.3, se tiene:

- La energía que entra al volumen de control se debe a la energía por el calentamiento del biogás.

- La energía almacenada se debe al calentamiento del agua.
- La energía que sale del volumen de control se debe a las pérdidas por convección y radiación.
- No existe energía generada en este volumen de control.

Bajo las anteriores suposiciones se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{ent} &= \dot{E}_{sal} + \dot{E}_{alm} \\ \dot{v}_{biogás} \times PCI &= \dot{m}cp\Delta T + h_{conv}A_{conv}(T_w - T_{\infty}) + h_{rad}A_{rad}(T_w - T_{alr}) \quad (2.25) \\ \dot{v}_{biogás} \times PCI &= \dot{m}cp\Delta T + h_{cr}A_{cr}(T_w - T_{\infty})\end{aligned}$$

Se realiza el análisis térmico para el calentamiento de 1l de agua en un recipiente de acero inoxidable, tal y como se muestra en la Figura 2.19.

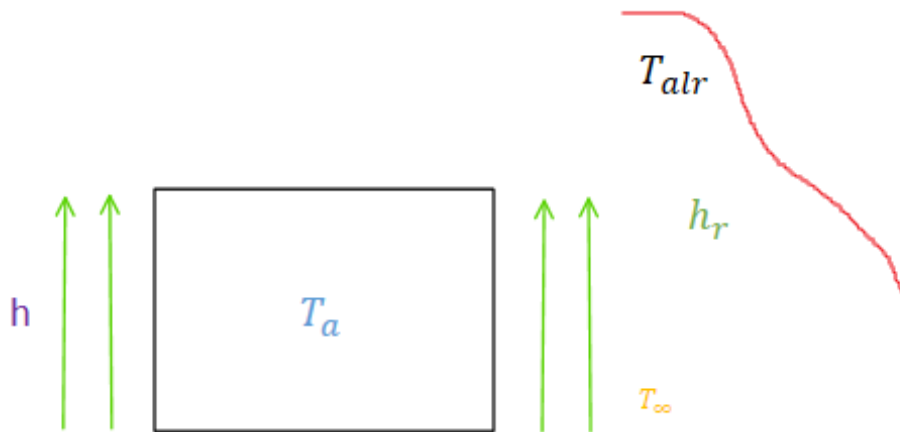


Figura 2.19 Esquema del calentamiento de agua. Fuente: Propia.

Para la determinación del flujo de masa del biogás se desarrolla la ecuación anterior.

$$\dot{v}_{biogás} \times PCI = \dot{v}_w \rho cp(T_{iw} - T_{fw}) + h_{cr}A_{cr}(T_w - T_{\infty})$$

Donde:

$\dot{v}_{biogás}$: Flujo Volumetrico del biogas [m^3/s]

PCI : Poder Calorifico Inferior del biogas [KJ/m^3]

\dot{v}_w : Flujo Volumetrico del agua [m^3/s]

ρ : Densidad del agua [Kg/m^3]

cp : Calor Especifico del agua [$KJ/Kg K$]

h_{cr} : Coeficiente de convección – radiación [W/m^2K]

A_{cr} : Área de convección – radiación del recipiente [m^2]

T_w : Temperatura del agua [K]

T_{∞} : Temperatura ambiente [K]

T_{iw} : Temperatura inicial del agua [K]

T_{fw} : Temperatura final del agua [K]

Cálculo del coeficiente de convección natural para el recipiente

Para obtener las propiedades termo físicas del aire se calcula la temperatura de la película, tal y como se muestra a continuación:

$$T_p = \frac{T_{si} + T_{\infty}}{2} \quad (2.26)$$

Donde:

T_p : Temperatura de la película [K]

T_{si} : Temperatura superficial [K]

T_{∞} : Temperatura de los alrededores [K]

Cálculo del número de Rayleigh y número de Nusselt

Antes del cálculo de verificamos que la olla que tiene forma de cilindro se pueda asumir como una placa vertical para lo cual usamos la siguiente formula.

$$D \geq \frac{35 * L}{Gr_L^{1/4}} \quad (2.27)$$

Donde:

Gr_L : Número de Grashof

D : Diametro del recipiente [m]

L : Longitud del recipiente [m]

Número de Grashof

Para el cálculo del número de Grashof, teniendo un recipiente de 0,035[m] de longitud y 0,23 [m] de diámetro.

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty}) * L^3}{\nu^2} \quad (2.28)$$

Donde:

Gr_L : Número de Grashof

g : Gravedad de la tierra [m/s^2]

β : Coeficiente de expansión [1/K]

T_s : Temperatura de la superficie [K]

T_{∞} : Temperatura de los alrededores [K]

L : Longitud de la olla [m]

ν : Viscosidad cinemática [m^2/s]

Teniendo el valor del número de Grashof volvemos a la ecuación 3.7 para verificar la relación. Comprobando la condición de que el diámetro de la olla es mayor que la relación anteriormente calculada, se puede utilizar las fórmulas para pared plana vertical, con lo cual se tiene la siguiente ecuación para el número de Rayleigh,

$$R_{aD} = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty}) * L^3}{\nu^2} \quad (2.29)$$

Donde:

R_{aD} : Número de Rayleigh

g : Gravedad de la tierra [m/s^2]

β : Coeficiente de expansión [$1/K$]

T_s : Temperatura de la superficie [K]

T_{∞} : Temperatura de los alrededores [K]

L : Longitud de la olla [m]

ν : Viscosidad cinemática [m^2/s]

Utilizamos la ecuación de nusselt compleja más exacta, debido a que se comprobó anteriormente que se podía aproximar a una placa de pared vertical.

$$N_{uD} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * R_{aD}^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.30)$$

Donde:

N_{uD} : Numero de nusselt

R_{aD} : Número de Rayleigh

Pr : Número de Prandtl

Para el cálculo del coeficiente de radiación se utiliza la siguiente fórmula.

$$h_{conv} = \frac{N_{uD} * k}{L} \quad (2.31)$$

Cálculo del coeficiente de radiación

$$h_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s + T_{\infty}) * (T_s^2 + T_{\infty}^2) \quad (2.32)$$

Donde:

h_{rad} : Coeficiente de radiación [W/m^2K]

ε : Emisividad de la superficie, entre 0 y 1

σ : Constante de Stefan – Boltzman, $5,67 * 10^{-8}$ [W/m^2K^4]

T_s : Temperatura de la superficie [K]

T_{∞} : Temperatura de los alrededores [K]

Cálculo del coeficiente de convección-radiación (h_{cr})

$$h_{cr} = h_{conv} + h_{rad} \quad (2.33)$$

Dónde:

h_{cr} : Coeficiente de convección – radiación [W/m^2K]

h_{conv} : Coeficiente de convección [W/m^2K]

h_{rad} : Coeficiente de convección [W/m^2K]

Cálculo del área de transferencia de calor por convección-radiación (A_{cr})

$$A_{conv} = A_{rad} = A_{cr} = 2 * \pi * r * h \quad (2.34)$$

Donde:

A_{cr} : Área de convección – radiación de transferencia del calor del recipiente [m^2]

r : radio del recipiente [m]

h : Altura del recipiente [m]

Para el cálculo del flujo másico de biogás utilizamos la siguiente ecuación:

$$\dot{v}_{biogás} = \frac{\dot{m}_{biogás}}{\rho_{biogás}} \quad (2.35)$$

Donde:

$\dot{m}_{biogás}$: Flujo masico del biogas [Kg/s]

$\dot{v}_{biogás}$: Flujo volumetrico de biogas [m^3/s]

$\rho_{biogás}$: Densidad del biogas [Kg/m^3]

En la Figura 2.20 se aprecia la toma de lecturas para prueba de funcionalidad, mientras que en la Figura 2.21 se detalla el montaje para realizar el calentamiento de agua.






Figura 2.20 Lectura de manómetro con carga. Fuente: Propia



Figura 2.21 Verificación de temperaturas con agua caliente. Fuente: Propia.

Para verificar la funcionalidad del biodigestor se utilizaron varios equipos, mismos que se muestran en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Equipos para prueba de Hermeticidad con carga

Equipo	Figura	Características
Manómetro		Rango: 3 psi Resolución: 0,05 psi
Agua Jabonosa		Agua con Deja
Sonda de Temperatura		Rango: -50 a 110 ° C Exactitud: $\pm 1^\circ$ C Resolución: 0.1° C

Hornilla		Un quemador
Temporizador Digital		-

Fuente: Propia.

Acciones Correctivas: En caso de que no se registre un aumento de presión con el pasar de los días se deberá evaluar en primera instancia si existen fugas, en caso de que esta no sea la razón por la que no se registra un aumento de presión en el biodigestor se deberá evaluar las pruebas de temperatura y pH ya que estas son variables críticas en el proceso de biodigestión anaeróbica.

3 Resultados y discusión

3.1 Prueba de hermeticidad sin carga

Los resultados de la prueba de hermeticidad se muestran en la Tabla 3.1, en la segunda columna se muestra el valor nominal de inicio y en la tercera columna se muestra el valor de presión.

Tabla 3.1 Resultados de prueba de hermeticidad sin carga

Tiempo	Medición	Presión de Prueba (psi)	Presión medida luego de 15 minutos (psi)
15	1	2	2
30	2	2	2
45	3	2	2
60	4	2	2
75	5	2	2

Fuente: Propia.

En la Figura 3.1 se aprecia los resultados de la prueba de hermeticidad de forma gráfica.

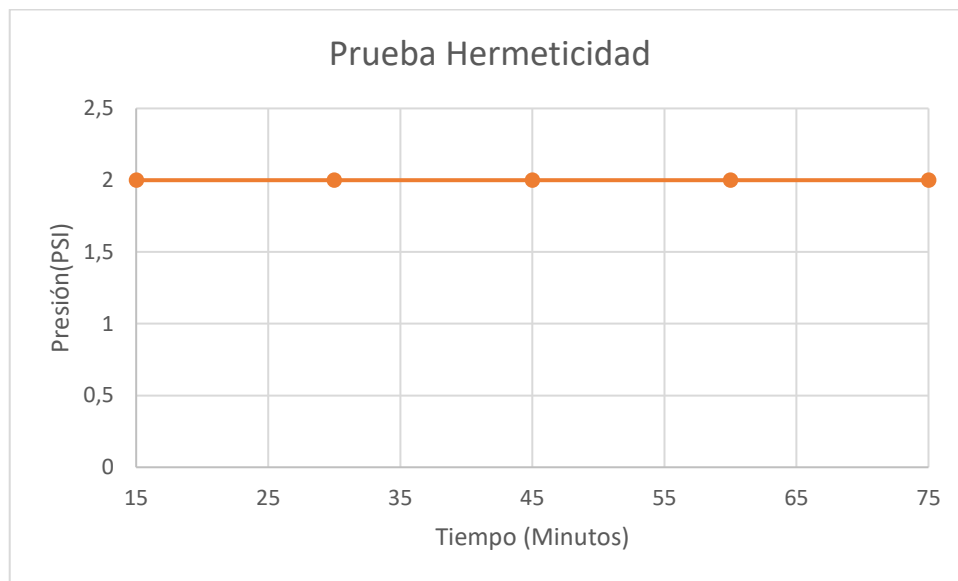


Figura 3.1 Caída de presión en función del tiempo. Fuente: Propia

De acuerdo con la Figura 3.1 el biodigestor no presenta pérdidas de presión ya que tiene un comportamiento constante en función del tiempo, de igual manera al colocar agua jabonosa en las uniones no se identificó ningún tipo de fuga.

3.2 Prueba de generación de biogás

Los resultados de la prueba de funcionalidad muestran un incremento de la presión con el pasar de los días, en la Figura 3.2 se observa cómo ha ido aumentando la presión respecto a la Figura 2.18 en la que el biodigestor se encontraba en el inicio del tiempo de retención.



Figura 3.2 Incremento de presión en manómetro. Fuente: Propia.

En la Tabla 3.2 se presentan los valores de presión registrados en el transcurso de los 52 días del tiempo de retención.

Tabla 3.2 Presión en el biodigestor

Día	Fecha	Presión del Biodigestor (PSI)	Comentarios
1	15/05/22	0	-
2	16/05/22	0	-
3	17/05/22	0	-
4	18/05/22	0	-
5	19/05/22	0	-
6	20/05/22	0	-
7	21/05/22	0	-
8	22/05/22	0	-
9	23/05/22	0	-
10	24/05/22	0	-
11	25/05/22	0,05	-
12	26/05/22	0,05	-
13	27/05/22	0,05	-
14	28/05/22	0,05	-
15	29/05/22	0,1	-
16	30/05/22	0,15	-
17	31/05/22	0,2	-
18	01/06/22	0,2	-
19	02/06/22	0,2	-
20	03/06/22	0,35	-
21	04/06/22	0,35	-
22	05/06/22	0,4	-
23	06/06/22	0,4	-
24	07/06/22	0,4	-
25	08/06/22	0,5	-
26	09/06/22	0,6	-
27	10/06/22	0,6	-
28	11/06/22	0,7	-
29	12/06/22	0,7	-
30	13/06/22	0,7	-
31	14/06/22	0,75	-
32	15/06/22	0,8	-
33	16/06/22	0,9	-
34	17/06/22	1	-
35	18/06/22	1,1	-
36	19/06/22	1,3	-
37	20/06/22	1,7	-
38	21/06/22	1,75	Se saca biogás hasta tener 0 PSI
40	23/06/22	1,85	Se saca biogás hasta tener 0 PSI
42	25/06/22	1,8	Se saca biogás hasta tener 0 PSI
44	27/06/22	1,85	Se saca biogás hasta tener 0 PSI
46	29/06/22	1,8	Se saca biogás hasta tener 0 PSI
48	01/07/22	1,85	Se saca biogás hasta tener 0 PSI
50	03/07/22	1,8	Se saca biogás hasta tener 0 PSI
52	05/07/22	1,9	Se saca biogás hasta tener 0 PSI

Fuente: Propia.

En la Figura 3.3 se muestran los datos reportados en la Tabla 3.2 relacionados con el incremento de presión con el pasar de los días, durante el tiempo de retención.

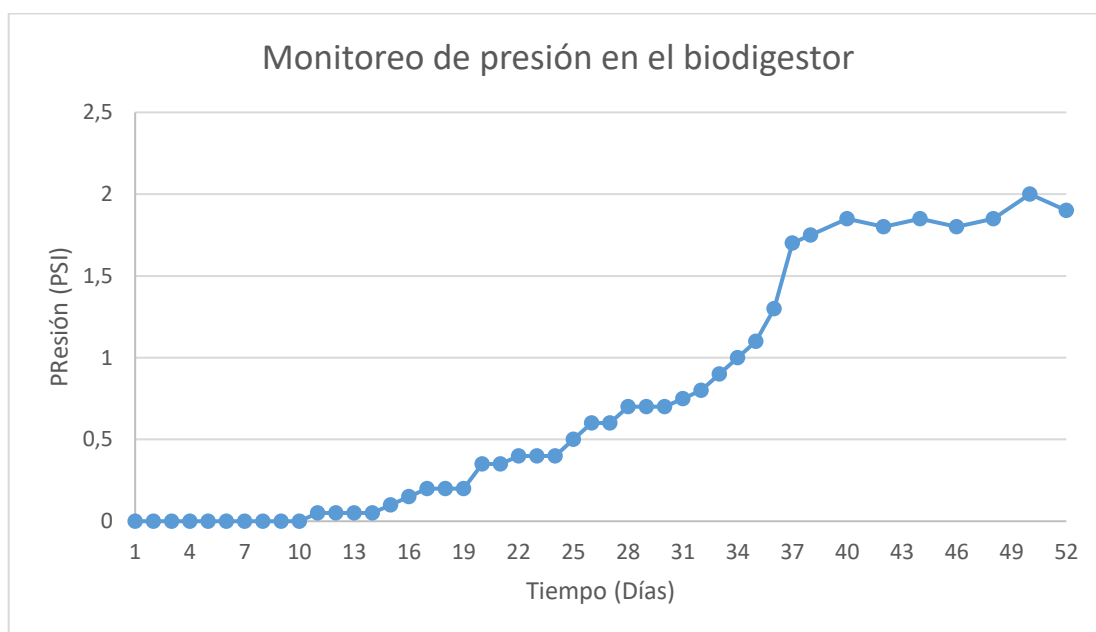


Figura 3.3 Monitoreo de presión en el biodigestor. Fuente: Propia.

De la Figura 3.3 se puede apreciar que la producción de biogás comenzó a partir del día 10. No obstante, hasta el día 19 esta producción era aún baja con un valor de presión que no superaba los 0,2 psi, ya para el día 31 se empezó a tener una mayor producción de biogás misma que se estabilizó a los 43 días, donde se identificó una producción estable que varía de 1,7 psi a 2 psi.

3.3 Prueba de Temperatura

Los valores obtenidos de la temperatura ambiente alrededor del biodigestor y la temperatura en el interior del biodigestor se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Temperatura ambiente, y temperatura interior del biodigestor.

Día	Fecha	Temperatura del biodigestor (°C)	Temperatura Ambiente(°C)	Temperatura Promedio (°C)
1	15/05/22	28,3	22	25,15
2	16/05/22	33,8	31,5	32,6
3	17/05/22	34,2	25,8	30
4	18/05/22	27,2	21,1	24,15
5	19/05/22	25,5	24,9	25,2
6	20/05/22	32,5	29,9	31,2
7	21/05/22	21,9	20,1	21
8	22/05/22	43,1	32,4	37,75
9	23/05/22	20,9	19,7	20,3
10	24/05/22	21,6	22	21,8
11	25/05/22	26,2	23,4	24,8
12	26/05/22	23,4	20,8	22,1

13	27/05/22	39,2	29,5	34,35
14	28/05/22	22,2	20,7	21,45
15	29/05/22	29,2	27,2	28,2
16	30/05/22	35,4	27,6	31,5
17	31/05/22	32	26,5	29,25
18	01/06/22	31,4	22,4	26,9
19	02/06/22	22,2	19,6	20,9
20	03/06/22	21,6	19,6	20,6
21	04/06/22	35,2	26,7	30,95
22	05/06/22	23,4	19,8	21,6
23	06/06/22	22,7	21,7	22,2
24	07/06/22	32,1	25,6	28,85
25	08/06/22	41,3	33,1	37,2
26	09/06/22	24,5	20,6	22,55
27	10/06/22	34,6	27,6	31,1
28	11/06/22	21,4	19,7	20,55
29	12/06/22	24,9	20,9	22,9
30	13/06/22	34,6	27,6	31,1
31	14/06/22	21,9	20,7	21,3
32	15/06/22	25,6	23,9	24,75
33	16/06/22	43	32,5	37,75
34	17/06/22	37,7	31,8	34,75
35	18/06/22	45,6	33,8	39,7
36	19/06/22	32,7	25,3	29
37	20/06/22	40,6	32,9	36,75
38	21/06/22	23,1	19,8	21,45
39	22/06/22	35,7	27,3	31,5
40	23/06/22	25,5	20,4	22,95
41	24/06/22	29,4	27,2	28,3
42	25/06/22	30	25,7	27,85
43	26/06/22	34,2	26,5	30,35
44	27/06/22	20,5	19,1	19,8
45	28/06/22	34,3	25,1	29,7
46	29/06/22	24,2	22,6	23,4
47	30/06/22	27	21,5	24,25
48	01/07/22	23,2	20,6	21,9
49	02/07/22	22,1	20,1	21,1
50	03/07/22	32,9	30,5	31,7
51	04/07/22	34,6	25,8	30,2
52	05/07/22	27,6	22,6	25,1
Promedio		29,6	24,73	27,15

Fuente: Propia.

La Figura 3.4 muestra los resultados reportados en la Tabla 3.3, donde se evidencia que las temperaturas al interior del biodigestor son mayores que las del ambiente.

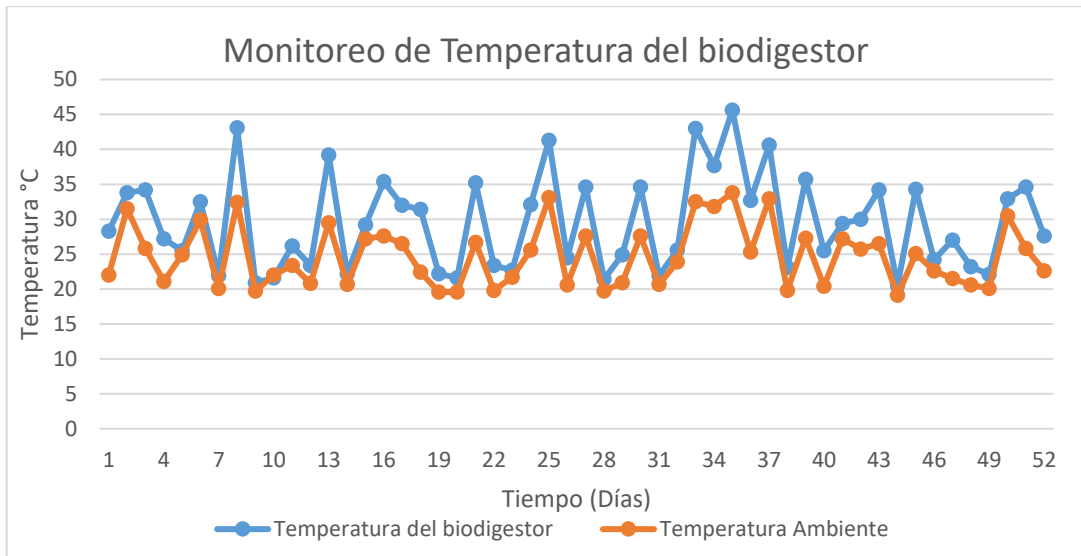


Figura 3.4 Monitoreo de temperaturas del biodigestor. Fuente: Propia.

En la Figura 3.4 se puede ver que la temperatura ambiente influye de manera directa con la temperatura al interior del biodigestor, pues con aumento de la temperatura ambiente la temperatura interna del biodigestor aumenta, lo que garantiza el proceso de digestión anaeróbica y la producción de biogás.

3.4 Prueba de Ph

La toma de muestras de las pruebas de pH se muestra en la Figura 3.5

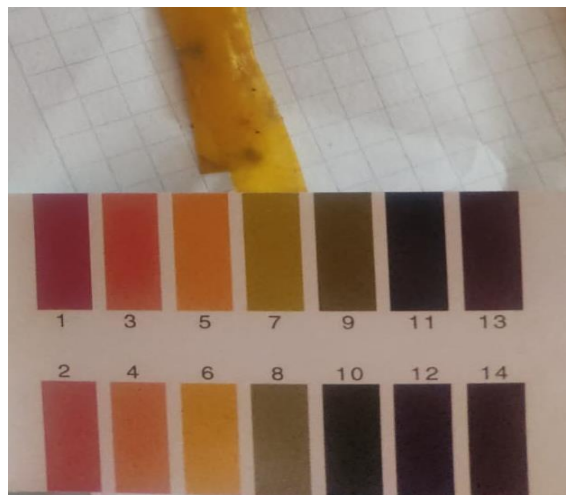


Figura 3.5 Prueba de pH. Fuente: Propia.

La Tabla 3.4 muestra los resultados de pH obtenidos durante los días de prueba

Tabla 3.4 Resultados de medición de pH

N°	Fecha	pH
1	15/05/2022	6
2	21/05/2022	7
3	28/05/2022	7
4	04/06/2022	7
5	11/06/2022	7
6	18/06/2022	7
7	25/06/2022	7
8	02/07/2022	7
Promedio		6,875

Fuente: Propia.

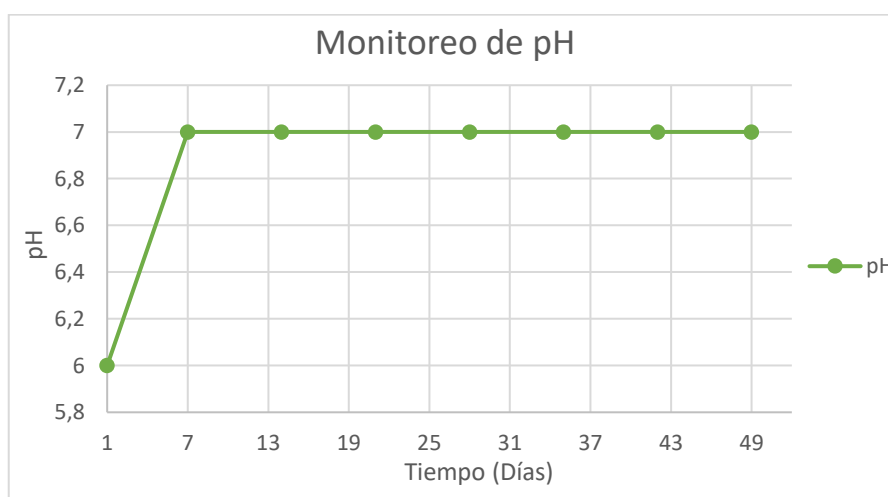


Figura 3.6 Gráfica pH vs Tiempo. Fuente: Propia.

Como se puede ver en la Figura 3.6, el primer día de ingreso de biomasa se tuvo un pH de 6, lo que muestra que la biomasa ingresada era acida, después de 7 días el pH empezó a estabilizarse llegando a mantenerse en 7, lo que nos indica que la acidez disminuyó y por tanto el ambiente es adecuado para la actividad metanogénica y la producción de biogás.

3.5 Prueba de calidad de biogás

El estudio de cromatografía del biogás presentado en el anexo 3 permitió identificar el porcentaje de metano contenido en el biogás. En la Tabla 3.5, se muestran las características de la composición del biogás producido, mientras que en la Tabla 3.6 se muestran las propiedades del biogás.

Tabla 3.5 Características de biogás

Composición	
Componente	% Moles
Oxígeno	13,41
Nitrógeno	40,88
Metano	21,11
Agua	0,54
Dióxido de Carbono	24,07

(Laboratorio de Análisis Instrumental EPN, 2022)

Tabla 3.6 Propiedades de biogás

Propiedades	
Densidad Relativa	1,04
Peso molecular promedio [g/mol]	29,91
Densidad de la muestra [g/L]	1,26
Poder calorífico superior [KJ/m ³]	7953,70
Poder calorífico inferior [KJ/m ³]	7152,35
Factor de compresibilidad (z)	1

(Laboratorio de Análisis Instrumental EPN, 2022)

El biogás producido tiene una concentración de 21,11% de metano, la cual es menor a la esperada de manera teórica de 60%, es decir debido a la diferencia entre el valor teórico y el valor experimental, los tiempos de cocción del caso de estudio son menores a los teóricos. Adicionalmente también se tiene un bajo contenido de metano debido al tipo de residuos utilizados que en este caso fue residuos orgánicos, mismos que tienen menor tendencia a producir metano que residuos como el estiércol, por otro lado también se produjo menor cantidad de metano debido a que se generó en mayor cantidad otro tipo de gases como el oxígeno de 13,41% y el nitrógeno de 40,88%, los cuales deben tener una concentración por debajo del 5%, esto nos indica que, al contar con mayores concentraciones de nitrógeno en el biogás, se tendrá una reducción en el poder calorífico del mismo.

3.6 Prueba de calidad del biol y biomasa

Biomasa

En un análisis inicial se caracterizó de manera teórica la biomasa y se estableció una relación C/N de aproximadamente 20. Sin embargo, los resultados de la prueba de calidad muestran una relación C/N de 13,86 misma que se muestra en el Anexo 2. Si bien este valor difiere del valor teórico inicial y el valor óptimo para la relación C/N, este valor está dentro del rango establecido por el manual de biogás y supera al valor mínimo de 8:1 (Varnero, 2011), valor en el cual se tiene problemas de inhibición de bacterias.

Biol

En el anexo 4 se muestran los resultados del análisis de abono reportado por el laboratorio de suelos del instituto nacional de investigaciones agropecuarias (INIAP), los resultados de laboratorio muestran la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Na, macronutrientes vitales para tener un biol de buena calidad. En la Figura 3.7 se observa la concentración N, P, K que tiene el biol del caso de estudio, y se compara con las concentraciones estimadas para biol orgánico de acuerdo con (Sánchez, 2019). Se comparan únicamente estos 3 macronutrientes ya que estos son los principales debido a que mejoran la calidad y producción de las cosechas. El nitrógeno es de gran utilidad ya que ayuda a que se realice la fotosíntesis, formando proteínas. El fósforo cumple la función de favorecer a la floración y la maduración de frutos, mientras que el potasio es el encargado de la multiplicación celular y la formación de tejidos más resistentes a las sequías y a las heladas, es por esta razón que a mayor concentración se tiene una mejor calidad del biol (Sánchez, 2019).

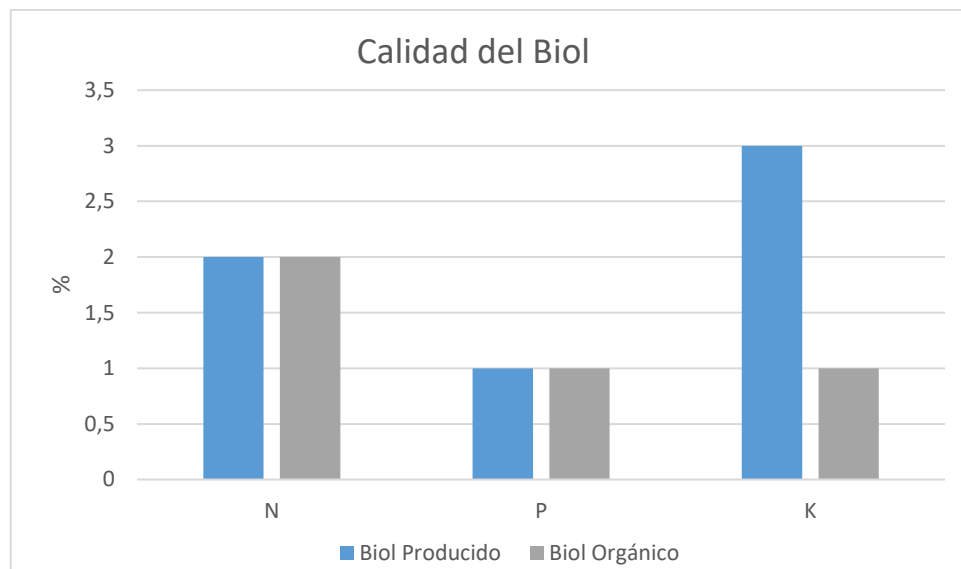


Figura 3.7 Calidad del Biol Producido. Fuente: Propia.

En la Figura 3.7 se puede apreciar que el biol del caso de estudio producido a base de materia orgánica tiene concentraciones similares a los valores esperados para Bioles orgánicos, con la diferencia que el biol del caso de estudio tiene una concentración de potasio mayor, superando en un 1% a la concentración a la concentración estimada de K estimada para Bioles orgánicos.

Prueba de combustión

En la Figura 3.8 se observa el color de la llama del biogás misma que tiene un tono celeste claro que es casi imperceptible en el día tal como se muestra en la Figura 3.9, donde a más del color de la llama del biogás se puede ver el uso del mismo para la cocción de alimentos donde no se requiere de un alto contenido energético, como fritos, calentados y desayunos.



Figura 3.8 Cocción de Alimentos. Fuente: Propia.



Figura 3.9 Color de la llama del biogás. Fuente: Propia.

3.7 Prueba de generación de biogás

3.7.1 Cantidad estimada de biogás producido

De acuerdo con la ecuación 2.21 y 2.22 se procede a determinar la cantidad de biogás producido en función de la presión leída por el manómetro y la temperatura interior del biodigestor del día 50.

Los datos utilizados se presentan a continuación:

Tabla 3.7 Datos de presión y volumen del biodigestor

P [atm]	v[l]	M[g/mol]	R[atml/molK]	T[k]
0,136	243 l	29,91 g/mol	0,08205746	305,9 K

Fuente: Propia.

$$m = \frac{0,136 \text{ atm} \times 243 \text{ l}}{0,08205746 \frac{\text{atm l}}{\text{mol K}} \times 305,9 \text{ K}} \times 29,91 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$m = 39,37 \text{ g}$$

Se procede a hallar el flujo de masa del biogás utilizando como referencia el tiempo de calentamiento del agua que fue de 1200s.

$$m = 39,37 \text{ g} * \frac{1}{1200\text{s}}$$

$$m = 3,28 * 10^{-5} [\text{Kg/s}]$$

Si la densidad del biogás de acuerdo con el anexo 3 es 1,26 g/l, se procede a hallar el volumen estimado de biogás producido al día con la ecuación 2.23.

$$V = \frac{39,37 \text{ g}}{1,26 \text{ g/l}}$$

$$V = 31,25 [\text{l}]$$

De acuerdo con la presión generada se estima que diariamente se produce alrededor de 31,25 litros de biogás al día con un flujo de masa de $3,28 * 10^{-5} \text{Kg/s}$ para la cocción de alimentos.

3.7.2 Determinación de cantidad de biogás consumido.

Los datos de temperaturas utilizados en las siguientes ecuaciones se presentan a continuación:

Tabla 3.8 Temperaturas del agua y el ambiente

T _{si}		T _∞		T _{iw}		T _{fw}	
[°C]	[K]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[°C]	[K]
70	343	30,5	303,5	14,2	287,2	70	343

Fuente: Propia.

Cálculo del coeficiente de convección natural para el recipiente

Para obtener las propiedades termo físicas del aire se calcula la temperatura de la película, tal y como se muestra a continuación, de acuerdo con la ecuación 2.26.

$$T_p = \frac{343 + 303,5}{2}$$

$$T_p = 326,5 [\text{K}]$$

Por medio del programa (EES) y con la temperatura de la película se calculan las propiedades termofísicas (Anexo 9) del aire que se muestran a continuación en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Propiedades termo físicas del aire.

Propiedad	Valor	Unidad
ρ	0,7681	[Kg/m ³]
β	0,003063	[1/K]
Pr	0,704	-
α	$3,659 * 10^{-5}$	[m ² /s]
k	0,02832	[W/ mK]
ν	$2,576 * 10^{-5}$	[m ² /s]

Fuente: Propia.

Cálculo del número de Rayleigh y número de Nusselt

Para el cálculo del número de Grashof se utiliza la ecuación 2.28, teniendo un recipiente de 0,035[m] de longitud y 0,23 [m] de diámetro.

$$Gr_l = \frac{9,81 * 0,003063 * (362 - 291) * 0,035^3}{2,576 * 10^{-5}^2}$$

$$Gr_l = 137703,14$$

Para verificar la relación se utiliza la ecuación 2.27.

$$D \geq \frac{35 * 0,035}{137703,14^{1/4}}$$

$$D \geq 0,06359$$

$$0,23 \geq 0,06359$$

Para el cálculo del número de Rayleigh, se utiliza la ecuación 2.29.

$$Ra_D = \frac{9,81 * 0,003063 * (362 - 291) * 0,035^3}{2,576 * 10^{-5} * \nu^2}$$

$$Ra_D = 96943$$

Utilizamos la ecuación 2.30 para el cálculo del número de nusselt.

$$Nu_D = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * 96943^{1/6}}{[1 + (0,492/0,704)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu_D = 9,14$$

Para el cálculo del coeficiente de radiación se utiliza la ecuación 2.31.

$$h_{conv} = \frac{9,14 * 0,02832}{0,035}$$

$$h_{conv} = 7,4 [W/m^2K]$$

Cálculo del coeficiente de radiación

Se utiliza la ecuación 2.32 para determinar el coeficiente de radiación.

$$h_{rad} = 0,30 * 5,67 * 10^{-8} * (343 + 303,5) * (343^2 + 303,5^2)$$

$$h_{rad} = 2,31 [W/m^2K]$$

Cálculo del coeficiente de convección-radiación (h_{cr})

Se calcula el coeficiente de convección radiación con la ecuación 2.33.

$$h_{cr} = 7,4 + 2,31$$

$$h_{cr} = 9,71 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Cálculo del área de transferencia de calor por convección-radiación (A_{cr})

Se calcula el área de convección-radiación con la ecuación 2.34

$$A_{cr} = 2 * \pi * 0,115 * 0,035$$

$$A_{cr} = 0,025[m^2]$$

A continuación, en la Tabla 3.10, se muestran las propiedades termo físicas del agua, obtenidas en el programa (EES), mismas que se muestran en el Anexo 10.

Tabla 3.10 Propiedades termo físicas del agua

Propiedad	Valor	Unidad
ρ_w	999,3	[Kg/m ³]
cp_w	4,184	[KJ/KgK]
v_w	0,001	[m ³]
T_w	287,2	[K]

Fuente: Propia.

Cálculo del flujo volumétrico del biogás, donde se utiliza un volumen de 1l de agua, un tiempo de calentamiento de 20 min(1200s) y el poder calorífico inferior del biogás que se encuentra en el análisis del biogás (Anexo 3), para lo cual se utiliza la ecuación 2.25.

$$\dot{v}_{biogás} * PCI = \frac{0,001 m^3}{1200s} * \frac{4,184KJ}{KgK} * \frac{999,3Kg}{m^3} * (343 - 287,2)K + 9,71W/m^2K$$

$$* 0,025m^2(343 - 303,5)K$$

$$\dot{v}_{biogás} = \frac{204J/s}{7152,35 kJ/m^3}$$

$$\dot{v}_{biogás} = 2,85 * 10^{-5}[m^3/s]$$

A continuación, se realiza el cálculo del volumen de biogás necesario para el calentamiento de un litro de agua

$$v_{biogás} = 2,85 * 10^{-5}[m^3/s] * 1200s * 1000[l/m^3]$$

$$v_{biogás} = 34,2 [l]$$

Para el cálculo del flujo de biogás se utiliza la ecuación 2.35.

Datos:

$$\rho_{biogás}: 1,26 \frac{Kg}{m^3}, \text{ de acuerdo al Anexo 3}$$

$$\dot{m}_{biogás} = 1,26 \frac{Kg}{m^3} * 2,85 * 10^{-5} m^3/s$$

$$\dot{m}_{biogás} = 3,59 * 10^{-5} [Kg/s]$$

Para el cálculo de la masa de biogás necesario en el calentamiento, se utilizó el tiempo de calentamiento de 1200s

$$m_{biogás} = 3,59 * 10^{-5} Kg/s * 1200s * 1000[g/kg]$$

$$m_{biogás} = 43,08 [g]$$

La siguiente Tabla muestra los resultados de la generación de biogás.

Tabla 3.11 Resultados del biogás consumido y producidos

	Propiedad	Valor	Unidad
Consumido	Gr_1	137703,14	–
	R_{ad}	96943	–
	N_{uD}	9,14	–
	h_{conv}	7,4	[W/m ² K]
	h_{rad}	2,31	[W/m ² K]
	h_{cr}	9,71	[W/m ² K]
	$\dot{V}_{biogás}$	$2,85 * 10^{-5}$	[m ³ /s]
	$V_{biogás}$	34,2l	[l]
	$\dot{m}_{biogás}$	$3,59 * 10^{-5}$	[Kg/s]
	$m_{biogás}$	43,08	[g]
Producido	$\dot{m}_{biogás}$	$3,28 * 10^{-5}$	[Kg/s]
	$m_{biogás}$	39,37	[g]

Fuente: Propia.

Realizando el análisis con la ley de los gases, se obtuvo un valor de $3,28 * 10^{-5}$ Kg/s de flujo de masa y 31,25 l de volumen de biogás producido, por otro lado se realizó el cálculo del biogás consumido por medio del calentamiento de agua, donde se obtuvo un flujo de masa de $3,59 * 10^{-5}$ Kg/s y 34 l de biogás, ya que los valores de flujo de masa y volumen del biogás son semejantes al consumir el biogás disponible y llegar a la presión 0 psi, se considera que la estimación de producción de biogás a través de la presión es correcta.

3.8 Costos del biodigestor

Para la elaboración del biodigestor se presenta a continuación todos los costos, incluyendo materiales, accesorios, mano de obra, herramientas, maquinaria, pruebas de hermeticidad, pruebas de biogás y biomasa.

3.8.1 Costos Directos

En la Tabla 3.12 se detallan todos los materiales y accesorios utilizados para la construcción del biodigestor.

Tabla 3.12 Costos directos de materiales y accesorios.

ítem	Descripción	Unidad Comercial	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
1	Tanque 500 lts	Lts	1	100	100
2	Tapón Hembra Roscado 2"	U	1	2	2
3	Adaptador tanque 2"	U	1	4,49	4,49
4	Adaptador Hembra 2"	U	1	2	2
5	Tubo PVC 2"	U	1	1,5	1,5
6	T 1/2"	U	1	0,5	0,5
7	Neplo Perdido 1/2"	U	6	0,4	2,4
8	Tapón Hembra 1/2"	U	1	0,4	0,4
9	Adaptador Tanque 1/2"	U	3	2,5	7,5
10	Válvula de paso 1/2" Plástico	U	2	1,9	3,8
11	Válvula de paso 1/2" Metal	U	2	3,8	7,6
12	Manguera de gas	m	3	1,8	5,4
13	Terminal Manguera de gas (bronce)	U	5	1,5	7,5
14	Manómetro 3 PSI	U	1	20	20
15	Codo 1/2"	U	1	0,5	0,5
16	Abrazaderas	U	4	0,5	2
17	Bushing Reductor 3/8" a 1/2"	U	3	1,8	5,4
18	Teflón	U	2	0,5	1
19	Pega PVC	U	1	0,9	0,9
20	Masilla Epoxi	U	1	2,3	2,3
21	Juego Sacabocados	U	1	3,8	3,8
22	Spray Negro	U	2	2	4
23	Lustre	U	1	0,5	0,5
24	Tapón Hembra 1/2"	U	2	0,5	1
Total:					186,49

Fuente: Propia.

Se incluyen los costos directos de mano de obra que en este caso son 2 ingenieros para el diseño del biodigestor y 2 personas para la construcción del mismo. Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Costos de Mano de Obra Directa. Fuente: Propia.

Ítem	Personal de trabajo	Cantidad	Horas diarias	Valor (\$/h)	Costo (\$)
1	Ingenieros	2	30	4,25	255
2	Mano de obra	2	4	2,66	21,28
Total:					276,28

Fuente: Propia. (Trabajo, 2022)

En la Tabla 3.14 se presentan los costos de las maquinas utilizadas para la construcción del biodigestor.

Tabla 3.14 Costos de Máquinas y Herramientas. Fuente: Propia.

Ítem	Descripción	Cantidad	Horas diarias	Tarifa (\$)	Costo total (\$)
1	Pistola soplete	1	1	1	1
2	Taladro	1	1	1	1
3	Compresor 115 Psi	1	1	2	2
Total:					4

Fuente: Propia.

3.8.2 Costos Indirectos

Se toma en cuenta en los costos indirectos las pruebas realizadas para la caracterización de residuos y los sensores de temperatura que se utilizaron para tener un monitoreo diario de temperatura del ambiente y el interior del biodigestor. Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Costos Indirectos.

ítem	Descripción	Unidad Comercial	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
1	Sensor Temperatura	U	2	2,25	4,5
2	Análisis de biomasa	U	1	20	20
3	Análisis de Biol	U	1	29,98	29,98
Total:					54,48

Fuente: Propia.

El costo total del biodigestor se calcula sumando los costos directos e indirectos, como se detalla en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Costo total.

Descripción	Subtotal (\$)
Costos directos de materiales y accesorios	186,49
Costos de Mano de Obra Directa	276,28
Costos de Máquinas y Herramientas	4
Costos Indirectos	54,48
Total:	521,25

Fuente: Propia.

Es importante destacar que en el costo total de este prototipo se encuentran incluidas pruebas necesarias para el análisis de las muestras, lo que permitió mostrar el funcionamiento del biodigestor, por tanto, los costos por los materiales utilizados directamente en la construcción del biodigestor y su puesta en marcha fueron de \$186,49. Cabe recalcar que, si se producen biodigestores domésticos en mayor cantidad, el valor para la producción de cada biodigestor se reduciría, debido a que el costo en materiales es menor si se los adquiere al por mayor.

4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se cumplió con el objetivo principal del proyecto al diseñar y construir un biodigestor domestico a partir de residuos orgánicos, el cual de acuerdo al protocolo de pruebas cumple los parámetros necesarios para la producción de biol y biogás, ayudando de esta manera a la reducción de la contaminación ambiental mediante el uso de energías renovables.
- El biogás producido tiene una concentración de 21,11% de metano, el cual fue menor al valor esperado de manera teórica de 60 %, debido al tipo de biomasa utilizada y a la presencia de otro tipo de gases en altas concentraciones como el oxígeno y el nitrógeno, responsables del poder calorífico del biogás, obteniéndose un poder calorífico inferior de 7152,35 [KJ/m³], el cual es menor al valor obtenido en otro tipo de biodigestores, donde se tiene un valor de 21500[KJ/m³].
- El biol del caso de estudio mejora la calidad y producción de las cosechas gracias a su alta concentración en macronutrientes, con un 2 % de N, 1% de P, y un 3% de K mismo que es mayor al valor esperado de 2%, lo que brinda a los cultivos una mayor resistencia a las sequias y a las heladas.
- Con la biomasa del caso de estudio que tiene una relación C/N de 13, 86, se pudo notar que el biogás producido tubo un menor poder calorífico que el esperado, por otro lado, esta misma biomasa permitió obtener un biol de alta calidad, lo que plantea la posibilidad de aprovechar este tipo de biodigestores domésticos en la producción y comercialización de biol para cultivos orgánicos y huertas urbanas.
- El costo total del biodigestor es de \$466,77, presentando un valor 6 veces menor al de los biodigestores domésticos comercializados en el país, los cuales alcanzan un valor de al redor de \$3000 debido a la importación de los mismos desde el extranjero.

4.2 Recomendaciones

- Para mejorar la relación C/N se debe mezclar la biomasa del caso de estudio con elementos de alto contenido de carbono y bajo contenido de nitrógeno como las hojas secas, rastrojos de maíz y paja de trigo o cebada.
- Con el fin de disminuir el impacto ambiental se recomienda la implementación del biodigestor domestico a mayor escala, donde se tenga una mayor disponibilidad de biomasa, como escuelas, condóminos y empresas eco amigables, en las cuales se puedan usar los desechos orgánicos para producir energía y abono para huertos urbanos.

- Debido a que la temperatura es un factor crítico dentro de la producción de biogás se recomienda realizar este estudio en lugares donde se disponga de altas temperaturas que puedan ayudar a disminuir el tiempo de retención en el biodigestor.
- Se recomienda realizar un estudio de co-digestión anaeróbica de la biomasa, el cual consiste en la combinación de varias mezclas de sustratos orgánicos para mejorar las características físico-químicas y el balance de nutrientes del mismo, consiguiendo una mejor estabilización del sistema que a su vez permita una mayor producción de biogás.

5 Bibliografía

- Arrieta, W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado . Perú: Universidad de Piura .
- Cengel Y., B. (2012). Termodinámica. págs. 78-79.
- Costales, V. (24 de 06 de 2020). EMGIRS. Obtenido de EMGIRS: <https://www.elcomercio.com/actualidad/emgirs-emergencia-relleno-sanitario-inga.html>
- Cusi, J. (2018). Diseño, construcción de un sistema de producción de energía eléctrica para la generación de 800W a través del uso de Biogás, para una pequeña granja y análisis energético del sistema. Quito.
- Ecoinventos. (24 de Marzo de 2021). Ecoinventos Green Technology. Obtenido de <https://ecoinventos.com/biodigestor-casero/>
- EMGIRS. (Octubre de 2013). EMGIRS. Obtenido de <https://www.emgirs.gob.ec/index.php/zenkit/visitas-al-relleno-sanitario-2>
- Espinosa, G. C. (2016). Demanda de las cocinas de inducción aplicado a la parroquia rural del valle, cantón Cuenca, análisis comparativo 2014-2015. Cuenca.
- Europea, U. (2018). DIRECTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Ferrer , I., Uggetti, E., Poggio, D., & Velo, E. (2015). Producción de biogás a partir de residuos orgánicos en biodigestores a bajo coste.
- Gasco. (30 de 6 de 2013). Gasco Magallanes. Obtenido de <https://www.gascomagallanes.cl/gas-licuado/>
- Gomez, S. (2012). Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular Carazo-Nicaragua. Leganés: Departamento de CC e Ing. Materiales e Ing. Química.
- GOOGLE MAPS. (01 de 12 de 2021). Obtenido de GOOGLE MAPS: <https://www.google.com/maps/place/Colegio+%22Don+Bosco%22+la+tola/@-0.2239946,->

78.5076047,828m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x91d59989734df873:0x94ff8e0979e83613!4b1!8m2!3d-0.22298!4d-78.5048494

- Haro, H. (2017). Diseño de un biodigestor para el tratamiento de los desperdicios orgánicos generados en la facultad de hospitalidad y servicios de la universidad tecnológica Equinoccial. . Quito: Universidad tecnológica Equinoccial.
- Haugen, F. (2012). Mathematical modelling for planning optimal operation of a biogas reactor for dairy manure. World Congress on Water, Climate and Energy, (pág. 2). Dublin.
- INEC. (03 de 05 de 2018). INEC. Obtenido de INEC: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/segun-la-ultima-estadistica-de-informacion-ambiental-cada-ecuatoriano-produce-058-kilogramos-de-residuos-solidos-al-dia/>
- Jaramillo, E. (2011). Propuesta de diseño de un biodigestor casero. México : Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas .
- Laboratorio de Análisis Instrumental EPN, F. d. (2022). INFORME No. I-LAI-022-61-01. Escuela Politécnica Nacional.
- López, G. (2017). Diseño y construcción de un biodigestor para la producción de biogás a partir de heces caninas . Bogotá: Universidad distrital Francisco José de Caldas.
- Miogas. (2022). Miogas. Obtenido de <https://www.miogas.es/>
- Miogas. (2022). Miogas . Obtenido de <https://www.miogas.es/>
- Morán, S. (23 de 06 de 2020). Plan V. Obtenido de Plan V: <https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/ecuador-ahogado-basura-esta-lejos-cumplir-metas-ods-al-2030>
- Olaya, Y. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores . Cali, Palmira .
- Pizano, R. (6 de Agosto de 2018). ProyectoFSE. Obtenido de <http://www.proyectorfse.mx/2018/08/06/como-funciona-un-biodigestor/>
- Redagrícola. (Marzo de 2017). Lo básico para entender el biogás. Obtenido de <https://www.redagricola.com/cl/lo-basico-entender-biogas/>
- Renovables, C. d. (2008). Energías Renovables . Argentina : Secretaría de Energía.
- Romero, S. (28 de 11 de 2020). INEC. Obtenido de INEC: <https://www.celec.gob.ec/bitacoralegal/index.php/component/k2/item/671-inec-el-ingreso-de-la-familia-tipica-en-ecuador-es-usd-700-mensuales-en-promedio.html>
- Salcedo, A. (2016). Guía para la gestión de bioresiduos . Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Sánchez, J. C. (30 de 08 de 2019). Araldoa. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2413-32992019000300021&script=sci_arttext#:~:text=Seg%C3%BAAn%20

The weather Company. (1 de 12 de 2021). Obtenido de The weather Company:
[https://weather.com/es-
EC/tiempo/mensual//f0d4a8e387e7d00d987ebfbe45b0a1b6f8b4814a376b0c0445
dd8db558ece245](https://weather.com/es-EC/tiempo/mensual//f0d4a8e387e7d00d987ebfbe45b0a1b6f8b4814a376b0c0445dd8db558ece245)

Trabajo, M. d. (2022). ESTRUCTURAS OCUPACIONALES – SUELDOS Y SALARIOS MÍNIMOS SECTORIALES Y TARIFAS. Quito.

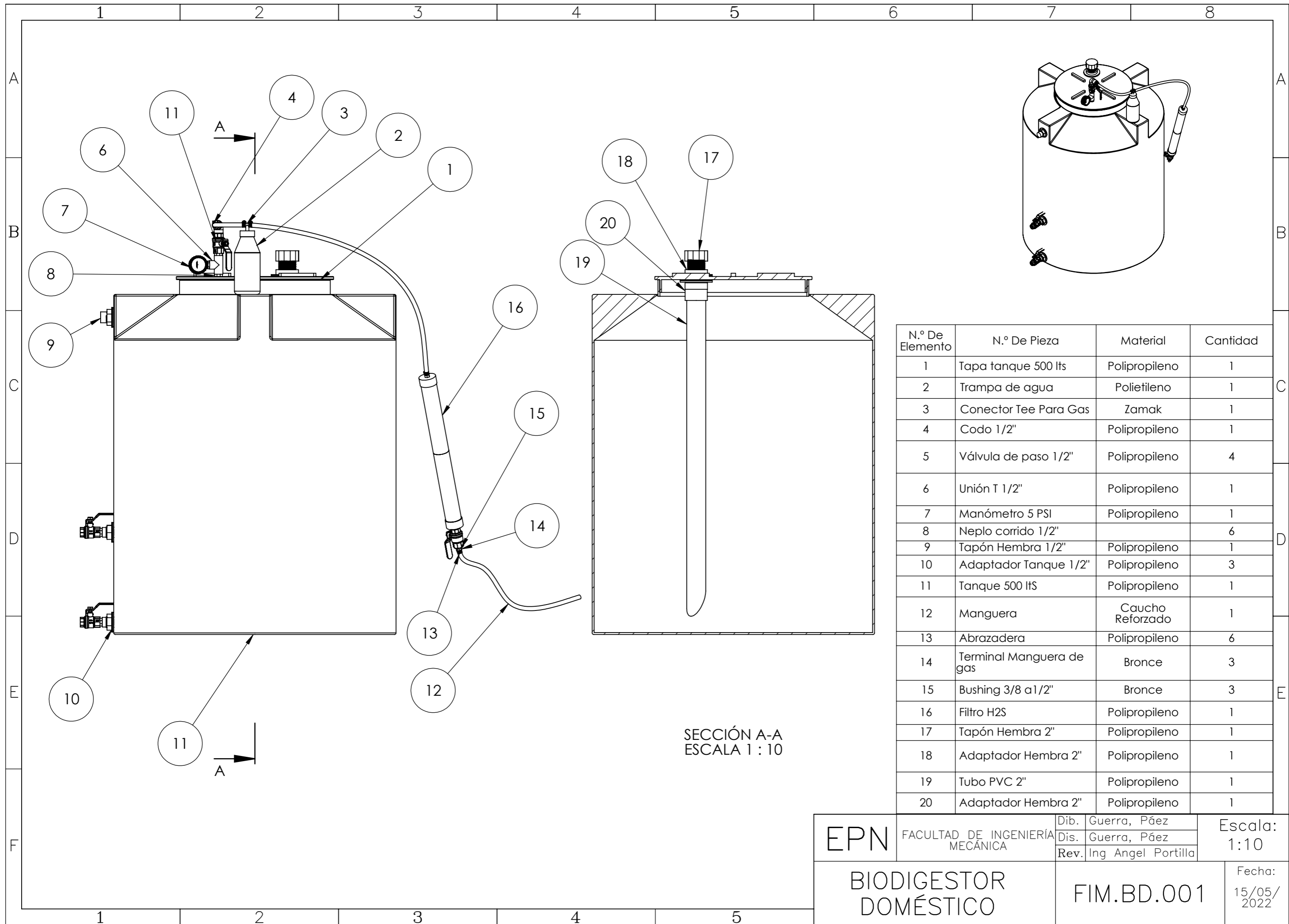
Varnero, M. (2011). Manual de Biogas. Santiago de Chile.

Villalobos, F. I. (2014). Efecto de las heces caninas sobre la producción de biogás. Santiago de Chile.

Yunes A Cengel, M. A. (2012). Termodinámica. México : Séptima edición .

6 Anexos

Anexo 1. Planos de Conjunto, Ensamble y Taller



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 10

N.º De Elemento	N.º De Pieza	Material	Cantidad
1	Tapa tanque 500 lts	Polipropileno	1
2	Trampa de agua	Poliétileno	1
3	Conector Tee Para Gas	Zamak	1
4	Codo 1/2"	Polipropileno	1
5	Válvula de paso 1/2"	Polipropileno	4
6	Unión T 1/2"	Polipropileno	1
7	Manómetro 5 PSI	Polipropileno	1
8	Neplo corrido 1/2"		6
9	Tapón Hembra 1/2"	Polipropileno	1
10	Adaptador Tanque 1/2"	Polipropileno	3
11	Tanque 500 lts	Polipropileno	1
12	Manguera	Caucho Reforzado	1
13	Abrazadera	Polipropileno	6
14	Terminal Manguera de gas	Bronce	3
15	Bushing 3/8 a 1/2"	Bronce	3
16	Filtro H2S	Polipropileno	1
17	Tapón Hembra 2"	Polipropileno	1
18	Adaptador Hembra 2"	Polipropileno	1
19	Tubo PVC 2"	Polipropileno	1
20	Adaptador Hembra 2"	Polipropileno	1

EPN

FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA

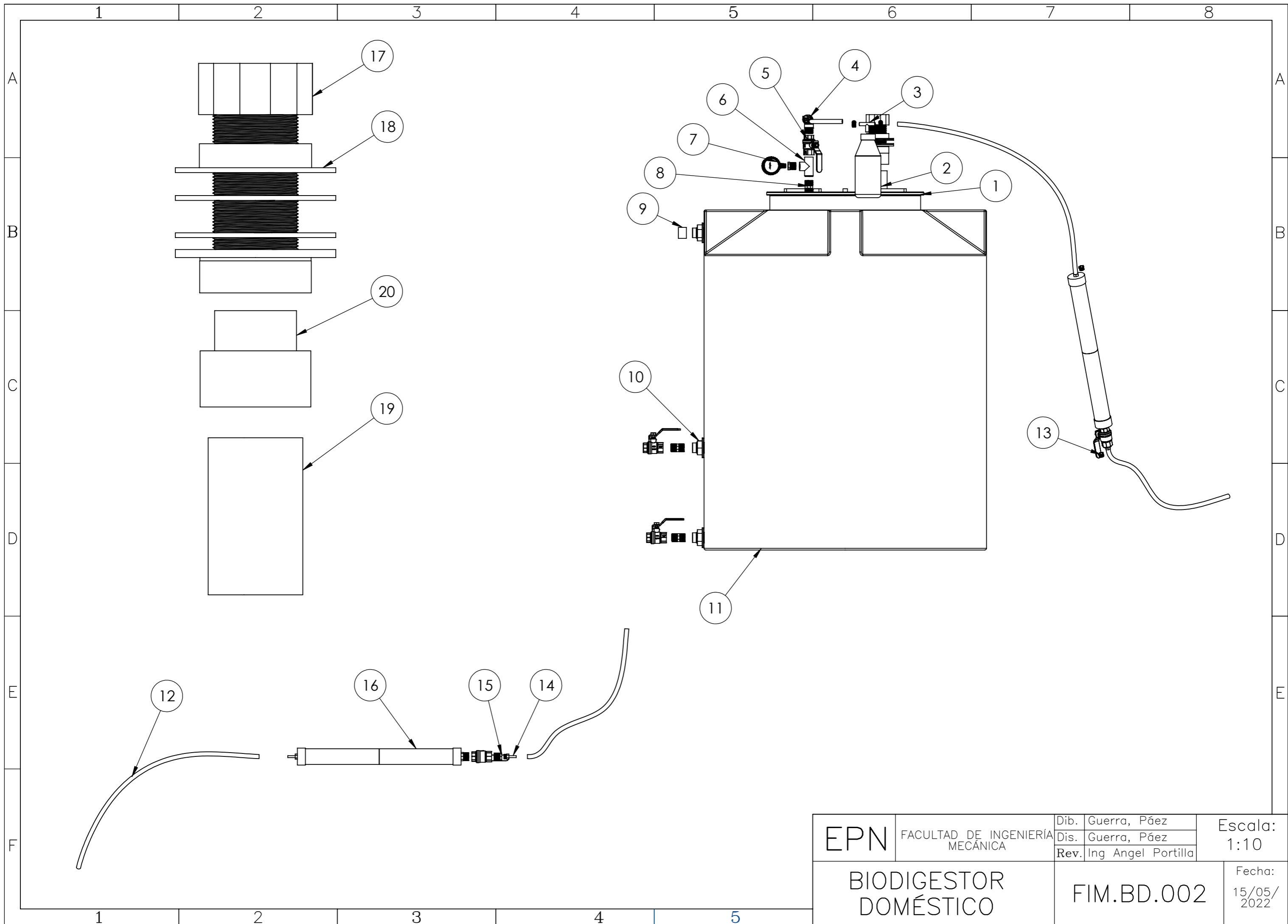
Dib. Guerra, Páez
Dis. Guerra, Páez
Rev. Ing Angel Portilla

Escala:
1:10

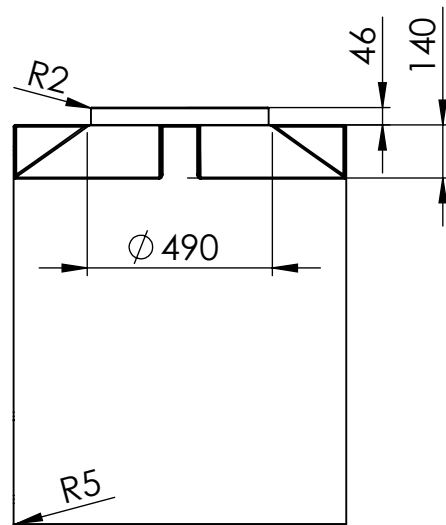
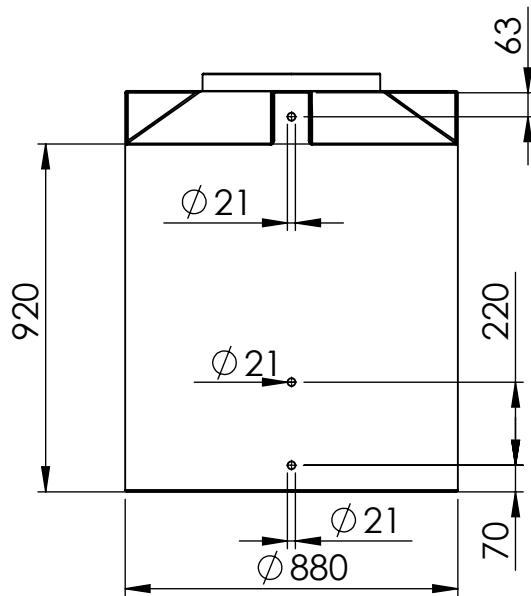
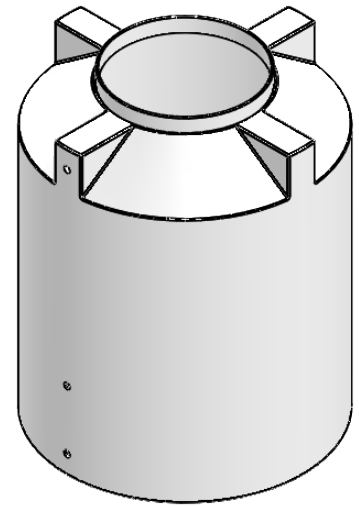
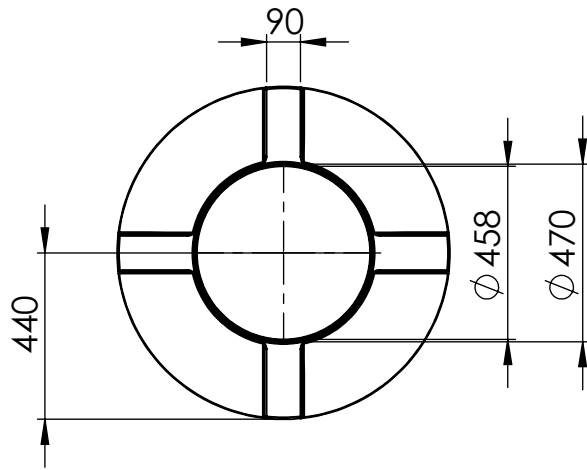
BIODIGESTOR
DOMÉSTICO

FIM.BD.001

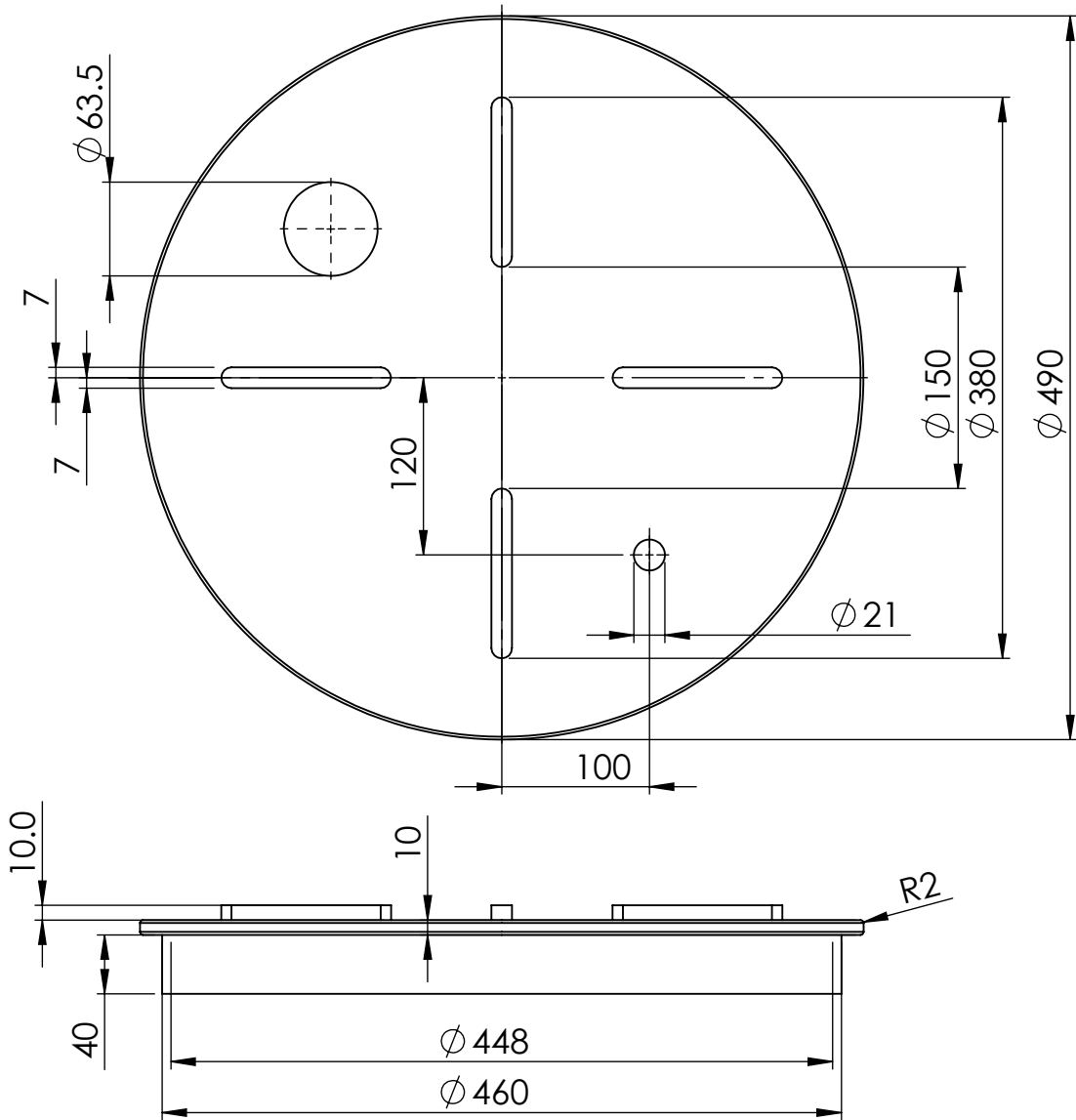
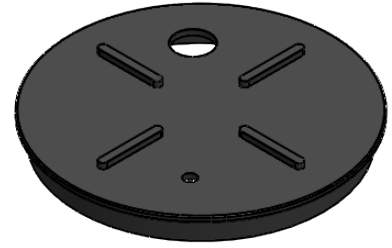
Fecha:
15/05/
2022



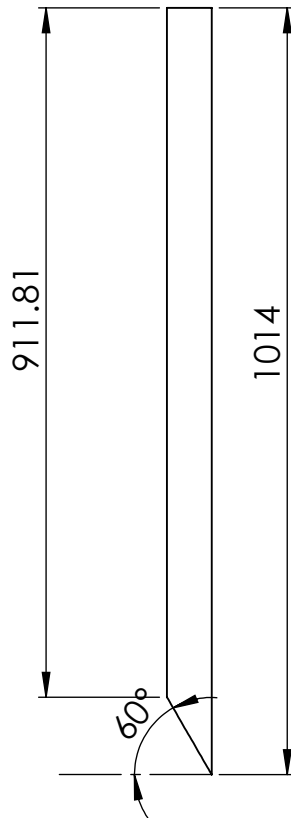
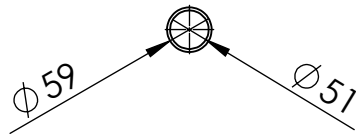
EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	Dib. Guerra, Páez	Escala: 1:10
		Dis. Guerra, Páez	
		Rev. Ing Angel Portilla	
BIODIGESTOR DOMÉSTICO		FIM.BD.002	Fecha: 15/05/ 2022



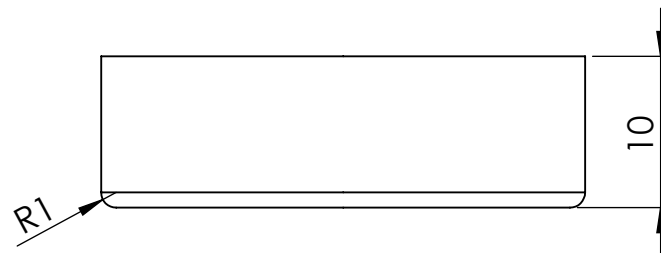
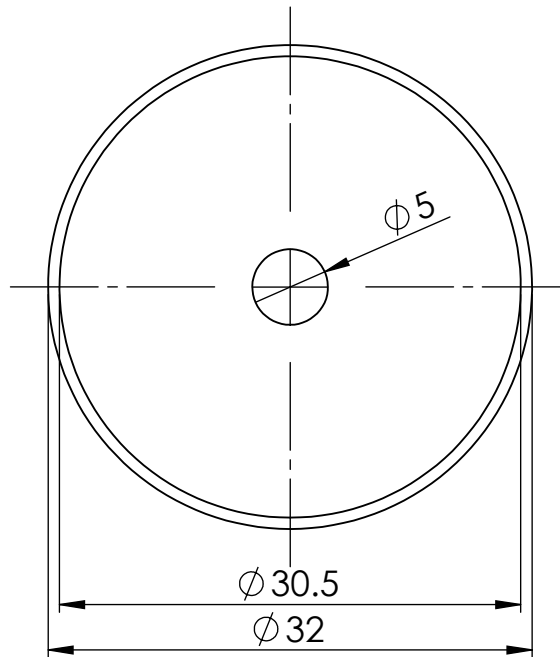
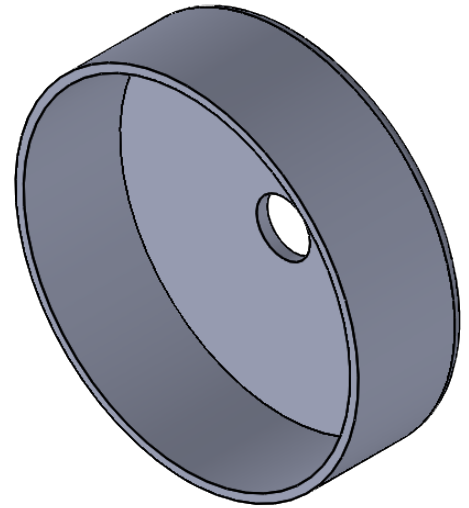
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno			
Material	Poliuretano	Tol. Gral. ±0,5	Escala: 1:20	Dib. Guerra, Páez
				Dis. Guerra, Páez
				Rev. Ing Angel Portilla
TANQUE			FIM.BD.101	Fecha: 11/05/21



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Guerra, Páez
Material Poliuretano	Tol. Gral. $\pm 0,5$	Escala: 1:5	Dis.	Guerra, Páez
			Rev.	Ing Angel Portilla
			Fecha: 11/05/22	
TAPA TANQUE		FIM.BD.102		



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Guerra, Páez	
Material	PVC	Tol. Gral.	Escala:	Dis.	Guerra, Páez
		$\pm 0,5$	1:10	Rev.	Ing Angel Portilla
TUBO DE CARGA		FIM.BD.103			Fecha:
					12/05/22



Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Guerra, Páez
Material	Polietileno	Tol. Gral. ± 0,5	Escala: 2:1	Dis. Guerra, Páez
				Rev. Angel Portilla
TAPA DE LA TRAMPA DE AGUA			FIM.BD.105	
			Fecha: 12/05/22	

Anexo 2. Reporte de caracterización de Biomasa

MC-LASPA-2201-01

	ESTACION EXPERIMENTAL SANTA CATALINA LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS PLANTAS Y AGUAS Panamericana Sur Km. 1. S/N Cutuglagua. Tífs. (02) 3007284 / (02)2504240 Mail: laboratorio.dsa@iniap.gob.ec	
---	--	---

INFORME DE ENSAYO No: 22-0446

NOMBRE DEL CLIENTE: Israel David Páez Malquín
PETICIONARIO: Israel David Páez Malquín
EMPRESA/INSTITUCIÓN: Israel David Páez Malquín
DIRECCIÓN: Rumíñahui / Pichincha

FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:
HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA:
FECHA DE ANÁLISIS:
FECHA DE EMISIÓN:
ANÁLISIS SOLICITADO:

21/07/2022
 9:40
 25/07/2022
 29/07/2022
 NT.-MO.

N° muestra	N	P*	K*	Ca*	Mg*	S*	B*	Zn*	Cu*	Fe*	Mn*	Na*	Cl*	NO ₃ -	CE*	Humedad*	Materia orgánica	Carbono orgánico	pH*	C/N	Identificación de la muestra
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	ppm	ms/cm	(%)	(%)	(%)			
22-1608	0,17																4,06	2,36		13,86	Israel Páez

OBSERVACIONES: Muestra entregada por el cliente



Firma electrónicamente por:
IVAN RODRIGO SAMANIEGO MAIGUA

LABORATORISTA



Firma electrónicamente por:
JOSE ALONSO LUCERO MALATAY

RESPONSABLE DEL LABORATORIO

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
 Los resultados arriba indicados solo están relacionados con el objeto de ensayo

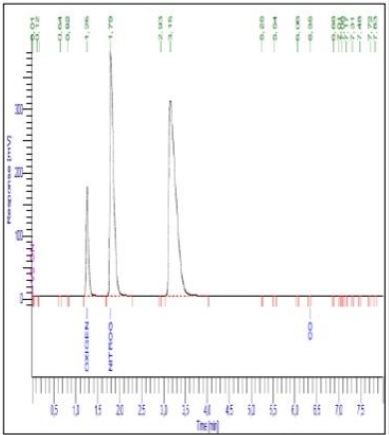
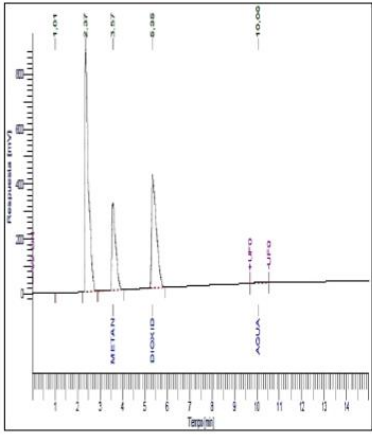
NOTA DE DESCARGO. La información contenida en este informe de ensayo es de carácter confidencial, está dirigida únicamente al destinatario de la misma y solo podrá ser usada por este. Si el lector de este correo electrónico o fax no es el destinatario del mismo, se le notifica que cualquier copia o distribución de esto se encuentra totalmente prohibido. Si usted ha recibido este informe de ensayo por error, por favor notifique inmediatamente al remitente por este mismo medio y elimine la información.

Anexo 3. Reporte de caracterización de Biogás

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	2 de 2	
		FPT-7.8-03-04		

INFORME No. I-LAI-022-61-01

Orden de Trabajo No. DQ-OTI0010-2022

INFORMACION CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Ing. Ángel Portilla, MSc.		Persona de contacto:	David Páez; Skarlet Guerra
Dirección / Telf.:	Calle los Ríos y Concepción No. 327 / 995441376		E-mail:	skarlet.guerra@epn.edu.ec
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-LAI-022-61-02		Fecha de muestreo:	25/8/2022
Tipo de muestra:	Biogas / Muestra 2		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tedarlar		Fecha inicio del ensayo:	29/8/2022
Fecha de recepción:	25/8/2022		Fecha entrega informe:	5/9/2022
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	19,5 °C	32,7 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía ASTM D 3588: Cálculos
Temperatura y Presión de muestra:	65,0 °F	14,7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01
	18,3 °C	101353,0 Pa		PE-7.2-02
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Oxígeno		13,41	0,14
	Nitrógeno		40,88	0,42
	Metano		21,11	0,26
	Dióxido de carbono		24,07	0,38
	Etano		<0,001	N/A
Agua		0,54	0,04	
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,04	
	Peso molecular promedio [g/mol]		29,91	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,26	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		7953,70	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		7152,35	
Factor de compresibilidad (z)		1,0000		
CROMATOGRAMA		MUESTRA		
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)		Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente.			
	Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI.			
	Los resultados reportados corresponden únicamente a los items ensayados.			
	El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución.			
OBSERVACIONES	El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió.			
	El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados			
	Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo.				
Elaborado por:		Revisado y aprobado por:		
GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCHA <small>Analista de Laboratorio</small>		ANDRES GABRIEL CHICO PROANO <small>Coordinador del Laboratorio</small>		
Ing. Gabriela Pérez ANALISTAS DE LABORATORIO		Ing. Andrés Chico, MSc. COORDINADOR DEL LABORATORIO		



Dirección: Quito | Ladrón de Guevara E11-253 | Edificio Nro. 17 | 5to. Piso
 Correo: a.instrumental@epn.edu.ec | Teléfonos: 022976300 ext. 4334 | 4332

Anexo 4. Reporte de caracterización de Biol.

MC-LASPA-2201-01

	ESTACION EXPERIMENTAL SANTA CATALINA LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS PLANTAS Y AGUAS Panamericana Sur Km. 1. S/N Cutuglagua. Tls. (02) 3007284 / (02)2504240 Mail: laboratorio.dsa@iniap.gob.ec	
---	---	---

INFORME DE ENSAYO No. 22-0512

NOMBRE DEL CLIENTE: Israel David Páez Maquin
 PETICIONARIO: Israel David Páez Maquin
 EMPRESA/INSTITUCIÓN: Israel David Páez Maquin
 DIRECCIÓN: Rumifahui

FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 26/08/2022
 HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 8:12
 FECHA DE ANÁLISIS: 29/08/2022
 FECHA DE EMISIÓN: 02/09/2022
 ANÁLISIS SOLICITADO: Abono 1 + pH + Na

N° muestra	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S* (%)	B* (ppm)	Zn* (ppm)	Cu* (ppm)	Fe* (ppm)	Mn* (ppm)	Na (ppm)	Cl* (ppm)	NO ₃ ppm	CE* ms/cm	Humedad* (%)	Materia orgánica* (%)	Carbono orgánico* (%)	pH	C/N*	Identificación de la muestra
22-1975	0.02	0.01	0.03	0.05	0.05							213									Muestra 1

OBSERVACIONES: Muestra entregada por el cliente

LABORATORISTA

RESPONSABLE DEL LABORATORIO

Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
 Los resultados arriba indicados solo están relacionados con el objeto de ensayo

NOTA DE DESCARGO: La información contenida en este informe de ensayo es de carácter confidencial, está dirigido únicamente al destinatario de la misma y solo podrá ser usada por este. Si el lector de este correo electrónico o fax no es el destinatario del mismo, se le notifica que cualquier copia o distribución de este se encuentra totalmente prohibido. Si usted ha recibido este informe de ensayo por error, por favor notifique inmediatamente al remitente por este mismo medio y elimine la información.

Anexo 5. Especificaciones del Tanque tipo botella de polietileno

En **PLÁSTICOS RIVAL** estamos siempre preocupados por la salud de las personas,

Nuestra línea de **TANQUES PARA RESERVA** de alta durabilidad, están desarrollados con los más altos estándares internacionales para el almacenamiento y preservación del agua, ya que cuentan con un recubrimiento interior antibacterial.



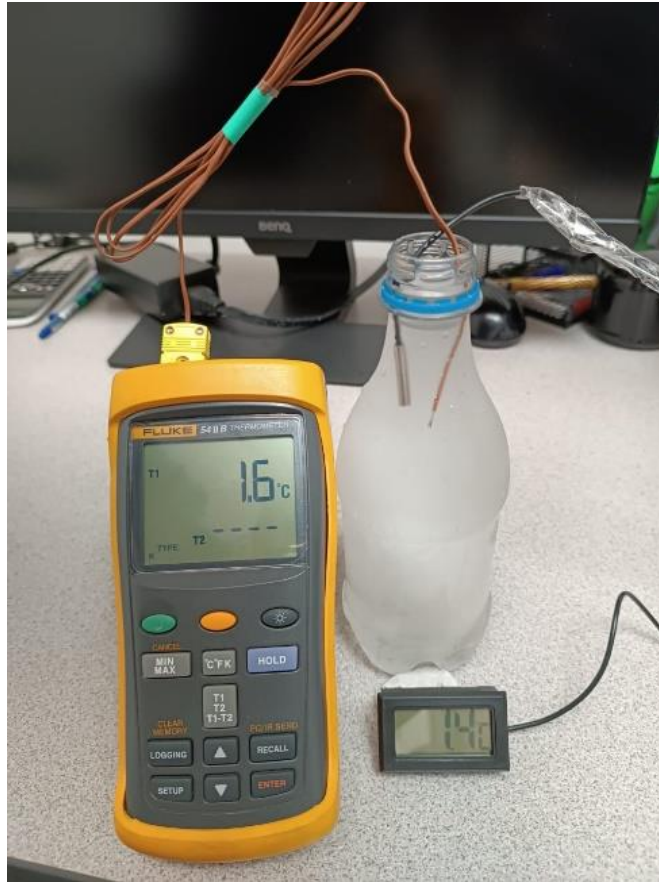
TANQUE BOTELLA 250

CAPACIDAD: 250 L
 DIÁMETRO: 700 mm
 ALTURA: 850 mm
 DIÁMETRO TAPA: 490 mm

TANQUE BOTELLA 500

CAPACIDAD: 500 L
 DIÁMETRO: 880 mm
 ALTURA: 1.100 mm
 DIÁMETRO TAPA: 490 mm

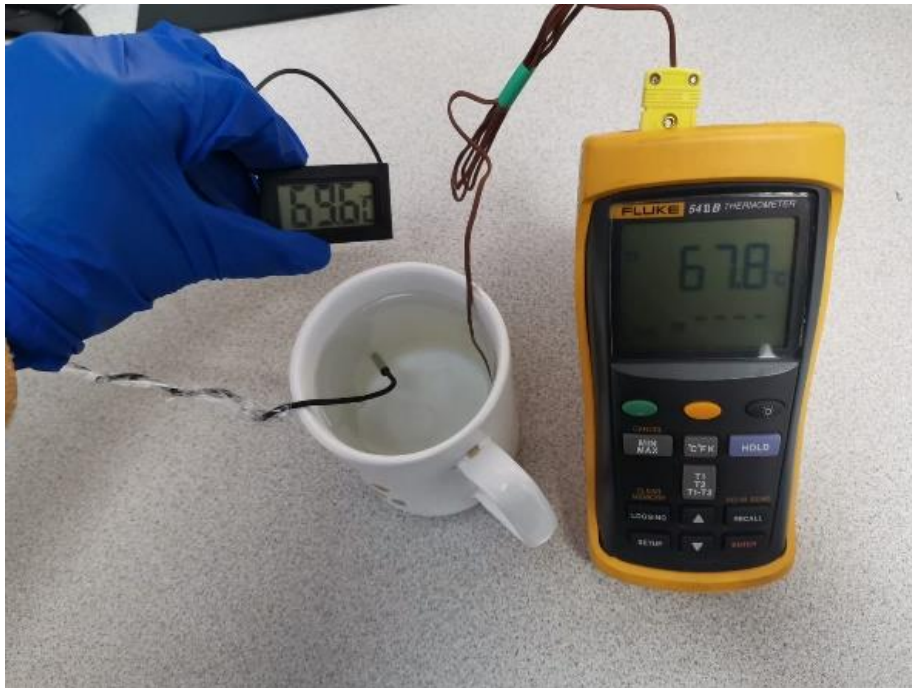
Anexo 6. Verificación de la sonda en agua helada.



Anexo 7. Verificación de la sonda en agua a temperatura ambiente



Anexo 8. Verificación de la sonda en agua caliente.



Anexo 9. Propiedades termo físicas del aire.

"Properties of Air"

$T[1]=326.5[K]$

$P[1]=72[KPa]$

$\rho[1]=\text{Density}(\text{Air_ha}, T=T[1], P=P[1])$

$k[1]=\text{Conductivity}(\text{Air_ha}, T=T[1], P=P[1])$

$\nu[1]=\text{KinematicViscosity}(\text{Air_ha}, T=T[1], P=P[1])$

$\alpha[1]=\text{ThermalDiffusivity}(\text{Air_ha}, T=T[1], P=P[1])$

$Pr[1]=\text{Prandtl}(\text{Air_ha}, T=T[1], P=P[1])$

$Betha[1]=1/(T[1])$

Arrays Table								
Main								
Sort	1	2	3	4	5	6	7	8
	P_i	ρ_i	T_i	$Betha_i$	Pr_i	α_i	k_i	ν_i
	[kPa]		[K]					
[1]	72	0.7681	326.5	0.003063	0.704	0.00003659	0.02832	0.00002576

Anexo 10. Propiedades del agua

"Properties of Water"

$T[1]=287.2[\text{K}]$

$P[1]=72[\text{kPa}]$

$\rho[1]=\text{Density}(\text{Water}, T=T[1], P=P[1])$

$c_p[1]=\text{Cp}(\text{Water}, T=T[1], P=P[1])$

	1	2	3	4
Sort	cp _i	P _i [kPa]	ρ _i	T _i [K]
[1]	4.184	72	999.3	287.2