



Desarrollo de un sistema de monitoreo de temperatura, radiación solar, iluminancia, calidad de biogás, afluente y efluente como apoyo en la mejora del rendimiento en el proceso del biodigestor alimentado con estiércol equino bajo condiciones psicrófilas en la Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá

**Carlos Andres Gonzalez Ospina
Laura Sofía Mecón Rodríguez**

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa de Bioingeniería
Bogotá, Colombia
2023

Desarrollo de un sistema de monitoreo de temperatura, radiación solar, iluminancia, calidad de biogás, afluente y efluente como apoyo en la mejora del rendimiento en el proceso del biodigestor alimentado con estiércol equino bajo condiciones psicrófilas en la Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá

**Carlos Andres Gonzalez Ospina
Laura Sofía Mecón Rodríguez**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Bioingeniero

Director(a): Yudtanduly Acuña Monsalve
Co Director: Juan José Carrillo

Modalidad:
Investigación

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a Dios, fuente de fortaleza en mi vida. A mis padres, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido la base de mi éxito. Su ejemplo de responsabilidad, disciplina y dedicación ha forjado la persona que soy hoy. A través de sus valores, me han inspirado a esforzarme constantemente y a superar obstáculos. A mi hermano, mi fuente de inspiración y motivación. Quien me impulsa a ser una mejor ingeniera y a recordarme a mí misma que soy capaz de lograr todo lo que me proponga.

Laura Mecón

Con gratitud en el corazón, dedico este trabajo de grado al Todopoderoso, quien nos ha otorgado la sabiduría y la guía necesarias para llevar a cabo este proyecto con éxito. A mi amada familia, en especial a mi querida mamá, quiero expresar mi más profundo agradecimiento. Su amor incondicional y apoyo constante han sido el cimiento sobre el cual he construido mis logros. Y a mis tías, quienes desde el primer día confiaron en mí y en mis capacidades, les dedico este trabajo con cariño y gratitud.

Andrés González

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos los que han hecho posible el éxito de nuestro proyecto, y en particular, nos gustaría reconocer a la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá por su apoyo fundamental en el desarrollo de iniciativas que tienen un impacto significativo en el bienestar y la preservación del medio ambiente. Además, agradecemos profundamente el acceso que nos brindaron a sus instalaciones, lo que fue esencial para llevar a cabo nuestro proyecto.

Queremos extender nuestro agradecimiento a nuestros tutores quienes han sido un apoyo fundamental en el éxito de este proyecto. En primer lugar, a la docente Yuditanduly Acuña por su dedicación incansable durante la realización de nuestro proyecto, no solo respondió a todas nuestras dudas, sino que también nos guió con sabiduría, alentándonos a sumergirnos en el mundo de la investigación. Asimismo, deseamos expresar nuestra gratitud al docente Juan José Carrillo, quien ha sido un pilar en el área de la electrónica, proporcionando el apoyo técnico esencial para el desarrollo de nuestro proyecto.

Nuestro viaje en este proyecto ha sido un desafío, y estamos agradecidos por el trabajo conjunto que hemos realizado a lo largo de estos dos años. Hemos avanzado paso a paso, compartiendo las cargas y alentándonos mutuamente a superar obstáculos, lo que ha llevado a la obtención de grandes resultados. Estamos orgullosos de lo que hemos logrado juntos y agradecemos a todos por su inestimable apoyo y confianza en nuestro trabajo.

Resumen

Los digestores tubulares de bajo costo son sistemas empleados para generar biogás y fertilizantes por medio de la transformación de desechos orgánicos a través de la digestión anaeróbica [Jaimes-Estévez et al., 2020]. El rendimiento y la calidad de los productos generados dependen de factores como la temperatura, el sustrato orgánico usado para cargar el digestor y los parámetros operativos en los que trabaja este mismo [Caldera et al., 2003].

En climas fríos, la digestión anaerobia se da bajo condiciones psicrófilas haciendo que el rendimiento en la generación de biogás se vea reducida [Gerday et al., 2007]. Por ende, se busca modificar los parámetros de operación del digestor para que la producción del biogás sea eficiente y energéticamente aprovechable [Caldera et al., 2003]

En este trabajo de investigación se estudió un biodigestor tubular de bajo costo en la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá cuya producción de biogás lograba recuperar solo el 2.5% de energía para actividades de cocción. Por lo tanto, se monitoreó durante 90 días la temperatura, radiación solar, iluminancia, calidad del biogás, afluente y efluente con el objetivo mejorar la eficiencia y el rendimiento del biodigestor luego de aplicar modificaciones en la carga orgánica (CO) y el tiempo de retención hidráulica (TRH).

Como resultado de estas modificaciones, se obtuvo una producción diaria de biogás de $0.270 \text{ Nm}^3/\text{d}$, una producción específica de biogás de $0.108 \text{ Nm}^3/\text{kgSVd}$ y una producción específica de metano de $0,065 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kgSV}$. Además, se logró una reducción del 95% en sólidos volátiles. Estas mejoras en el rendimiento de la producción de biogás condujeron a una recuperación de energía del 4.2%. En cuanto a la temperatura del digestor, esta se mantuvo estable, con un promedio de $18.53 \text{ }^\circ\text{C}$, aproximadamente.

Palabras clave: biodigestor, monitoreo, comportamiento térmico, calidad del biogás, digestión anaerobia

Abstract

Low-cost tubular digesters are systems used to generate biogas and fertilizers through the transformation of organic waste by anaerobic digestion [Jaimes-Estévez et al., 2020]. The performance and quality of the generated products depend on factors such as temperature, the organic substrate used to load the digester, and the operational parameters in which it operates [Caldera et al., 2003].

In cold climates, anaerobic digestion occurs under psychrophilic conditions, which reduces the efficiency of biogas generation [Gerday et al., 2007]. Therefore, there is an effort to modify the digester's operational parameters to make biogas production efficient and energetically viable [Caldera et al., 2003].

This research project focused on a low-cost tubular biodigester located at the Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte of Bogotá. Initially, this biodigester was only able to recover 2.5 % of the energy for cooking activities. Consequently, temperature, solar radiation, illuminance, biogas quality, influent, and effluent were monitored for 90 days with the aim of improving the efficiency and performance of the biodigester after making adjustments to the organic load (OL) and the hydraulic retention time (HRT).

As a result of these modifications, a daily biogas production of $0.270 \text{ Nm}^3/d$ was achieved, with a specific biogas production of $0.108 \text{ Nm}^3/kgSVd$ and a specific methane production of $0.065 \text{ m}^3CH_4/kgSV$. Furthermore, an impressive 95 % reduction in volatile solids was accomplished. These improvements in biogas production efficiency led to an energy recovery of 4.2 %. Regarding the temperature of the digester, it remained stable, with an average of $18.53 \text{ }^\circ\text{C}$, approximately.

Keywords: biodigester, monitoring, thermal behavior, biogas quality, anaerobic digestion

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de tablas	XIII
Lista de figuras	XIV
Lista de ecuaciones	XV
Lista de símbolos	XVII
Introducción	1
1 Planteamiento del problema y justificación	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	4
2 Objetivos	6
2.1 Objetivo General	6
2.2 Objetivos Específicos	6
3 Marco Referencial	7
3.1 Marco Geográfico	7
3.2 Marco teórico	8
3.2.1 Biodigestores	8
3.2.2 Digestión Anaerobia	10
3.2.3 Factores determinantes en el proceso de la digestión anaerobia	11
3.2.4 Productos de la digestión anaerobia	13
3.2.5 Caracterización fisicoquímica en afluente y efluente	14
3.2.6 Evaluación del rendimiento de un digestor.	14
3.2.7 Sensórica	15

3.2.8	Radiación solar y el modelo de Duffie y Beckman.	16
3.2.9	Modelo térmico matemático	19
3.3	Marco Técnico y Legal	22
4	Estado del arte	24
5	Requerimientos	26
5.1	Requerimientos Funcionales	26
5.2	Requerimientos de Calidad	27
5.3	Requerimientos de Operación	27
6	Metodología	29
6.1	Rediseño e implementación del sistema de monitoreo de variables térmicas.	29
6.2	Monitoreo de las condiciones iniciales de la calidad del biogás, afluente y efluente mediante la aplicación de metodologías estándar.	30
6.3	Determinación del comportamiento térmico del digestor por medio del modelo matemático.	32
6.4	Evaluación del rendimiento de la producción de biogás y la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación.	33
7	Resultados y Discusión	34
7.1	Rediseño e implementación del sistema de monitoreo de variables térmicas.	34
7.2	Monitoreo de las condiciones iniciales de la calidad del biogás, afluente y efluente mediante la aplicación de metodologías estándar.	50
7.3	Determinación del comportamiento térmico del digestor por medio del modelo matemático.	51
7.3.1	Desarrollo del modelo de transferencia de calor.	51
7.4	Evaluación del rendimiento de la producción de biogás, la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación.	64
8	Conclusiones	70
9	Recomendaciones	71
	Bibliografía	72
A	Anexo: Matrices QFD	76

B Anexo: Resultados encuestas diseños evaluados para el desarrollo del dashboard.	80
C Anexo: Certificado de participación congreso investigativo.	82
D Anexo: Guía de instalación y uso de los sensores de temperatura e iluminancia para el sistema de monitoreo.	84

Lista de Tablas

3-1	Componentes del biodigestor de tipo tubular.	9
3-2	Relación entre la temperatura y el tiempo de retención recomendado [Martí Herrero, 2019].	12
7-1	Ubicación y características de los sensores.	35
7-2	Matriz QFD para el sensor HOBO MX 2201.	38
7-3	Matriz QFD para el sensor HOBO MX 2202.	41
7-4	Ubicación de los sensores seleccionados	43
7-5	Resultados de la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente.	50
7-6	Calidad del biogás	50
7-7	Matriz de selección del software.	53
7-8	Coordenadas del sitio de operación y Orientación e inclinación del sistema	54
7-9	Dimensiones de los elementos del biodigestor.	54
7-10	Propiedades de los elementos.	55
7-11	Resultados de la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente.	65
7-12	Calidad del biogás.	65
7-13	Resultados de la caracterización del desempeño antes y después de las modificaciones.	66
7-14	Recuperación de energía del biogás producido.	68
A-1	Matriz QFD para el sensor HOBO UA-001-08.	76
A-2	Matriz QFD para el sensor PT100.	77
A-3	Matriz QFD para el sensor HOBO UA-002-64.	78
A-4	Matriz QFD para el sensor PCE-174.	79

Lista de Figuras

3-1	Ubicación satelital de la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte [Maps, sf].	7
3-2	Esquema general de un biodigestor tubular [Perrigault, 2010].	9
3-3	Esquema del proceso de la digestión anaeróbica [Martí Herrero, 2019].	10
3-4	Radiación directa y difusa [De Kuyper, 2018].	17
3-5	Variables térmicas del digestor tubular de bajo costo utilizadas en el modelo térmico matemático [Perrigault et al., 2012].	20
7-1	Esquema del digestor y ubicación de los sensores de temperatura e iluminancia.	42
7-2	Diseño del panel de control (dashboard).	45
7-3	Compotamiento de temperaturas e iluminancia del digestor del 17 al 23 de abril de 2023.	46
7-4	Radiación global, directa y difusa para el día 47 del periodo de monitoreo.	49
7-5	Diagrama de flujo de la programación del modelo térmico [Perrigault et al., 2012]	60
7-6	Ganancias solares para el día 20 de abril de 2023.	62
7-7	Ganancias solares mensuales.	62
7-8	Temperaturas de los elementos del digestor del 17 al 23 de abril de 2023.	64
7-9	Producción de biogás normalizado en el periodo de monitoreo.	68
B-1	Diseño A.	80
B-2	Diseño B.	80
B-3	Diseño C.	81
B-4	Diseño D.	81
B-5	Diseño E.	81
C-1	Certificado de participación XXVIII congreso institucional de investigaciones en la Universidad El Bosque de la estudiante Laura Mecón.	82
C-2	Certificado de participación XXVIII congreso institucional de investigaciones en la Universidad El Bosque del estudiante Andres González.	83
D-1	Modelo del sensor MX2201 Y MX2202.	84

Lista de Ecuaciones

3-1	Tiempo de retención hidráulica	13
3-2	Producción diaria de biogás	15
3-3	Producción específica de metano	15
3-4	Velocidad de producción de biogás	15
3-5	Iluminancia	16
3-6	Flujo luminoso	16
3-7	Irradiancia acumulada horaria	18
3-8	Ratio acumulado	18
3-9	Radiación directa cuando el sol está en el cenit	18
3-10	Radiación directa en función del ángulo de elevación solar	18
3-11	Índice de claridad	19
3-12	Radiación total	19
3-13	Balance de energía en la cobertura	21
3-14	Balance de energía en el aire interior	21
3-15	Balance de energía en la pared 1	21
3-16	Balance de energía en la pared 2	21
3-17	Balance de energía en el reactor anaeróbico	21
3-18	Balance de energía en el biogás	21
3-19	Balance de energía en el lodo	21
7-1	Balance de energía en la pared 1 considerado sin inercia térmica	58
7-2	Balance de energía en la pared 2 considerado sin inercia térmica	58

Lista de Símbolos

En esta sección encontrará la lista de abreviaturas utilizadas en el documento para facilitar la comprensión de los términos técnicos y facilitar la lectura. Estas abreviaturas se emplearán a lo largo del texto con el fin de simplificar la terminología y mejorar la claridad de la información presentada.

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

<i>AGVs</i>	Ácidos grasos volátiles
<i>CO</i>	Carga orgánica
<i>DQO</i>	Demanda química de oxígeno
<i>DA</i>	Digestión anaerobia
<i>IDEAM</i>	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales
<i>PDB</i>	Producción diaria de biogás
<i>PEB</i>	Producción específica de biogás
<i>PEM</i>	Producción específica de metano
<i>QFD</i>	Quality function deployment
<i>ST</i>	Sólidos totales
<i>SV</i>	Sólidos volátiles
<i>TRH</i>	Tiempo de retención hidráulica
<i>UIS</i>	Universidad Industrial de Santander
<i>VCO</i>	Velocidad de carga orgánica
<i>VPB</i>	Velocidad de producción de biogás

Introducción

En América Latina, los digestores tubulares de bajo costo se destacan como los modelos más empleados para generar metano a partir de desechos orgánicos vinculados a actividades agropecuarias. Entre estos desechos se incluyen el estiércol de animales, así como los desechos provenientes de establos y corrales [Jaimes-Estévez et al., 2021, Palau Estevan, 2016]. A través de la digestión anaerobia (DA), estos sistemas logran la transformación de los sustratos orgánicos y desechos en una forma de energía útil conocida como biogás, compuesto principalmente por metano, además de generar subproductos con propiedades fertilizantes llamados bioles [Martí Herrero, 2019].

La calidad y la cantidad de biogás producido dependen de varios factores clave: (a) la temperatura del proceso anaeróbico, ya que las temperaturas bajas o psicrófilas pueden desequilibrar el proceso ralentizando la producción de biogás y disminuyendo la concentración de metano en el gas producido [Paucar Malpica and Quispe Astucuri, 2015]; (b) las características del sustrato orgánico como el caso del estiércol equino que tiene un bajo potencial de metano debido a su baja degradabilidad [Zhang et al., 2017] y (c) los parámetros de operación del digestor tales como la proporción de la mezcla con la que se carga (carga orgánica) y el tiempo que esta debe durar en el reactor anaeróbico para obtener un volumen eficiente de biogás (tiempo de retención hidráulica) [Caldera et al., 2003].

En este trabajo de investigación se estudió un biodigestor tubular de bajo costo instalado en la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá alimentado con estiércol equino. En cuanto a la producción de biogás la energía que se logra recuperar bajo las condiciones actuales es del 2,5 % de la energía total que necesita el Cantón para actividades de cocción, a pesar de tener una adecuación térmica, esta baja eficiencia no solo estaría relacionada con la temperatura del proceso sino también con factores como el tiempo de retención hidráulica (TRH) y carga orgánica (CO). Es por esto que este estudio se centró en desarrollar un sistema de monitoreo que registró datos de temperatura, radiación solar, iluminancia, calidad del biogás, afluente y efluente para mejorar la eficiencia y el rendimiento del biodigestor a través de las siguientes etapas.

En primer lugar, se construyó e implementó un sistema de monitoreo, donde se capturó información durante un período de 90 días, que incluyó la temperatura en el suelo, ambiente, digestor e invernadero, la iluminancia y la radiación solar. Paralelamente, se realizó una caracterización bioquímica de los componentes clave: el afluente, el efluente y el biogás. En la segunda etapa usaron los datos recopilados para realizar un análisis térmico de la planta del biodigestor, basándose en el modelo propuesto por Perrigault et al. en 2012. Por último, se examinó el comportamiento térmico del digestor durante todo el período de estudio y se evaluó la calidad del biogás, afluente y efluente en relación a los cambios implementados en los parámetros de operación.

1. Planteamiento del problema y justificación

1.1. Planteamiento del problema

El Ejército Nacional de Colombia, en busca de la protección del territorio Nacional y en contribución al desarrollo del país, ejecuta proyectos que impactan al bienestar y la protección del medio ambiente. Esto de acuerdo con los objetivos estratégicos de la institución, donde priorizan los recursos naturales como activos estratégicos de la nación, por lo tanto, es de interés para la Fuerza ejecutar proyectos de investigación que contribuyan al sostenimiento de los sistemas energéticos. Actualmente en la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá existen alrededor de 100 equinos que generan 450 kg de estiércol por día, para el tratamiento y aprovechamiento de este recurso se implementó un biodigestor tubular de bajo costo de $8m^3$ que produce biogás y digestato.

Debido a que Bogotá se encuentra a una altura de 2640 metros sobre el nivel del mar, es barrida por fuertes vientos y tiene un clima frío con grandes oscilaciones térmicas diurnas. La máxima media anual fue de $19.2^{\circ}C$ y la mínima media anual de $7.4^{\circ}C$ [IDEAM, 2016]. Estas características climáticas hacen que el proceso de DA en el biodigestor se de bajo condiciones psicrófilas ($<20^{\circ}C$) causando que las bacterias requieran mayor tiempo para degradar la materia y producir biogás y digestato [Martí Herrero, 2019]. Es por esto que el rendimiento de la producción de biogás y la calidad del digestato dependen de la temperatura en la que se encuentre el consorcio bacteriano trabajando, en condiciones psicrófilas la actividad microbiana se ralentiza debido a que la temperatura óptima de crecimiento es de $37^{\circ}C$ [Jaimés-Estévez et al., 2020], por lo tanto, se busca mantener la temperatura de operación en el digestor más alta que la temperatura ambiente promedio. En el caso del biodigestor de la Escuela de Caballería se construyó un invernadero para aprovechar el calor del sol con el fin de que la temperatura a la que trabajan las bacterias sea superior a la media ambiental. De este modo, al considerar un diseño de calefacción solar pasiva, el biodigestor puede llegar a trabajar a temperaturas adecuadas para el proceso [Martí Herrero, 2019].

En cuanto a la producción de biogás, al realizar los cálculos de rendimiento, la energía que se logra recuperar en el biogás bajo las condiciones actuales corresponde al 2,5% de la energía total que necesita el Cantón para las actividades de cocción, a pesar de que el sistema se encuentra ubicado bajo un invernadero y cuenta con un revestimiento en la zanja para protegerlo de las pérdidas de calor debidas a las bajas temperaturas. Por lo que este bajo rendimiento no solo estaría relacionada con la temperatura del proceso sino también de factores como el TRH y la carga orgánica (CO).

Un aumento en la carga diaria de alimentación reduce el TRH en el biodigestor, ya que éste tardaría menos días en llenarse. Por otro lado, una disminución en la carga diaria aumentaría el TRH. Sin embargo, si el TRH es menor al que las bacterias necesitan para trabajar el estiércol, se producirá una menor cantidad de biogás o incluso sólo se producirá dióxido de carbono [Martí Herrero, 2019]. Por lo tanto, es fundamental monitorear y controlar variables de operación de biodigestor para lograr una conversión óptima de la materia orgánica en biogás y obtener el máximo beneficio energético posible. Es por lo anterior que se tiene la necesidad de hacer seguimiento de variables esenciales para el desempeño de la DA como (i) comportamiento térmico, (ii) estabilidad del bioproceso y (iii) calidad del biogás y digestato ante las modificaciones en las condiciones de operación.

1.2. Justificación

El rendimiento de la producción de biogás en un biodigestor tubular de bajo costo está influenciado por factores tales como la calidad del sustrato con el que se alimenta. En el caso del estiércol equino, la degradación de la materia orgánica se ve afectada por el alto contenido de compuestos orgánicos refractarios como celulosa y lignina. Este último es uno de los factores que limita la digestión anaerobia de la biomasa lignocelulósica, ya que ésta encierra a la celulosa impidiendo su accesibilidad, generalmente, la lignina pasa sin digerir a través de reactores de biogás [Hadin and Eriksson, 2016, Zhang et al., 2017]. Por lo tanto, una menor degradabilidad de la materia orgánica se verá reflejado en la cantidad producida de biogás.

Otro factor importante es la temperatura durante el proceso de DA, ya que las temperaturas bajas o psicrófilas pueden desequilibrar el proceso, disminuyendo tanto la velocidad como la estabilidad de la reacción y reduciendo la concentración de metano en el gas producido. Esto se debe a que las bacterias que participan en el proceso trabajan de manera más efectiva a una temperatura óptima de 37°C [Gerday et al., 2007].

Además, los parámetros de operación del biodigestor, como la CO y el TRH, son factores críticos en la producción de biogás. En condiciones psicrófilas, se recomienda que la CO permanezca dentro del digestor durante al menos 40 días para alcanzar una degradación efectiva. Esto permitiría un rendimiento máximo de producción de biogás de $0,44m^3/kgSVd$ y una concentración de metano máxima del 60% [Jaimes-Estévez et al., 2020]. Sin embargo, en la información preliminar sobre la operación del biodigestor, se evidenció que la energía contenida en el biogás corresponde al 2,5% de la energía total que necesita el Cantón para actividades de cocción.

Es por esto que para mejorar el rendimiento de la producción de biogás en términos de energía en el biodigestor tubular de bajo costo instalado en la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá, fue importante implementar un sistema de monitoreo. Este sistema permitió comprender el comportamiento del biodigestor y aplicar los cambios necesarios a los parámetros de operación del mismo. De esta manera, se podrán mejorar las condiciones de operación y aumentar la eficiencia en la producción de biogás. Al lograr una mejora en el rendimiento se generará una cantidad suficiente de biogás, lo cual crea la oportunidad de sustituir parcial o totalmente el gas natural utilizado en el restaurante Rancho de Tropa Batallón Lancero, el cual consume 2 cilindros de 100 libras de presión por mes para cocinar tres comidas calientes al día para 80 personas. Lo que se traduciría en una reducción en los costos parciales de adquisición de este recurso energético y contribuiría a la transición hacia un modelo de energía más sostenible.

Teniendo en cuenta lo anterior y a partir de las competencias adquiridas como bioingeniero para analizar, transformar y mejorar los diferentes componentes de un proceso biológico y comprender cómo la alteración de uno de estos afecta al sistema, se propuso desde el enfoque de energías renovables a la investigación de la Universidad El Bosque, el desarrollo de un sistema de monitoreo de temperatura, radiación solar, calidad de biogás, afluente y efluente para mejorar el rendimiento del proceso en el biodigestor tubular de bajo costo alimentado con estiércol equino bajo condiciones psicrófilas en el Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá. Es así como el biodigestor se convierte en uno de los principales proyectos que aportan al bienestar socioambiental, dado que es un generador de cambio por una economía circular y sostenible en el tiempo. De esta forma se aporta significativamente a la Nación, ya que las dos instituciones en representación de la academia, investigación y protección de la naturaleza, trabajan mancomunadamente para generar nuevo conocimiento y desarrollar y mejorar alternativas amigables con el medio ambiente.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo de temperatura, radiación solar, iluminancia, calidad de biogás, afluente y efluente para mejorar el rendimiento del proceso en el biodigestor tubular de bajo costo alimentado con estiércol equino bajo condiciones psicrófilas en la Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá.

2.2. Objetivos Específicos

- Rediseñar e implementar el sistema de monitoreo de temperatura, radiación solar, iluminancia, calidad de biogás, afluente y efluente en las condiciones de operación del digestor ubicado en el Cantón Norte.
- Implementar un modelo matemático que permita determinar el comportamiento térmico del biodigestor en las condiciones de operación para la digestión anaeróbica de estiércol equino.
- Evaluar el rendimiento de la producción de biogás y la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de la modificación en las condiciones de operación.

3. Marco Referencial

3.1. Marco Geográfico

El área de estudio es en la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá, Colombia. Esta institución forma parte del Ejército Nacional de Colombia y está situada en la zona noroccidental de la capital, específicamente en la localidad de Usaquén, en la intersección de la Calle 106 norte y la Carrera 7. Las coordenadas geográficas del Cantón Militar Norte son $4^{\circ}41'3''N$ y $74^{\circ}2'15.0''$. Para visualizar la ubicación satelital de la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte, se puede consultar la figura 3-1.

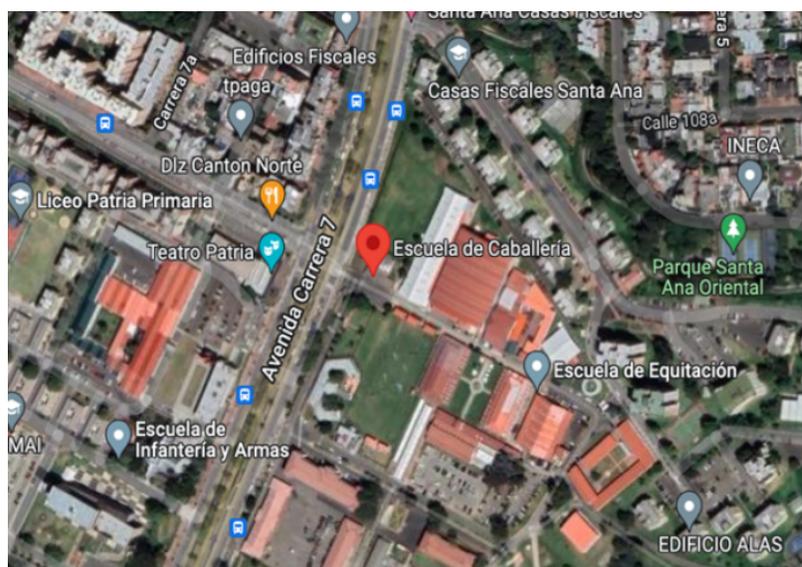


Figura 3-1.: Ubicación satelital de la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte [Maps, sf].

3.2. Marco teórico

3.2.1. Biodigestores

Biodigestores de acuerdo a su operación

A. Discontínuos o de régimen estacionario: Son aquellos que se cargan con las materias primas en un solo lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían por completo los digestores y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación [Martí Herrero, 2019].

B. Contínuos: Son aquellos en los que la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales [Martí Herrero, 2019].

C. Semicontínuos: Este tipo de biodigestores son los más usados en el medio rural. En este tipo de biodigestores la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas [Martí Herrero, 2019]. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas, calculados en función TRH y del volumen total del digestor. Los diseños más populares son el digestor de cúpula fija, de cúpula móvil o flotante y el biodigestor tubular [Martí Herrero, 2019].

Se describe únicamente el tipo de digestor objeto de esta investigación, es decir, el digestor tubular de bajo costo. Este tipo de biodigestor consiste en un fermentador y cámara de almacenamiento de biogás en forma tubular hecha de polietileno en capa doble o de geomembrana de PVC, es instalado en forma horizontal en una zanja excavada en el suelo que funciona como aislante térmico, en el cual el residuo se mueve en un flujo de tipo pistón: los residuos entran por un lado y por el otro lado sale una misma cantidad de lodo digerido, tal como se muestra en la figura **3-2** [Perrigault, 2010]. Este tipo de digestor también cuenta con una válvula de seguridad que evita su ruptura por la presión que puede generar debido a una producción excesiva de biogás [Perrigault, 2010].

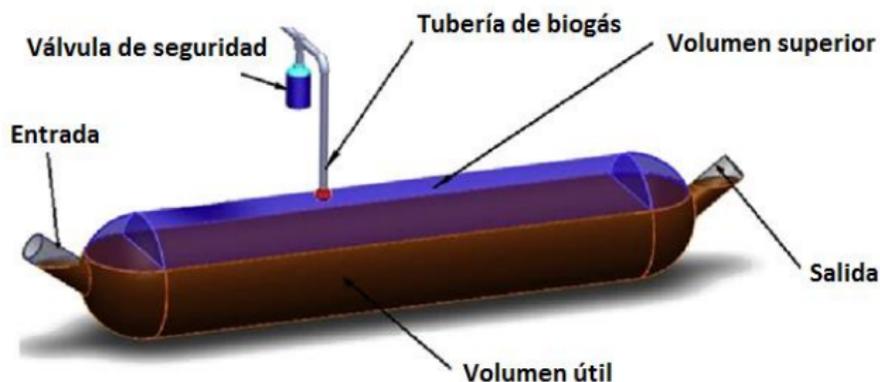


Figura 3-2.: Esquema general de un biodigestor tubular [Perrigault, 2010].

Componentes del biodigestor tubular

Además de los componentes que se muestran en la tabla 3-1, se debe construir la zanja donde se acomodará el reactor. Con esto se conseguirá aislarlo térmicamente, sobre todo de la humedad.

Componente	Descripción
Reactor	Hace referencia al dispositivo principal que contendrá toda la materia orgánica que atravesará el proceso de digestión. Suele estar fabricado de Polietileno (PE) o geomembrana de policloruro de vinilo (PVC) [Zabaleta et al., 2017].
Tuberías	Conducen el gas desde el reactor hasta algún otro equipo que sirva para comprobar la obtención del biogás [Zabaleta et al., 2017].
Invernadero	No es de uso obligatorio, sin embargo, su uso llega a ser imprescindible en las regiones frías para poder elevar la temperatura del reactor y evitar el enfriamiento de la materia orgánica [Zabaleta et al., 2017].
Válvulas	Garantizan que la presión en el reactor sea más o menos constante [Zabaleta et al., 2017].
Manómetro	Permite controlar la producción de biogás [Zabaleta et al., 2017].
Reservorio	Sirve para almacenar el biogás producido. Debe estar colocado de tal manera que sea fácil darle presión y no tan alejado de la instalación hará uso del biogás [Zabaleta et al., 2017].

Tabla 3-1.: Componentes del biodigestor de tipo tubular.

3.2.2. Digestión Anaerobia

La DA es un proceso biológico degradativo en el cual la materia orgánica de un sustrato (residuos animales y vegetales) es convertida en biogás [Varnero-Moreno, 2011]. Este proceso se desarrolla en una sucesión de etapas que tienen que estar en equilibrio entre ellas [Martí Herrero, 2019]. Todas las etapas son realizadas por multitud de diferentes poblaciones de bacterias que forman un consorcio; estas etapas son denominadas hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

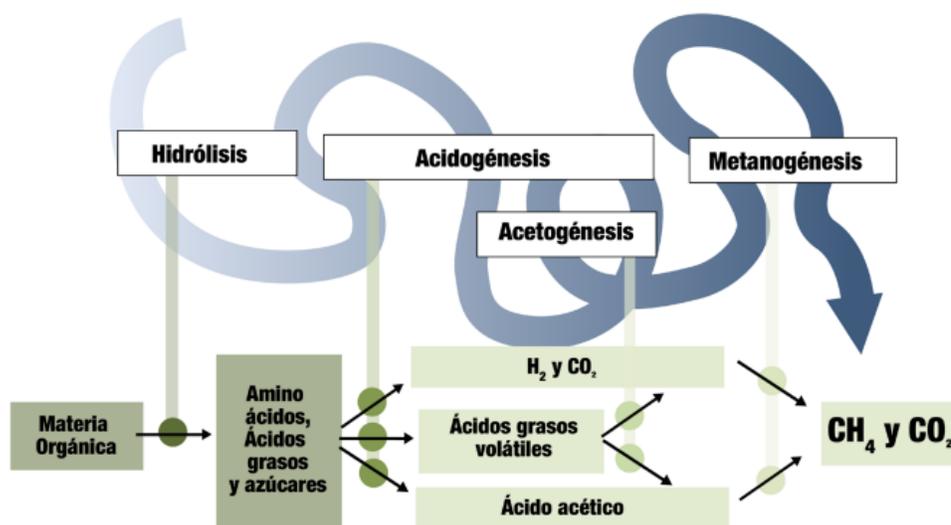


Figura 3-3.: Esquema del proceso de la digestión anaeróbica [Martí Herrero, 2019].

Etapas del proceso de digestión anaeróbica

La primera etapa es la hidrólisis, en que la materia orgánica entrante comienza a descomponerse, produciendo azúcares, ácidos grasos y aminoácidos [Martí Herrero, 2019]. La segunda etapa corresponde a la acidogénesis, donde las moléculas orgánicas solubles pasan por un proceso de fermentación y se generan como productos el acetato, ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono para obtener estos productos es necesario que ocurran los procesos de fermentación alcohólica, láctica y acética [Corrales et al., 2015]. En la tercera etapa ocurre la oxidación del butirato y propionato con ayuda de los organismos acetógenos que actúan como productores obligados de hidrógeno con el fin de obtener como productos el acetato, el dióxido de carbono y el hidrógeno [Corrales et al., 2015]. Una vez se tiene el acetato, el dióxido de carbono y el hidrógeno, la cuarta etapa, llamada metanogénesis, hace uso de estos productos para producir metano [Martí Herrero, 2019].

3.2.3. Factores determinantes en el proceso de la digestión anaerobia

A. Consorcio de Bacterias: El consorcio de bacterias es una asociación natural de dos o más poblaciones microbianas que lleva a cabo la DA [Martí Herrero, 2019]. El consorcio bacteriano de los estiércoles está optimizado para la digestión dentro del animal a su temperatura y alimentación, dentro de ese consorcio también existen multitud de otros grupos de bacterias que están poco activos, pero están. Este otro grupo de bacterias son muy importantes, ya que al cambiar las condiciones unas bacterias dejarán de trabajar, pero aquellas que estaban poco activas, comenzarán a hacerlo [Martí Herrero, 2019]. Esto se puede evidenciar al realizar cambios en la temperatura, ya que al partir de consorcios bacterianos que vienen de estiércoles y están aclimatados a 35-37 °C y se introducen en un biodigestor de bajo costo, la temperatura de trabajo pasará a ser menor, haciendo que unas bacterias dejen de trabajar en esas condiciones, pero otras toman su lugar, tomando entre tres y cuatro meses en el proceso de cambio [Salazar and Torres, 2019].

B. pH: El pH es un indicador de la acidez de la materia orgánica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de DA tienen niveles de actividad en torno a la neutralidad [Martí Herrero, 2019]. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el valor del pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0 [Varnero-Moreno, 2011]. Por ejemplo, en la etapa de acidogénesis y acetogénesis las bacterias trabajan mejor en pH 5.5 y 6.5, mientras que en la metanogénesis lo hacen en un rango 7.8 a 8.2 [Varnero-Moreno, 2011]. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas [Varnero-Moreno, 2011]. Esto se debe a que las bacterias que actúan en la metanogénesis son sensibles a las variaciones en pH y reducen su actividad, provocando la acumulación de ácido acético y H₂ [Varnero-Moreno, 2011]. Mientras que un aumento del pH a más de 8, podría ser explicado por el cambio de NH₄⁺ a un compuesto más tóxico en forma de NH₃ [Varnero-Moreno, 2011].

C. Temperatura: Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C) [Varnero-Moreno, 2011]. Es importante mantener los rangos de temperatura para cada tipo de microorganismos, ya que la disminución de la temperatura puede causar en la bacteria una gelificación de la membrana lo que causa que el transporte sea tan lento que no ocurra el crecimiento; si ocurre lo contrario, es decir que la temperatura aumente, la bacteria puede sufrir desnaturalización proteica causando el colapso de la membrana [Varnero-Moreno, 2011]. La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a que este factor influye en la velocidad de

digestión, ya que, si aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás [Varnero-Moreno, 2011].

D. Carga Orgánica (CO): Corresponde al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digester [Martí Herrero, 2019].

E. Velocidad de carga orgánica (VCO): Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. La VCO depende del tipo de sustrato orgánico utilizado, ya que este determina el nivel de actividad bioquímica que ocurre dentro del biodigestor [Casanovas et al., 2019]. Valores bajos de VCO implican elevados TRH y/o baja concentración de sólidos volátiles (SV) en el efluente, mientras que incrementos en la VCO conllevan una reducción en la producción de biogás por unidad de SV introducida [Casanovas et al., 2019].

F. Tiempo de Retención Hidráulica (TRH): Corresponde al tiempo que tarda la carga diaria en cruzar completamente el biodigestor, hasta que es evacuado por salida [Martí Herrero, 2019]. Si este tiempo es menor al que requieren las bacterias, se producirá menor cantidad de biogás o incluso solo se producirá dióxido de carbono. Por el contrario, si se le da mucho más tiempo a las bacterias, se sacará todo el potencial de biogás de la carga diaria [Martí Herrero, 2019]. En otras palabras, este no es más que el cociente entre el volumen del reactor y el caudal diario de carga [Casanovas et al., 2019]. Esta variable determina el volumen del reactor y se encuentra directamente relacionada con la temperatura y, en consecuencia, con la tecnología a utilizar. Por lo que es necesario que el TRH se ajuste a la temperatura a la que van a trabajar las bacterias en el biodigestor [Martí Herrero, 2019].

En la tabla **3-2** se muestra el TRH recomendado de acuerdo a la temperatura a la que se encuentra tabajando el consorcio bacteriano.

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

Tabla 3-2.: Relación entre la temperatura y el tiempo de retención recomendado [Martí Herrero, 2019].

La ecuación que permite calcular el TRH en un sistema de DA es la siguiente:

$$TRH = \frac{VL}{CO} \quad (3-1)$$

Donde:

- VL: Volumen del reactor expresado metros cúbicos.
- CO: Carga orgánica diaria expresado en litros por día.

3.2.4. Productos de la digestión anaerobia

A. Biogás: Mezcla de gases producida en la DA, se caracteriza por tener, un 50 %-70 % de metano, 40 %-20 % de dióxido de carbono y trazas de otros gases, entre los que cabe destacar el ácido sulfhídrico [Martí Herrero, 2019]. De esta forma, los residuos orgánicos tienen el potencial de producir un gas combustible como es el biogás [Martí Herrero, 2019].

La composición del biogás es la que determinará su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que puede desprenderse al producirse una reacción química de oxidación [Casanovas et al., 2019]. El poder calorífico expresa la energía que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente [Casanovas et al., 2019]. Los combustibles tienen siempre un mismo valor de poder calorífico, sin embargo, en la práctica se han definido dos valores: poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). Donde el PCS expresa el calor verdaderamente producido en la reacción de combustión, mientras que el PCI es el calor realmente aprovechable [Casanovas et al., 2019].

El principal determinante del poder calorífico del biogás es la cantidad de metano que tenga en su mezcla. El PCI puede variar en un rango de 4.300 a 6.450 kcal/Nm³ [Casanovas et al., 2019].

B. Biol/Efluente: Fertilizante producido durante el proceso de DA dentro de los biodigestores conocido como biol, efluente o digestato [Martí Herrero, 2019]. En el proceso de DA, los nutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio y otros) contenidos en los residuos orgánicos que entran en forma orgánica, se mineralizan y pasan a estar disponibles para las plantas [Martí Herrero, 2019].

3.2.5. Caracterización fisicoquímica en afluente y efluente

A. Sólidos Totales (ST): Los ST representan la parte “seca” del sustrato. Es decir, a la mezcla entre el estiércol y agua se le quita todo el agua aplicando el método de evaporación, y lo que queda seco son los ST [Martí Herrero, 2019]. El % de ST que tiene un sustrato, es representado por el % de materia seca que hay en él. Estos ST están formados por sólidos inertes y sólidos orgánicos [Martí Herrero, 2019]. De forma general, en el estiércol se tiene que, de los ST, entre un 25 % a 15 % de ella corresponde a sólidos inertes. El resto de los ST entre un 75 a 85 % corresponde a materia orgánica, y se les llama sólidos volátiles (SV) [Martí Herrero, 2019].

B. Sólidos Volátiles (SV): Los SV como se mencionó anteriormente son la fracción orgánica del sustrato. Estos son los que pasarán por el proceso de DA y serán digeridos por el consorcio bacteriano [Martí Herrero, 2019].

C. Demanda química de oxígeno (DQO): Indica la cantidad de oxígeno disuelto necesario para oxidar biológicamente la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo [Varnero-Moreno, 2011].

D. Potencial de biometanización (PBM): Es una prueba que se realiza a escala de laboratorio que permite determinar la capacidad de producción de metano, la biodegradabilidad anaerobia de un sustrato orgánico, seleccionar sustratos e inóculos potenciales y predecir el funcionamiento de biodigestores a escala real [Cleves et al., 2016].

3.2.6. Evaluación del rendimiento de un digestor.

El rendimiento de un biodigestor depende de factores como el material orgánico usado para cargarlo, las condiciones ambientales y de los parámetros de operación mencionados anteriormente que influyen en el proceso de DA. Para evaluar el rendimiento de un biodigestor se tienen las siguientes magnitudes:

- **Producción diaria de biogás (PDB):** Es la tasa diaria de producción de biogás en metros cúbicos normalizados (Nm^3/d).
- **Producción específica de biogás (PEB):** Es la tasa de producción de biogás en metros cúbicos normalizados por cada kilogramo de sólido volátil de la carga diaria. Se calcula mediante la siguiente expresión.

$$PEB = \frac{PDB}{MO} \quad (3-2)$$

En donde:

- PDB: producción diaria de biogás (Nm^3/d).
- MO: materia orgánica de alimentación diaria ($kgSV/d$).

- **Producción específica de metano (PEM):** Es la proporción de metano obtenido en la PEB. Para hallarlo se aplica la siguiente expresión, en donde $\%CH_4$ es la porcentaje de metano en el biogás.

$$PEM = \left(\frac{PDB * m^3CH_4}{CO * SV} \right) * 100 \quad (3-3)$$

En donde:

- CO: Carga Orgánica (kg/d).
- SV: Sólidos Volátiles (g/kg).

- **Velocidad de producción de biogás (VPB):** Es la tasa diaria de producción de biogás en metros cúbicos normalizados por el volumen operativo del digestor. Se calcula de la siguiente manera:

$$VPB = \frac{PDB}{VO} \quad (3-4)$$

En donde:

- VO: volumen operativo del digestor (L).

3.2.7. Sensórica

Sensores de Temperatura

La temperatura es una variable física y consiste en el promedio de la energía cinética de las moléculas, conocido también como energía calorífica. Los sensores de temperatura miden la intensidad de calor de un cuerpo de forma que, si esta energía es mayor, la temperatura será también mayor [Ramírez et al., 2014].

Los transductores que convierten la energía térmica en energía eléctrica se conocen como termoelectrónicos. Estos dispositivos trabajan gracias a las propiedades eléctricas de los conductores y semiconductores, principalmente están compuestos por el termistor, termopar, resistencias eléctricas, medidores de radiación y medidores ópticos [Ramírez et al., 2014].

Sensores de Iluminancia

La luz está compuesta de fotones que son partículas elementales estudiadas en la física cuántica, el término fotón es usado para describir cuánta energía hay en una cantidad de luz. La luz tiene una naturaleza compleja por lo que se dice que tiene un comportamiento de onda electromagnética y partícula a la vez. El término luz hace referencia al espectro electromagnético de longitudes de onda que son visibles por el humano [Corona et al., 2014].

La iluminancia es una variable fotométrica. Esta variable mide el flujo luminoso en una unidad de área. Este es equivalente a irradiancia en radiometría. La unidad de la irradiancia es W/m^2 y el de la iluminancia es lm/m^2 [Gozalo San José et al., 2017].

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (3-5)$$

Este término es un índice representativo de la densidad de flujo luminoso sobre una superficie.

La iluminancia cumple con la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Cuando una fuente luminosa produce iluminancias estas disminuyen con el cuadrado de la distancia desde el plano a iluminar hasta la fuente [Gozalo San José et al., 2017]:

$$E' = \frac{I \cos \Theta}{r^2} \quad (3-6)$$

3.2.8. Radiación solar y el modelo de Duffie y Beckman.

La radiación solar que llega desde el extremo de la atmósfera hasta la superficie de la Tierra debe interactuar con diferentes partículas y compuestos que hacen que sufra cambios durante su trayectoria gracias a la presencia de gases como el ozono y el vapor de agua. La cantidad de radiación solar que llega a un determinado lugar está determinado por la ubicación del planeta respecto al sol, la ubicación geográfica, el momento del día y del año así como de las condiciones atmosféricas del sitio [Perrigault, 2010].

Para evaluar la cantidad de radiación solar se emplean las siguientes magnitudes:

- **Irradiancia:** Expresada en unidades de W/m^2 , es la cantidad de radiación solar recibida en una superficie por unidad de área. También se puede decir que es la potencia incidente por unidad de superficie [De Kuyper, 2018].

- **Radiación directa (G_{dir}):** es aquella parte de la radiación que llega directamente a la superficie sin sufrir alteraciones. Tiene una única dirección de incidencia [De Kuyper, 2018].
- **Radiación difusa (G_{dif}):** radiación que llega a la superficie terrestre después de haber experimentado cambios por reflexión o refracción al atravesar la atmósfera [Perrigault, 2010].
- **Irradiación o radiación global (G):** es la cantidad de radiación solar recibida por una superficie por unidad de área durante un determinado tiempo. Está formada por la radiación directa y difusa como se representa en la figura 3-4. Se expresa en unidades de Wh/m^2 [De Kuyper, 2018].

Es importante tener en cuenta que la irradiancia es la potencia instantánea de la radiación mientras que la irradiación es la energía recibida por una superficie en un determinado momento [De Kuyper, 2018].

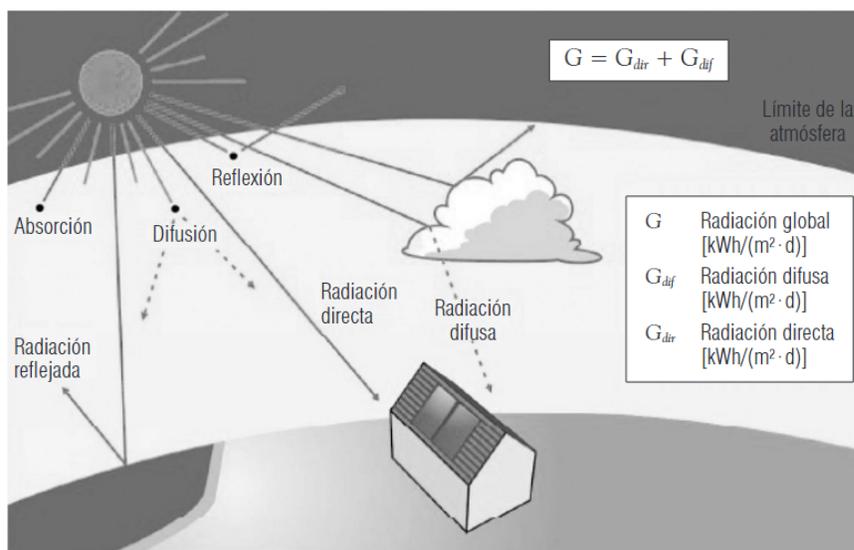


Figura 3-4.: Radiación directa y difusa [De Kuyper, 2018].

Para determinar la radiación incidente sobre una superficie es necesario contar con registros de radiación confiables como los que reporta la NASA en su sitio web *Surface Meteorology and Solar Energy*. De esta base de datos es posible extraer datos meteorológicos como de radiación global horizontal de un lugar específico del mundo dada su ubicación geográfica [De Kuyper, 2018]. Sin embargo, la disposición de los datos de radiación pueden verse

tardía debido al tiempo que tarda la base de datos en actualizarse con los registros recientes.

Algunas instituciones dedicadas a la medición y recolección de datos metereológicos cuentan con estaciones distribuidas a nivel regional, nacional o internacional en los que se mide con piranómetros la incidencia de la radiación solar sobre una superficie horizontal. Con la información recolectada a lo largo del tiempo se generan bases de datos con acumulados o promedios tanto horarios, diarios o mensuales de irradiación global horizontal [IDEAM, 2017].

Duffie y Beckman [Duffie and Beckman, 2013] propusieron un modelo matemático en el que se permite estimar la irradiancia acumulada horaria a partir de la acumulada diaria cuando solo se disponga de esta última. Este modelo se expresa de la siguiente forma:

$$I = r_t H \quad (3-7)$$

En donde I , es la irradiancia acumulada horaria H , es la irradiancia acumulada diaria y r_t es el ratio acumulado que a su vez se calcula para cada hora del día mediante la siguiente expresión:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos w) \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - \frac{\pi}{180} w_s \cos w_s} \quad (3-8)$$

En la ecuación 3-8, w es el ángulo horario en grados y w_s es el ángulo horario al atardecer. El coeficiente a se refiere a la fracción de radiación directa que llega a la superficie cuando el sol está en el cenit el cual se puede calcular de la siguiente manera:

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin (w_s - 60) \quad (3-9)$$

El coeficiente b se relaciona con la fracción de radiación directa que llega a la superficie en función del ángulo de elevación solar. Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin (w_s - 60) \quad (3-10)$$

Una vez obtenida la irradiancia acumulada horaria, se puede determinar la fracción de irradiancia difusa horaria que llega a la superficie partiendo del índice de claridad (k_T). Este índice se define como el cociente entre la irradiancia difusa y la irradiancia total que llega a una superficie como se muestra en la siguiente ecuación.

$$k_T = \frac{I_{df}}{I} \quad (3-11)$$

Donde I es la irradiancia total horaria que llega a una superficie y I_{df} , corresponde a la irradiancia difusa horaria. Como se mencionó anteriormente, la radiación total se compone por la radiación directa y difusa, por lo tanto, una vez determinada la irradiancia difusa, se puede determinar la irradiancia directa horaria a partir de la diferencia entre la irradiancia total horaria y la difusa usando la siguiente expresión:

$$I = I_{dr} + I_{df} \quad (3-12)$$

3.2.9. Modelo térmico matemático

El modelo térmico matemático aplicado en digestores tubulares de bajo costo en climas fríos constituye una herramienta enfocada en el análisis de la transferencia de calor y el desempeño térmico del digestor. Este modelo, dependiente del tiempo, considera diversas variables de entrada, tales como la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la geometría del digestor. Los resultados obtenidos del modelo incluyen las temperaturas del lodo, el biogás, la membrana de retención, el aire, así como las temperaturas de la pared y la cubierta del invernadero (cabe mencionar que en climas fríos, los digestores cuentan con invernaderos que funcionan como colectores de calor). El error estándar del modelo en la determinación de la temperatura de la suspensión es de tan solo 0.47°C (2 %) según un estudio previo realizado por Perrigault et al. en 2012 [Perrigault et al., 2012].

En la figura **3-5** se muestran a detalle las variables térmicas empleadas en el modelo de transferencia de calor.

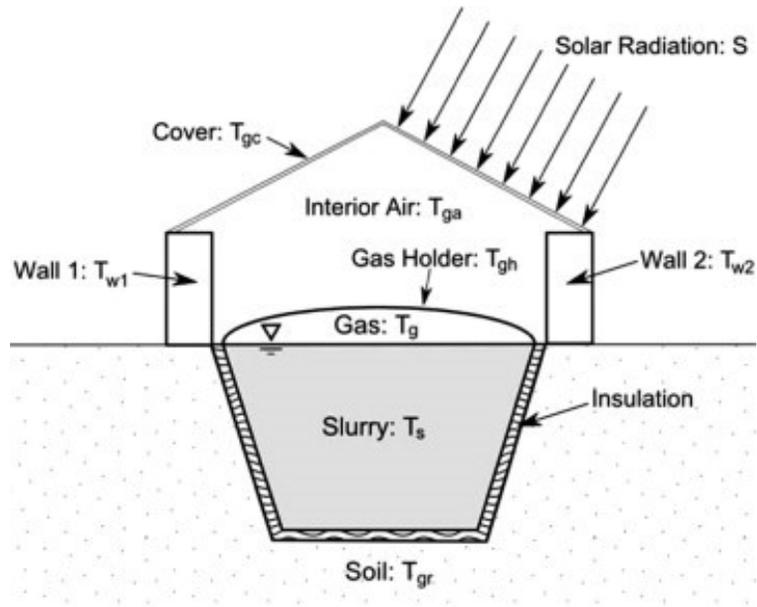


Figura 3-5.: Variables térmicas del digestor tubular de bajo costo utilizadas en el modelo térmico matemático [Perrigault et al., 2012].

En donde:

- T_{gc} es la temperatura de la cubierta del invernadero.
- T_{w1} y T_{w2} son las temperaturas de las paredes del invernadero.
- S es la radiación solar.
- T_{ga} es la temperatura del aire interior del invernadero.
- T_{gh} es la temperatura del contenedor de gas.
- T_g es la temperatura del biogás.
- T_s es la temperatura del lodo.
- T_{gr} es la temperatura del suelo.

Estas variables se determinan a partir del balance de energía de cada elemento en el sistema. Para la cubierta del invernadero (gc), el aire interior del invernadero (ga), las paredes del invernadero (w1 y w2), la temperatura del contenedor de gas (gh), el gas (g) y el lodo (s) las ecuaciones del balance de energía se expresan de la siguiente forma:

$$0 = S_{gc} + Q_{r,w1-gc} + Q_{r,w2-gc} + Q_{r,gh-gc} + Q_{r,gc} - sky + Q_{wind,gc} + Q_{c,ga-gc} \quad (3-13)$$

$$0 = Q_{c,gc-ga} + Q_{c,w1-ga} + Q_{c,w2-ga} + Q_{c,gh-ga} \quad (3-14)$$

$$m_{w1}C_{p,w1}\frac{\partial T_{w1}}{\partial t} = S_{w1} + Q_{r,w1-sky} + Q_{r,gc-w1} + Q_{r,w2-w1} + Q_{r,gh-w1} + Q_{c,w1-ga} + Q_{wind,w1} \quad (3-15)$$

$$m_{w2}C_{p,w2}\frac{\partial T_{w2}}{\partial t} = S_{w2} + Q_{r,w2-sky} + Q_{r,gc-w2} + Q_{r,w1-w2} + Q_{r,gh-w2} + Q_{c,w2-ga} + Q_{wind,w2} \quad (3-16)$$

$$0 = S_{gh} + Q_{c,gh-s} + Q_{c,gh-ga} + Q_{r,gh-w1} + Q_{r,gh-w2} + Q_{r,gh-s} + Q_{r,gh-gc} \quad (3-17)$$

$$T_g = (T_{gh} + T_s)/2 \quad (3-18)$$

$$m_sC_{p,s}\frac{\partial T_s}{\partial t} = S_s + Q_{c,s-gh} + Q_{r,gh-s} + Q_{cd,s-gr} + Q_{in} \quad (3-19)$$

A partir de estas ecuaciones es posible determinar las temperaturas de cada elemento para cada hora el del día dentro del periodo de monitoreo.

El modelo propuesto por Perrigault et al. en 2012 [Perrigault et al., 2012] ha proporcionado una base sólida para la aplicación y ajustes posteriores del modelo, lo que contribuye a la comprensión de la transferencia de calor y el comportamiento térmico en estos sistemas de bajo costo. Como lo es en el caso del artículo propuesto por Vergil C. Weatherford y Zhiqiang Zhai en 2015, ellos se enfocaron en la implementación y modificación del modelo propuesto por Perrigault para analizar el rendimiento térmico de biodigestores solares asistidos en climas fríos, los resultados de su investigación sugieren que varios factores influyen en la temperatura media anual de la mezcla en el biodigestor, incluida la orientación, el

grosor del aislamiento, la degradación de la transmisión visual de la cubierta y el material del tubo. Lo que permite concluir la utilidad del modelo térmico para evaluar la eficacia de los biodigestores solares asistidos en climas fríos [Weatherford and Zhai, 2015].

Tras el estudio realizado por Vergil C. Weatherford y Zhiqiang Zhai, en el año 2014, Terradas y sus colaboradores desarrollaron un modelo térmico con el propósito de predecir la producción de biogás en biodigestores de cúpula fija, enterrados en el suelo y no calentados. A pesar de que el sistema investigado difería en algunos aspectos del estudiado por Perrigault y su equipo [Perrigault et al., 2012], las hipótesis fundamentales del modelo resultaron ser similares, al despreciar la inercia térmica del material de la envoltura y el calor generado por las reacciones anaeróbicas. Además, ambos modelos compartían la consideración de temperaturas uniformes en los componentes y la omisión de pérdidas de calor debidas a la evaporación de agua en el lodo, entre otras suposiciones [Terradas-III et al., 2014].

El modelo propuesto por Terradas y su equipo se basaba en un balance de energía entre tres elementos clave del sistema: la cubierta del digestor, el biogás y el lodo. En cuanto a los cálculos empleados para determinar las transferencias de energía, se diferenciaban del modelo de Perrigault [Perrigault et al., 2012] en lo que respecta a la estimación de la radiación solar. Cabe destacar que este modelo demostró ser eficaz para estimar con precisión la temperatura del digestor, con una correlación de 0.96 [Terradas-III et al., 2014].

3.3. Marco Técnico y Legal

El proyecto se encuentra regulado por una serie de normativas pertinentes en el ámbito nacional e internacional.

En primer lugar, la normativa 3874 de 2016, creada por el Consejo Nacional de Política Económica y Social, establece la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Los objetivos de esta política abarcan la prevención en la generación de residuos, la minimización de los desechos destinados a depósitos sanitarios, así como la promoción de la reutilización, el aprovechamiento y el tratamiento de los residuos sólidos [Planeación, 2016].

En el ámbito de la normatividad técnica, se destaca la norma ISO 20675:2018 [ISO, 2018], que define términos y clasificaciones relacionados con diversos aspectos de la producción de biogás. Esto incluye la DA, la gasificación a partir de biomasa y la conversión de energía de biomasa en gas. La norma aborda cuestiones de acondicionamiento y mejora del biogás, así como su utilización, tomando en cuenta aspectos de seguridad, impacto ambiental, rendi-

miento y funcionalidad. La norma guía a lo largo del proceso, desde el diseño y la fabricación hasta las etapas de instalación, construcción, pruebas, puesta en servicio, aceptación, operación, inspección periódica y mantenimiento. Estas regulaciones proporcionan un marco sólido para el desarrollo y la ejecución del proyecto, asegurando el cumplimiento de estándares de calidad, seguridad y eficiencia.

4. Estado del arte

En la última década, ha habido un aumento notable en el interés por el desarrollo de proyectos con biodigestores en Latinoamérica, lo cual ha resultado en una amplia variedad de experiencias en cuanto a resultados y sostenibilidad. En este contexto, se han realizado numerosos estudios que se han centrado en la evaluación del desempeño de digestores tubulares de bajo costo, lo que ha permitido determinar la calidad del proceso de digestión en relación con las condiciones en las que opera el sistema.

Algunos estudios sobre este tipo de biodigestores se han centrado principalmente en la evaluación de variables como la tasa de producción de biogás, la PEB y el porcentaje de metano. Uno de estos es el llevado a cabo por Castro et al. en 2017, donde se evaluó el desempeño de un digestor tubular alimentado con estiércol bovino en condiciones reales en una finca colombiana [Castro et al., 2017]. Durante un período de cuatro meses, se evaluaron diversas variables, como el potencial de biometano, la actividad metanogénica, el consumo de materia orgánica, los AGVs, la producción de biogás y la concentración de metano, para monitorear la DA. Además, se evaluó la calidad del digestato midiendo sus características fisicoquímicas y microbiológicas durante el mismo período. En cuanto a los resultados obtenidos, los autores concluyeron que los AGVs se encontraron por debajo del límite que inhibe el proceso, y se produjo una concentración de metano considerable. De hecho, se menciona que este gas podría sustituir hasta el 80 % del gas propano utilizado en la finca donde se realizó el proceso.

Después del estudio de Castro et al. en 2017, Jaimes-Estevéz et al. en el 2020, llevaron a cabo una evaluación del rendimiento de un digestor tubular de bajo costo alimentado con estiércol porcino en condiciones psicrófilas en una granja porcina colombiana después de ocho años de operación [Jaimes-Estevéz et al., 2020]. Durante un período de 50 días, se evaluó el desempeño similar del digestor en términos de desempeño térmico, estabilidad del proceso biológico, análisis microbiológico y calidad del digestato, utilizando parámetros a los estudiados por Castro et al. en 2017. La temperatura y la iluminación se monitorean utilizando sensores, mientras que la actividad metanogénica específica, la clasificación taxonómica y el análisis cuantitativo del consorcio bacteriano, así como el contenido de patógenos, se evalúan para el comportamiento microbiológico. Se midieron parámetros como pH, AGVs, DQO y

SV para el efluente y el afluente, mientras que la concentración de metano en el biogás se prolongará mediante cromatografía de masas. Los resultados mostraron una DA estable y una producción de biogás superior durante el período de operación del digester, lo anterior debido a que el consorcio bacteriano se adaptó durante el periodo de operación del digester.

Además de los estudios mencionados anteriormente, se han realizado investigaciones para optimizar el desempeño de los biodigestores tubulares en climas fríos. Actualmente, existen tecnologías que permiten adaptar este tipo de biodigestores a las condiciones climáticas, como el uso de invernaderos que aumentan la temperatura del proceso y la conservan. En 2012, Perrigault y sus colegas realizaron un estudio del comportamiento térmico y un modelo de transferencia de calor para un digester tubular cubierto con un invernadero a una altitud de 3400 metros sobre el nivel del mar en Cusco, Perú. El estudio comenzó con la medición de variables térmicas en el digester durante cinco días, incluyendo radiación solar, velocidad del viento y temperaturas del aire, suelo, lodo y superficie del digester. El modelo matemático desarrollado fue unidimensional y se produjo para predecir la temperatura de la suspensión dentro del digester, teniendo en cuenta las ganancias solares y la transferencia de calor con el suelo, el aire del invernadero, la cubierta de plástico del invernadero, las paredes del invernadero, el aire ambiental y la transferencia de masa a través de los flujos de entrada y salida. Los autores encontraron que el invernadero proporcionó calor solar al digester, manteniendo una temperatura promedio de 8.4°C por encima de la temperatura ambiente y que el modelo matemático permitió establecer la temperatura de la suspensión con un error de 0.47°C.

Los estudios mencionados anteriormente proporcionan una perspectiva sobre cómo abordar el desarrollo del proyecto. En primer lugar, ofrecen una visión detallada de las variables y factores cruciales para el éxito de los biodigestores. Estos estudios han examinado aspectos como la producción de biogás, la calidad del biogás generado, la actividad metanogénica, la estabilidad del proceso, la adaptación del consorcio bacteriano y la calidad del digestato. Esta información ayuda a enfocar el sistema de monitoreo en las variables más relevantes y a medir aspectos que son indicativos del buen desempeño del biodigester. Adicionalmente, al analizar los resultados de estos estudios, se obtiene una comprensión más profunda de los desafíos y oportunidades que podría enfrentar el proyecto. Por ejemplo, los estudios que abordaron la optimización en climas fríos mediante el uso de invernaderos sugieren posibles soluciones para que el sistema de monitoreo de temperatura, radiación solar, calidad de biogás, afluente y efluente permita la mejora del rendimiento del proceso en el biodigester tubular de bajo costo alimentado con estiércol equino bajo en la Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá, donde las condiciones psicrófilas pueden ser un factor limitante.

5. Requerimientos

En este capítulo se presentan los requerimientos que guiarán el diseño y desarrollo del sistema de monitoreo propuesto. Estos requerimientos se dividen en tres categorías principales: Requerimientos Funcionales, Requerimientos de Calidad y Requerimientos de Operación. Cada categoría aborda aspectos esenciales para asegurar la efectividad, precisión y confiabilidad del sistema de monitoreo en el contexto del biodigestor de bajo costo alimentado con estiércol equino en la Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá.

5.1. Requerimientos Funcionales

- El sistema de monitoreo debe funcionar durante 90 días.
- El sistema debe registrar y guardar de forma automática los datos de temperatura del ambiente cada hora.
- El sistema debe registrar y guardar de forma automática los datos de temperatura del interior del invernadero cada hora.
- El sistema debe registrar y guardar de forma automática los datos de temperatura del digestor cada hora.
- El sistema debe registrar y guardar de forma automática los datos de temperatura del suelo cada hora.
- El sistema debe registrar y guardar de forma automática los datos de iluminancia cada hora.
- Se debe determinar de forma manual los valores de radiación solar a partir de los valores de irradiación reportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

5.2. Requerimientos de Calidad

- En el sistema, los sensores de temperatura deben medir un rango de 0 a 50°C con resolución máxima de 0.14°C y una precisión máxima de $\pm 0.53^\circ\text{C}$ [Jaimes-Estévez et al., 2020].
- En el sistema, el sensor de iluminancia debe medir un rango de 40 a 20000 lux [Barbero et al., 2015].
- El sensor de temperatura del digestor debe ser resistente a la corrosión causada por la emisión de H_2S [Cortes et al., 2016].
- Los sensores de temperatura e iluminancia deben soportar un ambiente con presencia de humedad que pueda causar oxidación o degradación del sensor [Llorens et al., 2019].
- A una temperatura entre 10°C y 25°C el sistema debe tener un TRH entre 25 y 125 días [Martí Herrero, 2019].
- El pH de la muestra del afluente debe estar en un rango de 6,0-6,8 [Casanovas et al., 2019].
- El pH de la muestra del efluente debe estar en un rango de 7,0-7,8 [Casanovas et al., 2019].
- La carga de entrada del biodigestor debe tener entre el 3 % y 16 % de ST [Martí Herrero, 2019].
- El porcentaje de metano (CH_4) en el biogás debe estar en un rango entre el 55 %-70 % [Varnero-Moreno, 2011].
- El software de programación del modelo térmico debe permitir el desarrollo de interfaces gráficas.
- El software de programación del modelo térmico debe ser de acceso libre.
- El software de programación del modelo térmico debe permitir el manejo de archivos .csv, .txt. o .xlsx.

5.3. Requerimientos de Operación

- Se debe extraer semanalmente la información guardada en los sensores durante el periodo de monitoreo.

- Se debe tomar una muestra de biogás, afluente y efluente antes de los 90 días del periodo de monitoreo.
- Se debe tomar una muestra de biogás, afluente y efluente durante los 90 días del periodo de monitoreo.

6. Metodología

La metodología del proyecto se basó en la realización de cada uno de los objetivos propuestos. Durante este periodo se realizó el monitoreo de las variables de temperatura, radiación solar, calidad del biogás, afluente y efluente para determinar el comportamiento térmico del digestor, evaluar la calidad del afluente, efluente y el rendimiento en la producción de biogás.

A continuación, se muestra la metodología que se siguió para el desarrollo del proyecto la cual se dividió en cuatro etapas. Las dos primeras etapas corresponden a la realización del primer objetivo específico y, las dos últimas etapas dan cumplimiento al segundo y tercer objetivo respectivamente.

- Rediseño e implementación del sistema de monitoreo de variables térmicas.
- Monitoreo de las condiciones iniciales de la calidad del biogás, afluente y efluente mediante la aplicación de metodologías estándar.
- Determinación del comportamiento térmico del digestor por medio del modelo matemático.
- Evaluación de la calidad del biogás, afluente y efluente antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación.

6.1. Rediseño e implementación del sistema de monitoreo de variables térmicas.

La primera etapa de este proyecto se centró en realizar un diagnóstico e implementación de mejoras en el sistema de monitoreo de iluminancia y temperatura en el suelo, ambiente, digestor e invernadero. Así mismo, se implementó un modelo para estimar los datos de la radiación solar global, directa y difusa.

El diagnóstico del sitio de operación del biodigestor consistió en una descripción detallada de los materiales de cada componente del sistema, sus dimensiones y las condiciones de operación. Al mismo tiempo se identificaron los sensores que ya estaban en uso antes del inicio

del proyecto para ser evaluados en función de los requisitos del sistema de monitoreo.

Esta evaluación inicial permitió comprender que se requerían cambios en los sensores por lo que se realizó una búsqueda de otras referencias comerciales. Cada una de estas referencias se calificó de acuerdo a criterios de selección ponderados en matrices Quality Function Deployment (QFD) y se seleccionaron aquellos que mejor cumplieran con los requerimientos del proyecto [Arroyave et al., 2007]. Los sensores seleccionados se adquirieron, se les realizaron pruebas de funcionamiento, se les asignó su ubicación operativa y fueron integrados al sistema. Con el sistema instalado se dio inicio a su operación registrando las temperaturas e iluminancia del sitio estudiado con una resolución de tiempo de una hora para cada día del periodo de monitoreo.

Finalmente, con los datos obtenidos de temperatura e iluminancia se realizó un panel de control (dashboard) que permitió observar los cambios en estas variables a través del tiempo de monitoreo y de esta forma hacer su respectivo análisis.

Por otro lado, para determinar la radiación global horaria se utilizó el modelo de Duffie y Beckman partiendo de la radiación global acumulada diaria de cada mes del periodo de monitoreo. Estos últimos datos se adquirieron del atlas de “RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA” del año 2017, reportados por el *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales* (IDEAM). En cuanto a la fracción de la radiación directa y difusa fue necesario conocer el factor de claridad del cielo, valor que se obtuvo de la iluminancia sensada.

6.2. Monitoreo de las condiciones iniciales de la calidad del biogás, afluente y efluente mediante la aplicación de metodologías estándar.

En la segunda etapa se llevaron a cabo dos tipos de análisis. En primer lugar, se realizó una caracterización fisicoquímica para evaluar las condiciones iniciales tanto del afluente como del efluente. El segundo análisis permitió comprender las condiciones iniciales en relación con la composición y calidad del biogás. Los datos obtenidos de ambos análisis fueron sometidos a una evaluación, lo que condujo a la toma de decisiones respecto a las modificaciones necesarias para la operación del digester durante el período de monitoreo de 90 días.

Para la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente el método de obtención de las

muestras fue el siguiente: Inicialmente se etiquetaron las botellas de muestra con información como: la fecha, hora y tipo de muestra (afluente o efluente). La muestra del afluente se tomó de la mezcla de agua y estiércol en donde fue necesario sumergir la botella para evitar la entrada de aire. Para la muestra del efluente, se utilizó un instrumento de apoyo de alambre que se introdujo hasta la profundidad del tubo de salida del digestor evitando la entrada de aire durante la recolección. Después de cada toma de muestra, se limpió cada botella para minimizar la contaminación cruzada. Finalmente, ambas botellas fueron empacadas para ser enviadas al Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Los parámetros fisicoquímicos caracterizados fueron:

- Se realizó la medición del pH mediante el método SM 4500 H + B.
- El contenido de materia orgánica se determinó en términos de SV y ST utilizando los métodos SM 2450 E y SM 2540, respectivamente, según lo establecido en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, también conocido como método gravimétrico [Jaimes-Estévez et al., 2020, Association et al., 2016].
- La DQO fue determinada a través de los métodos 5220 D, también conocido como método de reflujo cerrado [Jaimes-Estévez et al., 2020], incluido en la publicación del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, así como el método 410.4, parte de la publicación realizada por el *Environmental Monitoring Systems Laboratory* de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [Association et al., 2016].
- Para la determinación de los AGVs, se siguió el método publicado en el artículo *Determination of Bicarbonate and Total Volatile Acid Concentration in Anaerobic Digesters Using a Simple Titration* [UIS, 2015].

Para el análisis de la composición y la calidad del biogás la muestra se recolectó de la siguiente forma: En primer lugar se etiquetó la bolsa de muestreo *Tedlar* con capacidad de 1000 ml con la hora y fecha de recolección. Seguido a esto se desconectó la tubería que une la salida de gas del reactor con el medidor de gas y por medio de un instrumento de apoyo que constaba de dos acoples: el primero de ellos un tubo de PVC del diámetro de la tubería de la salida de gas del reactor y el segundo, una unión de una manguera de plástico con una aguja hipodérmica que se insertaba en la bolsa de muestreo permitiendo el paso del biogás. Luego de que la bolsa estuviese completamente llena se selló y se revisó que esta no tuviese ninguna fuga para finalmente enviarla al Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la Escuela

de Ingeniería Química de la UIS. Allí el análisis de la calidad del biogás involucró el uso de cromatografía de gases, un proceso en el que se cuantifican las concentraciones de metano y dióxido de carbono presentes en el gas generado por el biodigestor.

Luego de obtener los resultados del análisis del afluente, efluente y biogás, se procedió a realizar una evaluación de estos datos junto con las condiciones de operación inicial del biodigestor. A partir de esta evaluación, se tomaron decisiones para introducir modificaciones en las condiciones operativas destinadas a optimizar el rendimiento del sistema durante el periodo de monitoreo. En primer lugar, se redujo el TRH teniendo en cuenta que para temperaturas entre 25 y 20°C generalmente este parámetro varía entre 35 y 65 días [Jaimes-Estévez et al., 2020]. Luego de ajustar el TRH se despejó de la ecuación 3-1 la CO para calcular la carga diaria necesaria que debía alimentar al biodigestor. Este enfoque buscó establecer un equilibrio óptimo en el proceso de DA y mejorar la eficiencia de la conversión de materia orgánica en biogás.

6.3. Determinación del comportamiento térmico del digestor por medio del modelo matemático.

La tercera etapa se centró en determinar el comportamiento térmico del digestor partiendo de la utilización de los datos recopilados de la temperatura ambiente durante el período de monitoreo, así como los datos de la radiación solar. Lo anterior con el fin de analizar la transferencia de calor entre los elementos del sistema y como esto influyó en las temperaturas, en especial, la temperatura del lodo del digestor.

Para llevar a cabo este análisis, se procedió en primera instancia a examinar detenidamente el modelo térmico matemático desarrollado por Perrigault et al. (2012). Posteriormente, se realizó la identificación de diversos softwares de programación que podrían ser empleados para desarrollar el código del modelo térmico. Cada uno de estos programas fue sometido a una evaluación rigurosa, basada en criterios de selección ponderados en matrices QFD, con el fin de determinar el software que mejor se ajustara a los requisitos específicos del proyecto [Arroyave et al., 2007].

Una vez que se seleccionó el software, se procedió a formular cada una de las funciones necesarias y a introducir las variables de entrada pertinentes en el modelo. Estas variables incluyen, además de las ya mencionadas:

- La latitud y orientación del sistema.

6.4 Evaluación del rendimiento de la producción de biogás y la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación

- Los datos geométricos y de materiales seleccionados para el sistema.
- La velocidad del viento.

Posteriormente, la programación dió como resultados los datos de temperatura de todos los elementos del sistema y las ganancias solares de las paredes del invernadero, la cubierta del invernadero y su membrana de retención (manga) para los tres meses del periodo de monitoreo.

6.4. Evaluación del rendimiento de la producción de biogás y la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación.

La etapa final de esta metodología consistió en la evaluación del desempeño de la producción de biogás y la calidad del afluente y efluente en comparación con las condiciones iniciales. Además, se llevó a cabo un análisis de la respuesta térmica del biodigestor ante las modificaciones en las condiciones operativas.

Para lograr esto, se procedió con una segunda caracterización fisicoquímica con el fin de evaluar las condiciones tanto del afluente como del efluente después de implementar las modificaciones. Este análisis también se realizó en el Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS. Los parámetros fisicoquímicos caracterizados al igual que en la primera caracterización fueron: el pH, SV, ST, DQO y AGVs. Adicionalmente, se caracterizó la calidad del biogás a través de la medición del porcentaje de metano y dióxido de carbono presentes en el gas, como un indicador clave de su composición.

La caracterización del desempeño del digestor se calculó en términos de PDB, PEB, PEM, VPB, reducción en la DQO y reducción de ST como Jaimes-Estévez (2020) lo realizó en su investigación.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis del rendimiento del proceso de digestión en el biodigestor en relación con su comportamiento térmico. Este análisis se fundamentó en: (a) cómo influyeron las temperaturas de cada elemento del sistema en la calidad del biogás, afluente y efluente y (b) la energía que se logra recuperar del biogás luego de los cambios aplicados en los parámetros de operación del digestor.

7. Resultados y Discusión

7.1. Rediseño e implementación del sistema de monitoreo de variables térmicas.

Previo a la implementación del monitoreo de temperaturas, iluminancia y radiación solar se realizó una exploración en el sitio de operación del biodigestor, la Escuela de Caballería del Cantón Norte el día 8 de septiembre del 2022. De esta observación se identificaron los siguientes aspectos clave:

1. Descripción del sitio de operación.

Biodigestor tubular de bajo costo adecuado en un invernadero de techumbre curva de polietileno de baja densidad traslúcido (LDPE) cuyas dimensiones son 3,15 *m* de ancho, 4,43 *m* de largo y 1,68 *m* de alto. El biodigestor cuenta con un reactor anaeróbico de polietileno linear de baja densidad negro (LLDPE) de 8 *m*³ de volumen total y 5,6 *m*³ de volumen de operación donde se produce el biogás que posteriormente pasa por un medidor de gas y se almacena en un colector de plástico.

2. Operación del biodigestor.

El digestor se carga tres veces por semana con una combinación de 25 kg de estiércol y 125 L de agua, manteniendo una relación de proporción de 1:5 y un TRH de 84 días.

3. Sensórica.

En el biodigestor se han instalado cuatro sensores registradores de datos que efectúan mediciones de temperatura, mientras que uno de ellos también registra los niveles de iluminancia. Estos están configurados para que registren los datos cada hora. La ubicación y las especificaciones técnicas de los sensores se muestran en la tabla **7-1**.

Nombre	Datos	Ubicación	Equipo	Resolución	Precisión
T_{amb}	Temperatura ambiente	Fuera del invernadero	Registrador de datos a prueba de agua HOBO UA-001-08 Pendant	0.14 °C	± 0.53 °C de 0° to 50°C
T_{int}/I_{int}	Temperatura e iluminancia del invernadero	Interior del invernadero	Registrador de datos a prueba de agua HOBO UA-002-64 Pendant	0.14 °C	± 0.53 °C de 0° to 50°C
T_d	Temperatura del digestor	Dentro del digestor	Registrador de datos a prueba de agua HOBO UA-001-08 Pendant	0.14 °C	± 0.53 °C de 0° to 50°C
T_s	Temperatura del suelo	Enterrado en el suelo	Registrador de datos a prueba de agua HOBO UA-001-08 Pendant	0.14 °C	± 0.53 °C de 0° to 50°C

Tabla 7-1.: Ubicación y características de los sensores.

Después de realizar la exploración del sitio donde se encuentra el biodigestor y de comprender su operación y funcionamiento, se procedió a evaluar los sensores implementados, comparándolos con otras dos referencias comerciales. El propósito de esta evaluación era seleccionar los sensores que mejor se adecuaban a los requisitos del proyecto. Para llevar a cabo este proceso, se consideraron los requerimientos planteados para el sistema de monitoreo. De esta manera, se establecieron criterios de selección basados en matrices de decisión QFD [Arroyave et al., 2007]. Estos criterios de selección se evaluaron en una escala de 1 a 9, donde 1 representaba un bajo o nulo cumplimiento del criterio, 3 indicaba un cumplimiento moderado y 9 significaba un cumplimiento completo del criterio.

Sensores de temperatura

Los criterios de para la selección de los sensores de temperatura fueron los siguientes:

- El sensor debe ser resistente a la humedad.
- El sensor debe ser resistente a la corrosión.
- El sensor debe tener un mínimo rango de temperatura de 0 °C a 50 °C.
- El sensor debe tener una precisión máxima de ± 0.5 °C.
- El sensor debe tener una resolución máxima de 0.14 °C.
- El sensor debe registrar la temperatura en un intervalo mínimo de 1 hora.
- El sensor no debe depender de una fuente externa de alimentación para su funcionamiento.

- El usuario debe obtener los datos registrados del sensor sin trasladarlo de su sitio de operación.
- El precio del sensor debe ser mínimo de 40 \$USD y máximo de \$100 USD.
- La adquisición del sensor no debe superar un tiempo máximo de 3 meses a la fecha de la compra.

Las características y especificaciones técnicas de los sensores de temperatura son los siguientes:

A. HOBO UA-001-08 Pendant.

Los sensores HOBO UA-001-08 Pendant de la marca ONSET son resistentes al agua y pueden sumergirse hasta 30 metros de profundidad, manteniendo su funcionamiento en un rango de temperatura que va desde $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [ONSET, 2022b]. Están protegidos por un estuche de polipropileno que ofrece resistencia química a ácidos fuertes y bases fuertes [Braskem, 2022]. Estas características hacen que los sensores sean adecuados para entornos corrosivos como el interior de un digestor con sulfuro de hidrógeno [Varnero-Moreno, 2011]. Tienen una resolución de $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, una precisión de $\pm 0.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un intervalo mínimo de registro de 1 minuto. La alimentación proviene de una batería reemplazable de 3V con una duración típica de un año [ONSET, 2022b].

La obtención de los datos se realiza a través de una estación base HOBO Optic USB y el software HOBOWare Pro. Sin embargo, para acceder a los datos, los sensores deben ser trasladados de su ubicación operativa, lo que puede resultar tedioso en algunos casos. Los productos ONSET son de una empresa estadounidense y su adquisición se realiza a través de proveedores, con un tiempo estimado de entrega de 60 a 90 días. Actualmente, el precio aproximado de los sensores HOBO UA-001-08 Pendant en el mercado es de 55 dólares estadounidenses.

B. HOBO MX 2201.

El sensor HOBO MX 2201, al igual que el HOBO UA-001-08 Pendant, es de la marca ONSET y comparte las mismas características de resistencia al agua y a ambientes corrosivos, así como la capacidad de funcionar en un rango de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tiene una resolución de $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en ese rango. El intervalo mínimo de registro es de 1 minuto, y su alimentación se basa en una batería reemplazable de 3V con una duración típica de un año [ONSET, 2022a].

La obtención de datos se realiza a través de Bluetooth, permitiendo una comunicación inalámbrica con dispositivos inteligentes mediante la aplicación HOBOMobile. Esta característica simplifica la recopilación de datos de temperatura sin necesidad de mover los sensores de su ubicación actual. Dado que ONSET es un fabricante internacional, la adquisición de estos sensores a través de proveedores puede tomar entre 60 y 90 días, y su precio en el mercado es aproximadamente de 64 dólares estadounidenses.

C. PT100.

Los sensores PT100 son resistentes a medios ácidos [Ogussa, 2009] y pueden operar en entornos acuosos o húmedos. Tienen un amplio rango de temperatura de $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $630\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una resolución de hasta $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un margen de error que varía de $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Corona et al., 2014]. Para medir la temperatura con estos sensores, se requiere diseñar circuitos electrónicos, generalmente utilizando puentes Wheatstone y amplificadores operacionales. Además, se utilizan microcontroladores o registradores de datos para procesar y registrar la información eléctrica en variables de temperatura [Morcelle del Valle, 2018]. Entonces, es necesario diseñar e implementar sistemas de alimentación eléctrica para el funcionamiento de los circuitos teniendo en cuenta que en el sitio de operación del biodigestor no hay disponibilidad de energía eléctrica.

Los sensores PT100 se encuentran disponibles a nivel nacional e internacional, siendo de fácil adquisición con tiempos de entrega que van desde días hasta semanas. Sus precios en el mercado varían significativamente, oscilando entre 5 y 68 dólares estadounidenses, dependiendo de las características específicas de los sensores y las aplicaciones para las que están diseñados.

Teniendo en cuenta las características de cada sensor descrito anteriormente se hicieron las ponderaciones en las matrices QFD de acuerdo a los criterios planteados. A continuación se muestra los resultados de la matriz del sensor seleccionado en la tabla **7-2**, las demás matrices pueden ser consultadas en el Anexo A.

		Resistencia al agua	Rango de pH	Rango de temperatura	Precisión	Resolución máxima	Duración de batería	Costo del sensor	Tiempo de obtención	Método de obtención de los datos	Intervalo de registro	
Que sea resistente al agua	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que sea resistente a la corrosión	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que pueda soportar un ambiente con presencia de humedad	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que tenga un amplio rango de temperatura	5	0	0	9	9	9	9	3	0	0	0	
Que tenga alta precisión	5	0	0	1	9	3	0	3	0	0	0	
Que la forma de obtener los datos registrados del sensor sea sin trasladarse del sitio de operación	4	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	
Que tenga un tiempo de respuesta corto	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
Que sea asequible	5	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
Que sus costo no sea elevado	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Que la batería no dependa de una fuente externa	5	0	0	0	0	0	9	3	0	0	0	
Importancia	Absoluta	159	159	74	114	84	114	130	24	21	21	900
Valores técnicos meta		Si	0-14	0 a 50 °C	±0.5°C	0,14°C	≥ 1 año	180.000-500.000	2 -3meses	Trasladar el sensor	≥15 minutos	

Tabla 7-2.: Matriz QFD para el sensor HOBO MX 2201.

El sensor de temperatura seleccionado para el sistema de monitoreo y que obtuvo el mayor puntaje fué el sensor HOBO MX 2201 con un valor de 900 puntos seguido del PT100 y del HOBO UA-001-08 Pendant con 859 puntos y 834 puntos respectivamente.

Sensores de iluminancia.

Los criterios de para la selección de los sensores de iluminancia fueron los siguientes:

- El sensor debe ser resistente a la humedad.
- El sensor debe ser resistente a la corrosión.

- El sensor debe tener un mínimo rango de iluminancia de 40 a 20.000 lux.
- El sensor debe tener una precisión máxima de $\pm 10\%$.
- El sensor debe registrar la iluminancia en un intervalo mínimo de 1 hora.
- El sensor no debe depender de una fuente externa de alimentación para su funcionamiento.
- El usuario debe obtener los datos registrados del sensor sin trasladarlo de su sitio de operación.
- El precio del sensor debe ser mínimo de 40 \$USD y máximo de \$100 USD.
- La adquisición del sensor no debe superar un tiempo máximo de 3 meses a la fecha de la compra.

Las características y especificaciones técnicas de los sensores de iluminancia son los siguientes:

A. HOBO UA-002-64.

El sensor ONSET HOBO UA-002-64 es un registrador de datos que puede medir dos variables físicas: temperatura e iluminancia. Sus especificaciones técnicas para la medición de temperatura son idénticas a las del sensor HOBO UA-001-08. En cuanto a la iluminancia, este sensor puede medirla en un rango que va desde 0 hasta 320,000 lux, con un intervalo mínimo de registro de 1 segundo. Utiliza una batería reemplazable de litio de 3V 2032, que tiene una duración de un año si se toman datos cada minuto. Además, cuenta con un estuche de polipropileno que le brinda protección contra la corrosión y puede ser sumergido en agua, lo que lo hace resistente a la humedad [ONSET, 2022c].

La obtención de los datos registrados se realiza a través de una estación base HOBO Optic USB, que permite transferir los datos del sensor a un ordenador para su visualización en el software HOBOWare Pro [ONSET, 2022c]. Sin embargo, este método requiere que los sensores sean removidos de su ubicación actual para obtener la información registrada. La adquisición de estos sensores, al tratarse de una marca internacional, puede demorar de 30 a 90 días según los proveedores del mercado y su precio de adquisición es de aproximadamente 74 dólares estadounidenses.

B. HOBO MX 2202.

El sensor de la marca ONSET, similar al HOBO UA-002-64, es capaz de registrar datos de temperatura e iluminancia. Para la temperatura, sus especificaciones técnicas coinciden con las del sensor HOBO MX 2201. En cuanto a la iluminancia, mide en unidades de lux (SI) con un rango de detección de 0 a 167,731 lux, una precisión de $\pm 10\%$, y un intervalo de registro mínimo de 1 segundo. Este sensor comparte características con otros sensores de ONSET, incluyendo la alimentación a través de una batería reemplazable de 3V 2023 y la capacidad de resistir ambientes corrosivos o sumergirse en agua [ONSET, 2022a].

Los sensores HOBO de la línea MX tienen la ventaja de la comunicación inalámbrica a través de Bluetooth Low Energy o Smart, permitiendo el control y la obtención de datos de forma remota desde un celular inteligente mediante la aplicación HOBOMobile o desde un ordenador mediante el software HOBOWare Pro [ONSET, 2022a]. Esta característica facilita la medición de iluminancia sin necesidad de mover el sensor de su ubicación original. El precio de adquisición de este registrador de datos es de aproximadamente 80 dólares estadounidenses, y el tiempo de entrega después de la compra varía de 30 a 90 días.

C. Luxómetro PCE-174.

El luxómetro de la marca PCE Instruments es un registrador de datos que mide iluminancia en un amplio rango, desde 40.00 lux hasta 400.0 klux, con una precisión de $\pm 5\%$ para iluminancias menores a 10,000 lux y $\pm 10\%$ para valores mayores. El dispositivo puede registrar la iluminancia en intervalos mínimos de 2 segundos y se alimenta mediante una batería reemplazable de 9V. Puede operar en temperaturas que van desde $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una humedad relativa máxima del 70%. Además, es adecuado para aplicaciones agrícolas [PCE-Instruments, 2022].

Los datos registrados por el PCE-174 pueden transferirse a un ordenador mediante un cable USB tipo 2.0 y ser visualizados a través del software proporcionado por PCE Instruments [PCE-Instruments, 2022]. Sin embargo, esta característica implica que el usuario deba mover el luxómetro del lugar de medición. A pesar de ser un producto importado, se encuentra disponible en menos de 30 días hábiles, aunque su precio en el mercado es de aproximadamente 430 dólares estadounidenses.

Habiendo hecho la descripción de los sensores, se hicieron las ponderaciones en las matrices de acuerdo a los criterios planteados. A continuación se muestran los resultados de la matriz

del sensor seleccionado en la tabla 7-3. Las demás matrices se pueden consultar en el Anexo A de este documento.

		Resistencia al agua	Rango de pH	Rango de iluminancia	Precisión	Duración de batería	Costo del sensor	Tiempo de obtención	Método de obtención de los datos	Intervalo de registro	
Que sea resistente al agua	5	9	9	0	0	0	3	0	0	0	
Que sea resistente a la corrosión	5	9	9	0	0	0	3	0	0	0	
Que pueda soportar un ambiente con presencia de humedad	5	9	9	0	0	0	3	0	0	0	
Que tenga un amplio rango de temperatura	5	0	0	9	3	9	3	0	0	0	
Que tenga alta precisión	5	0	0	1	9	0	3	0	0	0	
Que la forma de obtener los datos registrados del sensor sea sin trasladarse del sitio de operación	4	0	0	0	0	0	3	0	3	0	
Que tenga un tiempo de respuesta corto	4	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
Que sea asequible	5	3	3	3	1	3	3	3	0	0	
Que sus costo no sea elevado	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Que la batería no dependa de una fuente externa	5	0	0	0	0	9	3	0	0	0	
Importancia	Absoluta	159	159	74	74	114	130	24	21	21	776
Valores técnicos meta		Si	0-14	40 a 20.000 lux	±10 %	≥ 1 año	180.000-500.000	2 -3meses	Trasladar el sensor	1 hora	

Tabla 7-3.: Matriz QFD para el sensor HOBO MX 2202.

El sensor de iluminancia con el mayor puntaje y, por lo tanto, seleccionado para el sistema de monitoreo fué el sensor HOBO MX 2202 con un total de 776 puntos luego del sensor HOBO UA-002-64 con 740 puntos y del PCE-174 con 524 puntos.

Diseño de la ubicación de los sensores en la planta del biodigestor

Para llevar a cabo el análisis de temperatura e iluminancia en el sitio de operación del biodigestor, se adoptó la disposición de sensores indicada en la figura 7-1. En esta disposición, el sensor de temperatura ambiente (T_{amb}) fue colocado en el exterior del invernadero, expuesto a las condiciones atmosféricas, con el objetivo de trazar el perfil térmico del entorno circundante. El sensor de temperatura e iluminancia en el interior del invernadero (T_{int} e I_{int}), en cambio, fue colocado en la curvatura del techo, una ubicación estratégica que permitió capturar las variaciones de la temperatura del aire en el interior y registrar la incidencia de la luz solar.

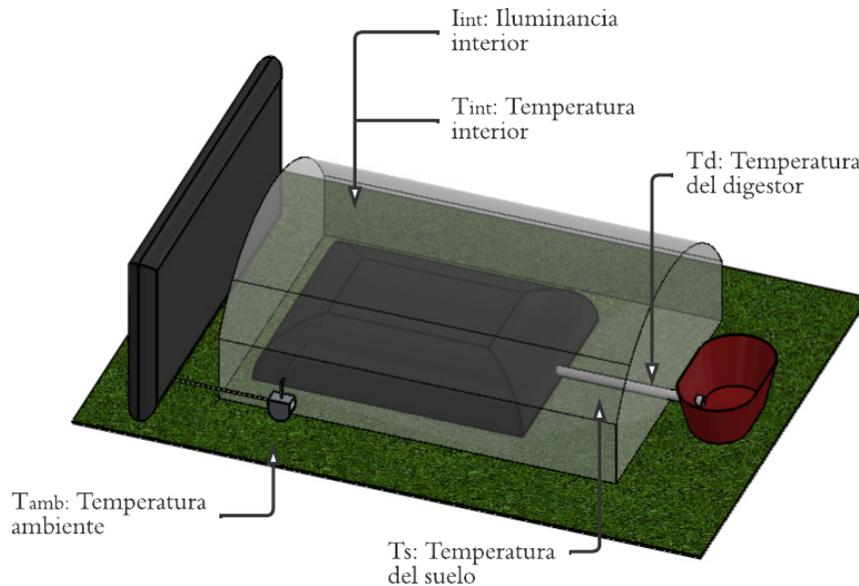


Figura 7-1.: Esquema del digestor y ubicación de los sensores de temperatura e iluminancia.

Para medir la temperatura en el interior del digestor (T_d), se posicionó un sensor en el interior del reactor, a una profundidad de 1 metro desde el nivel del suelo. Esta ubicación específica se seleccionó con el fin de medir la temperatura en la suspensión donde se lleva a cabo el proceso de DA. Finalmente, el sensor de temperatura del suelo (T_s) se ubicó a una profundidad de 1 metro bajo la superficie terrestre. Esta posición permitió establecer una referencia para evaluar las ganancias o pérdidas de calor en el sistema.

La configuración de los sensores se llevó a cabo de manera que registraran datos cada 60 minutos, resultando en un total de 24 registros diarios.

En la siguiente tabla 7-4 se presenta un resumen de los sensores seleccionados, el parámetro que miden y su ubicación correspondiente.

Nombre	Datos	Ubicación	Equipo
T_{amb}	Temperatura ambiente	Exterior del invernadero (intemperie)	Registrador de datos HOBO MX 2201
T_{int}/I_{int}	Temperatura e iluminancia en el invernadero	Interior del invernadero (curvatura del techo)	Registrador Registrador de datos HOBO MX 2202
T_d	Temperatura del digestor	Dentro del digestor (1 m de profundidad)	Registrador de datos HOBO MX 2201
T_s	Temperatura del suelo	Enterrado en suelo (1 m de profundidad)	Registrador de datos HOBO MX 2201

Tabla 7-4.: Ubicación de los sensores seleccionados

Tras finalizar el proceso de selección y diseño de la ubicación de los sensores, se procedió a adquirirlos a través de la empresa proveedora de la marca HOBO en Colombia, en este caso, InSak. Se llevaron a cabo todos los trámites necesarios para la compra. Dado que los sensores requerían importación, se experimentó un periodo de espera de aproximadamente dos meses. Durante este intervalo, se aprovechó para recibir la capacitación pertinente destinada a familiarizarnos con su manejo. Una vez concluido el plazo de espera y en posesión de los sensores, se llevó a cabo una serie de pruebas destinadas a verificar el funcionamiento correcto y conforme a sus especificaciones. A continuación se describen todas las pruebas realizadas al sistema de sensores de este proyecto:

El primer conjunto de pruebas se centró en establecer la conexión entre los sensores y la aplicación móvil, que opera a través de Bluetooth. Para llevar a cabo esto, aseguramos que los sensores estuvieran transmitiendo su señal correspondiente, lo cual se indicaba mediante una luz roja emitida por ellos. Esta señal luminosa denotaba que los sensores estaban listos para ser emparejados con cualquier dispositivo móvil. Posteriormente, se abrió la aplicación *HOBOconnect* para conectar los sensores y verificar que cada uno de ellos apareciera en la lista de dispositivos conectados.

El segundo grupo de pruebas tuvo como objetivo verificar la visualización de los datos. Para lograr esto, se posicionaron los sensores en sus respectivas ubicaciones designadas. Cada sensor fue configurado para registrar datos cada 60 minutos, marcando el inicio de un periodo de prueba. Durante una semana, se recolectaron datos de temperatura e iluminancia. La conexión se había establecido de manera adecuada, por lo que al final del período de prueba se observaron datos de temperatura actualizados en este intervalo de tiempo predefinido.

El último conjunto de pruebas se enfocó en garantizar la coherencia de los valores capturados por los sensores durante el período de evaluación, con el propósito de asegurar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos. Para llevar a cabo esto previamente se realizó una búsqueda del rango de temperaturas que se esperaba medir con los sensores en función del entorno en el que se encuentra el biodigestor. Además, se realizó una comparación con los valores obtenidos por los sensores que en un inicio estaban instalados y de esta forma asegurarnos que los datos de los nuevos sensores coincidieran con los registros anteriores.

Los resultados obtenidos de estas pruebas nos llevaron a la conclusión de que el desempeño de los sensores cumplió con los requerimientos establecidos. Validación que nos brindó la base necesaria para dar inicio al período de monitoreo.

Diseño y desarrollo del dashboard.

Para la representación de los datos adquiridos por los sensores, se diseñó y desarrolló un panel de control (dashboard) que le permite al usuario observar la evolución de las variables de temperatura e iluminancia en el biodigestor.

El enfoque principal en el diseño del panel fue optimizar la forma de presentar los resultados, con el propósito de brindar a los usuarios una experiencia altamente satisfactoria al interactuar con el panel. Con este fin, se involucró activamente a los usuarios en el proceso de diseño. Se generaron cinco diseños distintos y se sometieron a evaluación mediante una encuesta realizada en Google Forms. En esta encuesta, cada diseño recibió una calificación en un rango del 1 al 5, donde 5 representaba la calificación más alta en términos de simplicidad e intuición de la interfaz, y 1 la calificación más baja. Los resultados detallados de cada diseño evaluado se encuentran en el Anexo B.

Al analizar los resultados obtenidos, se pudo concluir que el diseño número 5, mostrado en la figura 7-2, resulta en una experiencia más sencilla, eficiente y gratificante para los usuarios al momento de observar las variaciones de temperatura e iluminancia en el sistema.

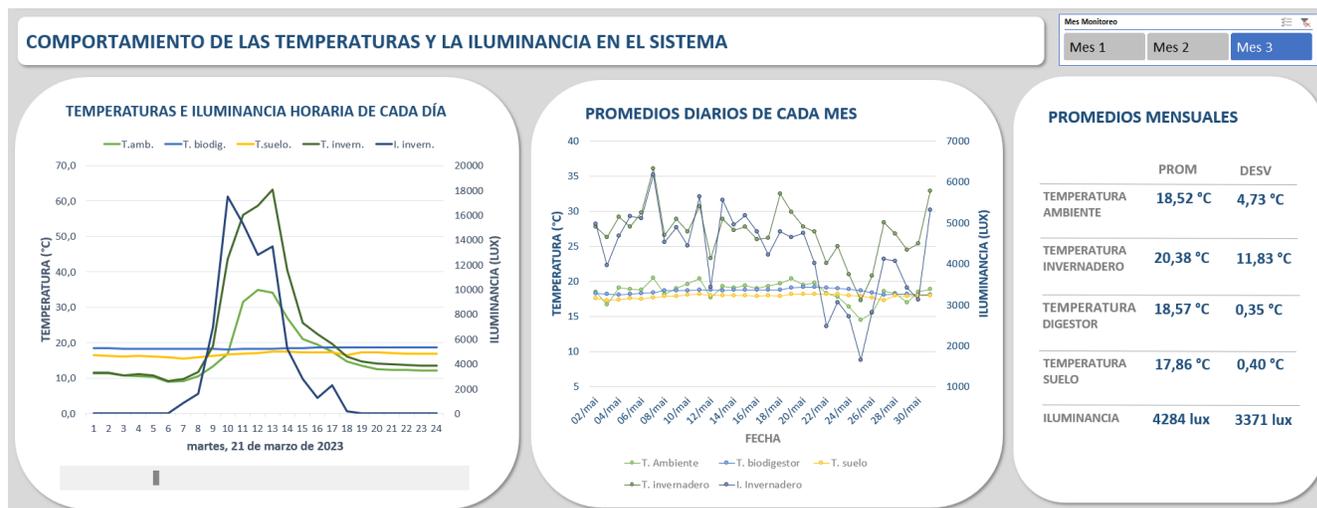


Figura 7-2.: Diseño del panel de control (dashboard).

Este diseño se construyó en Excel a partir de la información obtenida de los sensores usados en el sistema de monitoreo. Los sensores arrojaban archivos de extensión .csv los cuales facilitaban su tratamiento y análisis estadístico en el programa de hojas de cálculo empleado. Gracias a las funciones y herramientas del programa, el panel de control mostró la información gráfica e interactiva en tres secciones. La sección denominada “Temperaturas e iluminancia horaria de cada día” como su nombre lo dice, permitía graficar las variables sensadas las 24 horas para un día en específico determinado por el usuario. La sección “Promedios diarios de cada mes” presentaba una gráfica interactiva la cual mostraba la media diaria de cada variable en el mes seleccionado. En la última sección llamada “Promedios mensuales” por medio de una tabla interactiva se enseñaba la media y su desviación estándar de cada variable en un mes determinado también por el usuario.

Gracias a esta herramienta gráfica se pudo observar las variaciones de las temperaturas y de la iluminancia durante los tres meses que comprendió el periodo de monitoreo. En la figura 7-3 se observa el comportamiento de las temperaturas e iluminancia del sistema para una semana.

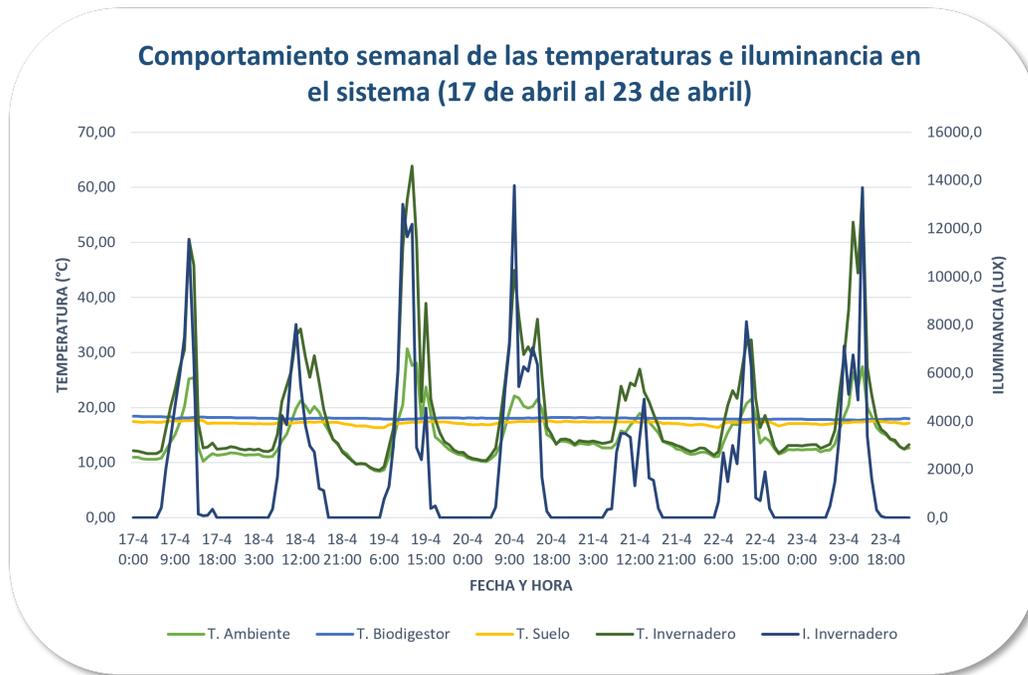


Figura 7-3.: Comportamiento de temperaturas e iluminancia del digester del 17 al 23 de abril de 2023.

Al analizar las gráficas provistas por el dashboard, uno de los aspectos importantes que se pueden considerar es el de la temperatura del invernadero respecto a la temperatura ambiente. Esta temperatura llegó a alcanzar valores por encima de los 40 °C y se mantuvo superior a la temperatura ambiente entre las 6 de la mañana y las 6 de la tarde, fuera de este rango, la temperatura del invernadero comenzaba a igualarse a la temperatura ambiente. Esta fluctuación en la temperatura del invernadero explicó el porqué de su alta desviación estándar a comparación de las demás temperaturas.

Siguiendo con el análisis de estas dos temperaturas, la del ambiente y la del invernadero, también se pudo observar que estas variaban con la misma tendencia que lo hacía la iluminancia, esto se relaciona con el hecho de que, a mayor iluminancia en el sistema, se tenía una mayor cantidad de radiación directa, por lo tanto, mayores temperaturas.

En el caso de las temperaturas del suelo y del lodo del digester, estas se mostraron con una menor variabilidad en el tiempo, por ejemplo, durante los tres meses del periodo de monitoreo, la desviación estándar de estas variables no superó al menos 1 °C. En el caso de la temperatura del suelo, este comportamiento se puede explicar gracias a que este tiene inercia térmica y a profundidades mayores a 50 cm solo existen pequeñas variaciones en su

temperatura [Matiz-León et al., 2019]. En cuanto a la temperatura del lodo del digestor, esta estabilidad se relaciona con transferencias de calor que se dan en términos de ganancias y pérdidas entre los elementos del sistema.

Sin embargo la temperatura del lodo antes de aplicar las modificaciones en las condiciones de operación era de aproximadamente 20°C en comparación con las condiciones actuales, donde la temperatura del lodo se mantuvo en 18,53°C en promedio. Aunque la temperatura del lodo disminuyó ligeramente, el rango de 18°C sigue siendo adecuado para la DA, especialmente si se considera el TRH más corto. La reducción del TRH pudo haber compensado la disminución de la temperatura al acelerar la cinética de la digestión.

El aumento en la cinética de la DA se produce al acelerar la velocidad a la que se descomponen los sustratos orgánicos en compuestos más simples y, por lo tanto, aumenta la producción de biogás. Con un TRH más corto, la materia orgánica pasa menos tiempo dentro del biodigestor antes de ser expulsada. Esto significa que se alimenta el biodigestor con mayor frecuencia y se expulsan los productos finales (biogás y digestato) más rápidamente [Timmerman et al., 2015]. Esta mayor frecuencia de alimentación y expulsión estimula una mayor actividad microbiana, ya que las bacterias anaeróbicas responsables de la digestión se vuelven más activas cuando se les proporcionan sustratos con mayor frecuencia. Tienen menos tiempo para descansar entre las alimentaciones, lo que acelera la descomposición de los sustratos.

Adquisición de los datos de radiación solar horaria en Bogotá.

Para obtener los datos de la radiación solar se recurrió al atlas de “Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia” del año 2017, proporcionado por el IDEAM [IDEAM, 2017]. Dicho atlas albergaba los valores promedio de irradiación global horaria para cada uno de los meses que abarcó el período de monitoreo (marzo, abril y mayo). Con estos datos y empleando el modelo de Duffie y Beckman, el cual permite estimar la radiación solar en función de parámetros geográficos y temporales, se calculó la irradiación horaria para cada día monitoreado por el sistema con la ecuación 3-8.

Luego de recolectar los datos de irradiación global para cada hora a lo largo de los 90 días de monitoreo, se procedió a calcular la fracción de radiación directa utilizando el factor de claridad del cielo. Este factor se obtuvo como el cociente de la iluminancia horaria medida con la iluminancia máxima que podría alcanzarse en condiciones de cielo completamente despejado, utilizando los registros del sensor del sistema de monitoreo. Una vez determinada la fracción de radiación directa, se procedió a calcular la fracción de radiación difusa restando esta última de la radiación global medida, lo que nos permitió desglosar la radiación solar

en sus componentes directos y difusos.

Los cálculos efectuados para obtener los valores de radiación global, directa y difusa para cada hora del día durante el período de monitoreo están detallados en el archivo Excel adjunto titulado “*Radiación solar horaria en Bogotá*”.

La figura 7-4 presenta un gráfico que ilustra el comportamiento de la radiación solar global, directa y difusa durante el día 47 del período de monitoreo en la Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá. Esta gráfica revela una dinámica interesante entre la radiación difusa y la radiación directa a lo largo del día.

En la gráfica, se observa que la radiación difusa supera a la radiación directa en ciertos momentos del día. Este comportamiento está relacionado con la idea de que durante esos intervalos, la atmósfera pueda estar cargada con partículas dispersantes, tales como nubes o aerosoles, que ocasionan una mayor dispersión de la radiación directa, resultando en un incremento de la radiación difusa.

No obstante, se observa un declive en la radiación difusa conforme la radiación directa alcanza su punto máximo alrededor de las 11 de la mañana. Esta tendencia sugiere que en ese instante, el sol se encuentra en su cenit, generando una radiación directa más intensa. Paralelamente, se percibe que la radiación directa disminuye a medida que la radiación difusa llega a su cúspide alrededor de las 2 de la tarde. Este fenómeno podría estar vinculado a una mayor dispersión de la radiación directa, influenciada por factores atmosféricos presentes en ese momento del día.

Este comportamiento específico se manifestó de manera recurrente a lo largo de todo el período de monitoreo. Durante las horas diurnas, se observó consistentemente que la radiación directa alcanzaba valores superiores en el rango de las 10 de la mañana a las 12 del mediodía. En otras palabras, cuando se analizan las gráficas, las diferencias entre las dos formas de radiación no resultan tan pronunciadas en estos intervalos.

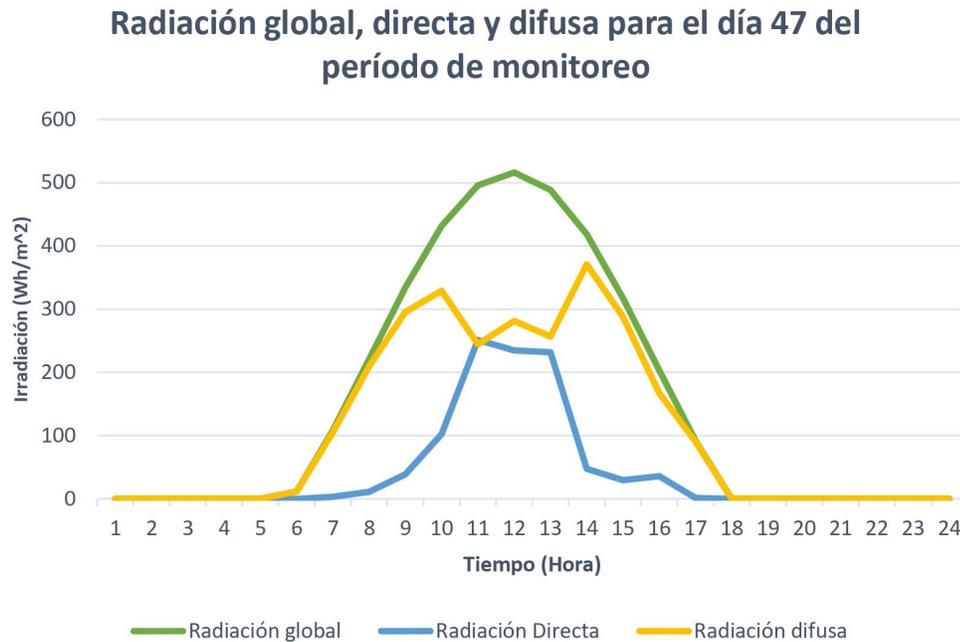


Figura 7-4.: Radiación global, directa y difusa para el día 47 del periodo de monitoreo.

Considerando que estos datos abarcan los meses de marzo, abril y mayo, se pueden extraer ciertas conclusiones acerca de la radiación solar durante este trimestre. La presencia de un patrón recurrente sugiere que la dinámica atmosférica y la posición del sol juegan un papel esencial en la distribución de la radiación. La tendencia de mayor radiación directa en las horas matutinas puede indicar que durante estos meses, el sol alcanzó ángulos más óptimos para la emisión de radiación directa en ese período del día. Esto podría estar relacionado con la elevación gradual de la posición solar hacia su punto máximo alrededor de estas horas.

No obstante, es importante recordar que este análisis es específico para los meses de marzo, abril y mayo en la ubicación de estudio. Cualquier variación estacional y climática podría tener influencia en las tendencias observadas. Por lo tanto, estos resultados sugieren que durante estos tres meses, la radiación solar directa tiende a ser más prominente durante las horas matutinas, mientras que la radiación difusa muestra cierta variabilidad que podría estar relacionada con las condiciones atmosféricas locales y la interacción con la radiación solar directa.

7.2. Monitoreo de las condiciones iniciales de la calidad del biogás, afluente y efluente mediante la aplicación de metodologías estándar.

El monitoreo de las condiciones iniciales de la calidad del biogás, afluente y efluente mediante la aplicación de metodologías estándar fue esencial para obtener una comprensión del estado inicial del sistema. Este proceso se realizó con el objetivo de establecer una línea base que sirvió como punto de referencia para evaluar los cambios en el rendimiento del digestor.

Monitoreo de la calidad del afluente y efluente.

Los resultados de la caracterización fisicoquímica para evaluar las condiciones iniciales tanto del afluente como del efluente en términos de ST, SV, DQO, AGVs y pH realizados en el Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la UIS se muestran en la tabla 7-5

Fecha	Parámetro	Unidad	Muestra	
			Afluente	Efluente
14/02/22	ST	g/kg	27,11±1,5	1,78±0,06
	SV	g/kg	22,87±1,56	0,9±0,005
	DQO	gDQO/L	14,25±5,90	3,56±0,19
	AGVs	mgCaCO ₃ /L	920±70	480±0,0
	pH	-	6,6±0,05	7,45±0,03

Tabla 7-5.: Resultados de la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente.

Monitoreo de la calidad del biogás.

Los resultados de la cuantificación de metano y dióxido de carbono, que se llevó a cabo para evaluar las condiciones iniciales del biogás generado por el digestor, se muestran en la tabla 7-6.

Muestra de Biogás			
Componente	Formula	Unidades	Resultados
Metano	CH ₄	% Molar	60,54±0,21
Dióxido de Carbono	CO ₂		39,46±0,21
Sulfuro de Hidrogeno	H ₂ S	ppm	< 500

Tabla 7-6.: Calidad del biogás

Luego de obtener los resultados del análisis del afluente, efluente y biogás, se procedió a realizar una evaluación de estos datos junto con las condiciones de operación inicial del biodigestor. En primer lugar, se observó que el contenido de metano en el biogás era del 60,54 %, un valor adecuado para garantizar una combustión eficiente y un óptimo rendimiento energético, como se establece en [Varnero-Moreno, 2011]. Sin embargo, al calcular la producción específica de biogás utilizando la ecuación (3-2), se obtuvo un valor de 0,077 Nm³/kgSV*d, lo que indicaba una eficiencia reducida en la conversión de materia orgánica en biogás.

Para mejorar la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y potenciar la producción de biogás, se tomaron decisiones en relación a las condiciones operativas del biodigestor. Inicialmente, se operaba con una CO de 66,67 L/d y un TRH de 84 días. Con el objetivo de optimizar el rendimiento del sistema, se decidió reducir el TRH a 45 días, un rango más adecuado para condiciones psicrófilas, según lo sugerido por [Jaimes-Estévez et al., 2020]. Esta modificación en el TRH implicó calcular una nueva CO diaria necesaria para alimentar el digestor, utilizando la ecuación (3-1), lo que resultó en un valor de 120 L/d. De esta manera, se buscó establecer un equilibrio óptimo en el proceso de digestión anaeróbica y mejorar la eficiencia de la conversión de materia orgánica en biogás.

Con estos parámetros ajustados, se procedió finalmente a iniciar el período de monitoreo el 3 de marzo de 2023. Durante este lapso de 90 días, se recolectaron datos y observaciones con el propósito de determinar si las modificaciones implementadas habían alcanzado el objetivo de mejora previsto.

7.3. Determinación del comportamiento térmico del digestor por medio del modelo matemático.

7.3.1. Desarrollo del modelo de transferencia de calor.

Selección del software de programación.

Para el desarrollo de la programación del modelo matemático que permitió comprender el comportamiento térmico del biodigestor inicialmente se realizó la elección del software de programación teniendo en cuenta las especificaciones del modelo térmico propuesto, el cual opera con diversas variables de entrada, como la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento para cada hora durante los 90 días del período de monitoreo. A partir de esta información, el modelo calcula las temperaturas asociadas al sistema en cada uno de

esos momentos. Por ende, se volvió esencial seleccionar un software que no solo tuviera la capacidad de gestionar grandes volúmenes de datos con eficacia, sino que también presentara los resultados de forma ordenada y comprensible.

Los resultados del modelo son cruciales para comprender el comportamiento térmico del sistema a lo largo del tiempo. Para captar de manera óptima las variaciones, las gráficas son una herramienta esencial, ya que permiten identificar patrones, tendencias y relaciones en los datos [Pro, 2016]. Por lo tanto, era imperativo que el software elegido contara con herramientas de visualización para representar estos resultados de manera gráfica.

Dado que el modelo térmico se basa en principios físicos y matemáticos, abarca una amplia gama de cálculos, desde operaciones matemáticas básicas hasta avanzadas que implican funciones trigonométricas y cálculo infinitesimal. Por esta razón, era crucial que el software seleccionado proporcionara estas funciones matemáticas de manera eficiente, ya sea a través de su propia interfaz o mediante el uso de librerías externas.

Otra consideración importante en la elección del software fue su disponibilidad y accesibilidad, teniendo en mente que el modelo desarrollado podría ser utilizado en contextos distintos al de este estudio en el futuro.

Con base en estos factores, la selección del software se llevó a cabo mediante una matriz de selección, en la que se definieron criterios y ponderaciones específicas para evaluar y comparar diferentes opciones.

- Facilita la construcción de interfaces gráficas (30 %).
- Permite el uso de librerías (20 %).
- Es un software de acceso libre (40 %).
- Facilita el manejo de archivos .csv, .txt. o .xlsx (10 %).

Los softwares propuestos para el proceso de selección fueron los siguientes: LabVIEW, Matlab y Python. Cada uno de estos se calificó con un valor de 1, si la característica del software no cumplía el criterio; 3, si la característica cumplía moderadamente el criterio y 5, si la característica cumplía completamente el criterio. Los resultados de la matriz de selección se muestran en la tabla 7-7.

Criterio	Peso	Software		
		LabVIEW	Matlab	Python
Facilita la construcción de interfaces gráficas	30 %	5	3	3
Permite el uso de librerías	20 %	3	5	5
Es un software de acceso libre	40 %	1	1	5
Facilita el manejo de archivos .csv, .txt. o .xlsx	10 %	5	5	5
TOTAL		3	2.8	4.4

Tabla 7-7.: Matriz de selección del software.

El software de programación que obtuvo el mayor puntaje con un total de 4.4 puntos y, por lo tanto, fue el seleccionado para la construcción del modelo fue Python.

Una vez se escogió el software para el desarrollo del modelo térmico, se procedió a recopilar los datos de entrada necesarios para establecer las condiciones iniciales y los parámetros ambientales en los cuales se encontraba el sistema.

Los datos de entrada incluyen:

- **Radiación solar:** Se proporcionan los valores de radiación solar total horizontal, radiación solar difusa horizontal y radiación solar directa normal calculados con el modelo de Duffie y Beckman [Duffie and Beckman, 2013] para cada hora del día del periodo de monitoreo. Estos datos se importan al modelo programado en un archivo de extensión .csv.
- **Velocidad promedio mensual del viento:** Se obtienen los valores promedio mensuales de la velocidad del viento en la ubicación específica del biodigester, en este caso, en la ciudad de Bogotá. Estos datos se extraen de la base de datos del Atlas Interactivo del IDEAM [IDEAM, 2017]. La velocidad del viento influye en la transferencia de calor y en la disipación térmica del sistema.
- **Coordenadas del sitio de operación y orientación e inclinación del sistema:** Se incluyen las coordenadas del lugar donde se encuentra el biodigester, es decir, su altitud, latitud y longitud ya que esto influyen en la cantidad y la intensidad de la radiación solar que recibe el sitio. También se toma en cuenta la orientación e inclinación del sistema en relación con los puntos cardinales, ya que esto determina la exposición al sol a lo largo del día. Estos valores se evidencian en tabla 7-8.

Coordenadas del Sitio de Operación			Orientación del Sistema	
Altitud (m)	Latitud (°)	Longitud (°)	Omega (°)	Beta (°)
2565	4.684	-74.039	0	0

Tabla 7-8.: Coordenadas del sitio de operación y Orientación e inclinación del sistema

- Datos geométricos y propiedades de los materiales:** Se presentan las dimensiones clave del sistema, abarcando aspectos como la altura, ancho, largo y espesor de los elementos del biodigestor. Además, se detallan las propiedades físicas y termofísicas necesarias para los cálculos del modelo de los materiales que componen el sistema. Estos datos desempeñan un papel fundamental en la estimación de las tasas de transferencia de calor y en la predicción de las interacciones entre los materiales y el entorno térmico circundante.

En la Tabla **7-9** se observan las dimensiones que fueron necesarias para el cálculo las temperaturas de cada elemento del biodigestor:

Dimensiones	Notacion	Valor
Espesores (m)	Espesor aislamiento superior a los lados de la zanja	0,005
	Espesor aislamiento inferior a los lados de la zanja	0,005
	Espesor aislamiento a la base de la zanja	0,005
	Espesor del plastico de cobertura	0,0008
	Espesor del plastico de la manga	0,0015
Anchuras (m)	Ancho superior de la zanja	2,3
	Anchura relativa de las pendientes transversales de la zanja	1,0
	Ancho de las paredes	0,0008
Alturas (m)	Altura de la zanja	0,8
	Altura de la pared 1	0,76
	Altura de la pared 2	0,76
Longitudes (m)	Longitud exterior del biodigestor con invernadero	4,43
	Longitud interior del biodigestor con invernadero	3,10

Tabla 7-9.: Dimensiones de los elementos del biodigestor.

Así mismo en la tabla 7-10 se muestran las propiedades térmicas de los materiales correspondientes a cada elemento del digestor.

Propiedades de los Materiales								
Elemento	Cobertura	Suelo	Aislamiento	Paredes	Manga	Slurry	Aire	Biogás
Material	LDPE	Suelo	Poliestireno	LDPE	LLDPE	Lodo	Aire	Biogás
Masa volumétrica (kg/m ³)	930	1450	-	-	-	1000	1,202	1,156
Calor específico (J/kg·K)	2100	835	-	-	-	4180	1010	1682
Conductividad térmica (W/m·K)	0,33	1	0,04	-	0,5	-	0,023	0,025
Difusividad térmica (m ² /s)	1,5x10 ⁻⁷	8,26x10 ⁻⁷	-	-	-	-	1,97x10 ⁻⁵	16,63x10 ⁻⁶
Absorbencia	0,6	0,8	-	0,6	0,6	0,8	-	-
Emisividad	0,9	0,8	-	0,9	0,9	0,8	-	-
Reflexividad	0,4	0,2	-	0,4	0,4	0,2	-	-
Transmitancia	0,7	0	-	0,7	0,7	-	-	-
Viscosidad dinámica (Pa.s)	-	-	-	-	-	-	16,9x10 ⁻⁶	11,6x10 ⁻⁶
Viscosidad cinemática (m ² /s)	-	-	-	-	-	-	14,06x10 ⁻⁶	11,93x10 ⁻⁶

(-) No son necesarios para los cálculos del modelo.

Tabla 7-10.: Propiedades de los elementos.

En conjunto, la definición y precisión de estos datos fueron fundamentales para obtener resultados confiables y representativos del comportamiento térmico del biodigestor. Además, permitieron que el programa del modelo térmico, basado en el algoritmo desarrollado por Perrigault et al. (2012), funcione de manera efectiva. La estructura del programa se organiza en torno a 26 funciones, cada una de las cuales desempeña un papel específico en la simulación y análisis del comportamiento térmico.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de estas funciones:

- AlphaOmegaPared2: Esta función se utiliza para determinar la altura angular de una superficie en relación con la posición del sol.

- **CorresNombreElemento**: A partir del nombre de un elemento que constituye el sistema, determina la columna correspondiente en la matriz ELEMENTO, donde se encuentran sus propiedades geométricas. Esta función facilita la obtención de datos específicos del elemento.
- **CorrespElementoMaterial**: Permite identificar la columna en la matriz MATERIAL que contiene las propiedades del material de construcción utilizado en un elemento del sistema. Ayuda a acceder a la información sobre los materiales de manera eficiente.
- **CosTeTa**: Calcula el coseno del ángulo cenital TetaZ y el coseno del ángulo cenital de la superficie plana caracterizada por (beta, omega, teta) en un momento dado (phi). Estos cálculos son esenciales para determinar la incidencia de la radiación solar sobre las superficies.
- **DiscreminacionSuperficie**: Divide una superficie en un número dado de cuadraditos. Esta función es útil para discretizar y analizar áreas superficiales en un enfoque más detallado.
- **FactorSombreo**: Calcula el factor de sombreado (entre 0 y 1) de la pared 2 sobre la manga, de la pared 2 sobre la pared 1 y de la pared 1 sobre la pared 2. Esta función evalúa la sombra arrojada por diferentes elementos en el sistema
- **FactorVista**: Calcula el factor de vista relacionado con la configuración de las superficies de los elementos considerados (superficies de elemento 1 y elemento 2). Este factor refleja cómo una superficie ve a la otra en términos de radiación solar.
- H_{cond} : Calcula el coeficiente de transferencia de calor conductivo del slurry hacia el suelo, considerando si la transferencia ocurre a través del piso de la zanja o por sus lados. Esta función cuantifica la conducción de calor a través del sustrato.
- H_{conv} : Calcula el coeficiente de transferencia de calor convectivo entre el elemento (pared 1, pared 2, manga y cobertura) y el aire interior. Esta función describe la transferencia de calor por convección en el sistema.
- H_{rad} : Calcula el coeficiente de radiación radiativa entre un elemento 1 y un elemento 2 (pared 1, pared 2, cobertura, slurry, manga). Esta función cuantifica la transferencia de calor por radiación entre superficies.
- **ImportacionDatos**: Organiza los datos de temperatura ambiente, radiación solar difusa y total en una superficie horizontal, y la radiación solar directa en una superficie normal, y los valores obtenidos se almacenan en una matriz.

- PropElemento: Llena la matriz ELEMENTO con las propiedades geométricas de los elementos y la matriz MATERIAL con las propiedades de los materiales considerados. Esta función centraliza la información sobre las características de los elementos del sistema.
- RadiacionSolarDatos: Calcula otras radiaciones a partir de los datos introducidos por la función "ImportacionDatos". Calcula la radiación solar directa sobre una superficie horizontal y la radiación solar directa, difusa y total sobre una superficie inclinada y orientada. RadiacionSolarElementoDatos: Calcula la radiación solar total incidente sobre el elemento considerado (pared 1, pared 2, manga, cobertura). Determina la cantidad de radiación solar que llega a cada superficie.
- RSTD: Calcula la radiación solar total diaria en $[W/m^2]$. Estima la cantidad de radiación solar acumulada durante un día.
- TemperaturaAireInterior: Calcula la temperatura del aire interior. Evalúa la temperatura ambiente dentro del invernadero.
- TemperaturaAmbienteMaxMin: Crea dos vectores con las temperaturas máximas y mínimas para cada día del año, y calcula la temperatura máxima y mínima promedio del año.
- TemperaturaBiogas: Calcula la temperatura del biogás. Estima la temperatura del gas producido en el biodigestor.
- TemperaturaCobertura: Calcula la temperatura de la cobertura. Determina la temperatura de la parte superior del invernadero.
- TemperaturaManga: Calcula la temperatura de la manga. Estima la temperatura dentro de la estructura del invernadero.
- TemperaturaPared1: Calcula la temperatura de la pared 1. Evalúa la temperatura en una de las paredes del biodigestor.
- TemperaturaPared2: Calcula la temperatura de la pared 2. Evalúa la temperatura en la otra pared del biodigestor.
- TemperaturaSlurry: Calcula la temperatura del slurry. Determina la temperatura de la mezcla orgánica en el biodigestor.
- TemperaturaSuelo: Calcula la temperatura del suelo. Evalúa la temperatura del sustrato en el fondo del biodigestor.

Como se mencionó anteriormente, el modelo desarrollado por Perrigault [Perrigault, 2010] se basa en la transferencia de calor entre los elementos del sistema. Este enfoque considera tanto elementos con inercia térmica como aquellos que responden rápidamente a cambios en la temperatura de su entorno.

En el contexto de este modelo, Perrigault identificó elementos clave para su análisis. Estos elementos incluyeron las paredes del invernadero (denominadas pared 1 y pared 2) y el lodo presente en el digestor. Las decisiones sobre cuáles elementos considerar se basaron en factores como la geometría de los componentes y los materiales con los que estaban contruidos. Por ejemplo, las paredes del invernadero, contruidas con adobe y con un espesor de 30 cm, influyen en su capacidad para retener y transferir calor.

Cuando se aplicaron estas ideas al caso específico del invernadero del biodigestor en la Escuela de Caballería del Cantón Norte, se encontró que las paredes del invernadero compartían el mismo material y espesor de plástico que la cubierta (ver tabla 7-9 y tabla 7-10). Esto llevó a considerar que las paredes no tenían inercia térmica en este sistema en particular. Como resultado, las ecuaciones de balance de energía para las paredes 3-15 y 3-16 se redefinieron de la siguiente manera:

$$0 = S_{w1} + Q_{r,w1-sky} + Q_{r,gc-w1} + Q_{r,w2-w1} + Q_{r,gh-w1} + Q_{c,w1-ga} + Q_{wind,w1} \quad (7-1)$$

$$0 = S_{w2} + Q_{r,w2-sky} + Q_{r,gc-w2} + Q_{r,w1-w2} + Q_{r,gh-w2} + Q_{c,w2-ga} + Q_{wind,w2} \quad (7-2)$$

Estas modificaciones en el modelo tuvieron un impacto directo en las funciones del programa "TemperaturaPared1z "TemperaturaPared2". Estas funciones, en lugar de calcular las temperaturas de las paredes según las ecuaciones 3-15 y 3-16, pasaron a utilizar las ecuaciones 7-1 y 7-2, respectivamente.

Además, dado que las paredes del invernadero eran de LDPE traslúcido y permitían la entrada de luz solar, se pudo descartar la posibilidad de que generaran sombras sobre la manga del biodigestor. Por lo tanto, el factor de sombreado, que varía en un rango de 0 a 1 (donde 0 indica presencia total de sombra y 1 la ausencia de sombra), se definió como 1 en la función "FactorSombreo" para todos los cálculos dentro del modelo.

Una vez preestablecidas las funciones del modelo se procedió a desarrollar la programación central en donde estas se integraban dentro del algoritmo.

En el programa se establecen previamente las variables de entrada las cuales son: la radiación solar, la velocidad del viento, las coordenadas del sitio, la orientación y la geometría del sistema, así como los materiales que constituyen cada elemento de este. Juntamente con las variables de entrada, se estiman las temperaturas de cada elemento del sistema para un primer momento ($n = 0$) a partir de las cuales se calculan las posteriores. Las temperaturas calculadas son las de las paredes del invernadero, la cubierta del invernadero, el biogás, el lodo, el suelo, el aire dentro del invernadero y el reactor anaeróbico. Teniendo en cuenta que la resolución del tiempo fue de una hora y que el periodo de estudio fue de 90 días, se obtiene una población de 2160 datos de temperatura para cada elemento ($N = 2160$).

El algoritmo desarrollado provee al usuario toda la información estructurada por medio de un archivo de extensión .csv denominado “SimulacionResultados”.

El programa del modelo térmico es extenso y genera una carga computacional significativa, sin embargo, sigue una estructura lógica clara donde las funciones y los cálculos están organizados de manera cohesiva para lograr los cálculos de temperatura en cada paso del tiempo. Esta lógica operativa se visualiza en el diagrama de flujo presentado en la figura **7-5**, proporcionando una representación gráfica de cómo las diferentes etapas del proceso están interconectadas y se desarrollan en el programa.

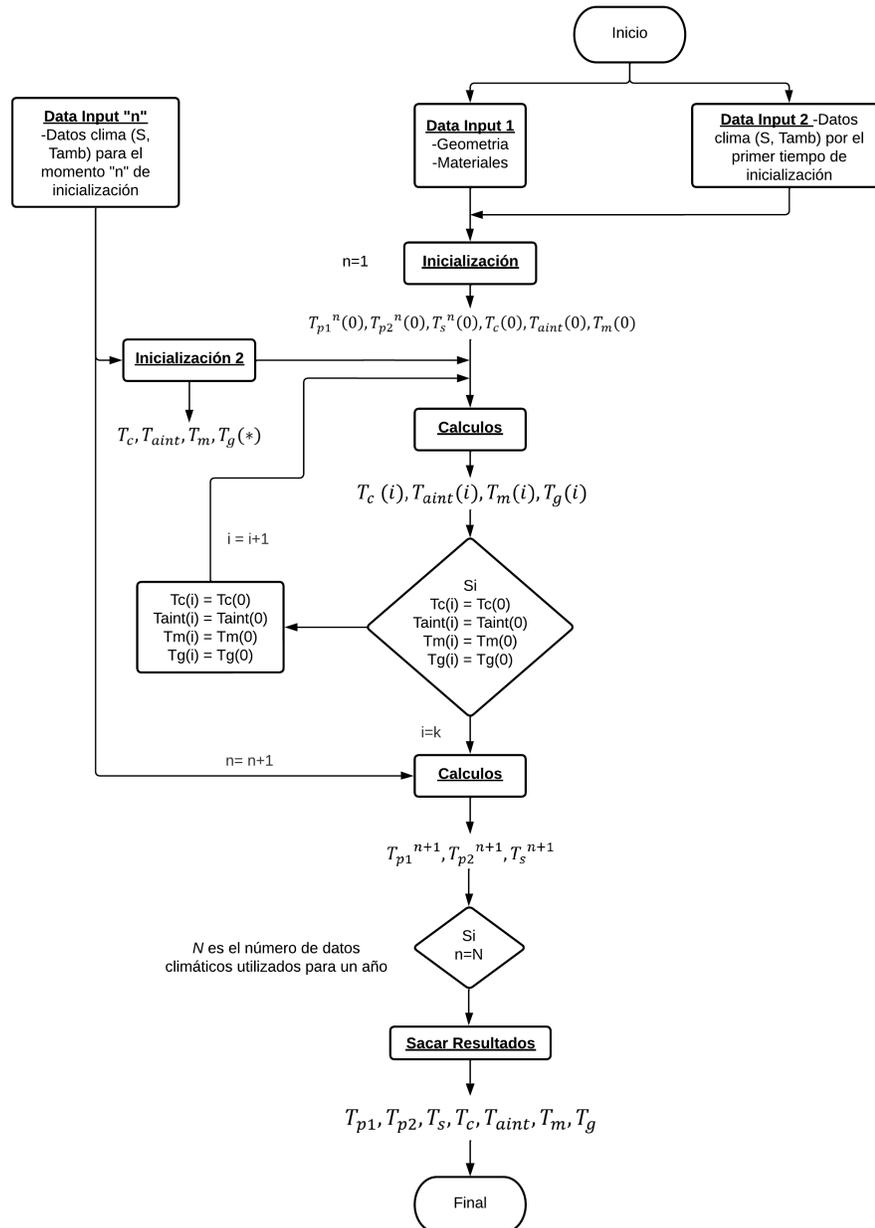


Figura 7-5.: Diagrama de flujo de la programación del modelo térmico [Perrigault et al., 2012]

Para el análisis de los resultados del comportamiento térmico del digester se desarrolló un programa en Python, permitiendo la visualización de aspectos como: las ganancias solares diarias y las ganancias solares mensuales acumuladas para elementos como la cobertura y las paredes del invernadero, además de la manga del biodigester. Asimismo, el programa permitió observar las variaciones de temperatura de los diversos componentes a lo largo de un día específico durante el período de monitoreo.

El proceso de obtención de estas gráficas se inicia con la importación de bibliotecas fundamentales para el manejo de datos, cálculos numéricos, representación gráfica y manipulación de fechas. Luego, se carga el archivo de datos en formato .csv llamado "SimulacionResultados.csv". A partir de estos datos, se extraen variables clave, como fechas, días del mes y temperaturas de los diversos componentes del biodigester. Estas temperaturas se organizan en matrices que representan cada elemento en función de la hora del día.

Posteriormente, se calculan las ganancias solares en horarios específicos a lo largo de cada día en términos de energía térmica. Finalmente, se generan las gráficas correspondientes para visualizar las ganancias y las temperaturas de los distintos componentes del biodigester.

En la figura **7-6**, se observan las ganancias solares del día 20 de abril de 2023 para la cobertura y las paredes del invernadero, además de la manga del biodigester. Es evidente que las ganancias solares en la cobertura del invernadero son significativamente más altas que en otros elementos. Esto se debe a la mayor exposición de la cobertura a la radiación solar.

Sin embargo, es intrigante notar que la manga del biodigester presenta ganancias solares superiores a las de las propias paredes del invernadero. Esta situación puede estar relacionada con la orientación de la manga, ya que podría recibir una mayor cantidad de radiación solar directa durante ciertas horas del día en comparación con las paredes.

Es importante aclarar que, aunque el modelo matemático no considera explícitamente el calor liberado por la actividad microbiológica en la manga, este sí ofrece una perspectiva sobre cómo se comportan las temperaturas en los elementos del sistema. En este contexto, es relevante mencionar que el proceso de DA que ocurre en el interior de la manga genera calor como subproducto de las reacciones metabólicas de los microorganismos involucrados. Aunque este calor no está incorporado en el modelo, su existencia en la realidad puede ser un factor adicional que contribuye a las ganancias más altas observadas en la manga.

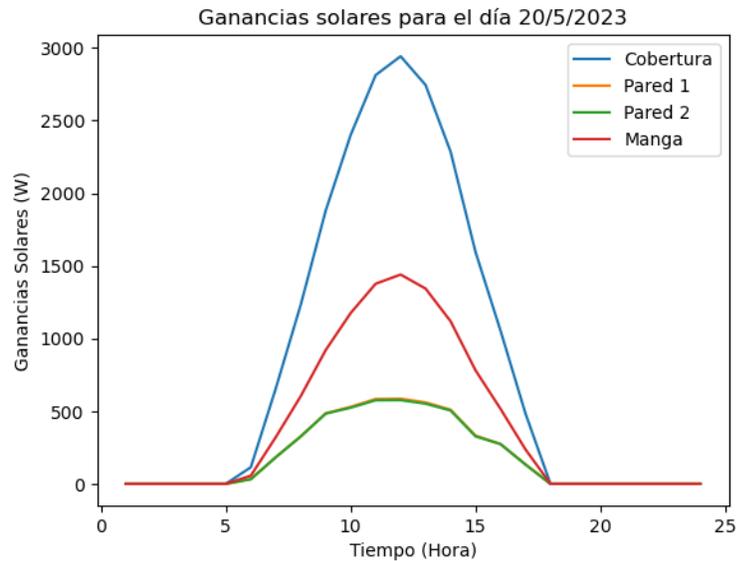


Figura 7-6.: Ganancias solares para el día 20 de abril de 2023.

Al observar la gráfica de la figura 7-7 se evidencia que se mantiene el comportamiento anteriormente mencionado donde las ganancias solares, en términos de kWh/mes a lo largo de los tres meses del período de monitoreo predominan en la cobertura, mientras que la manga se muestra como un elemento que, aunque no alcanza el nivel de la cobertura, aún supera en rendimiento a las paredes en términos de ganancias solares.

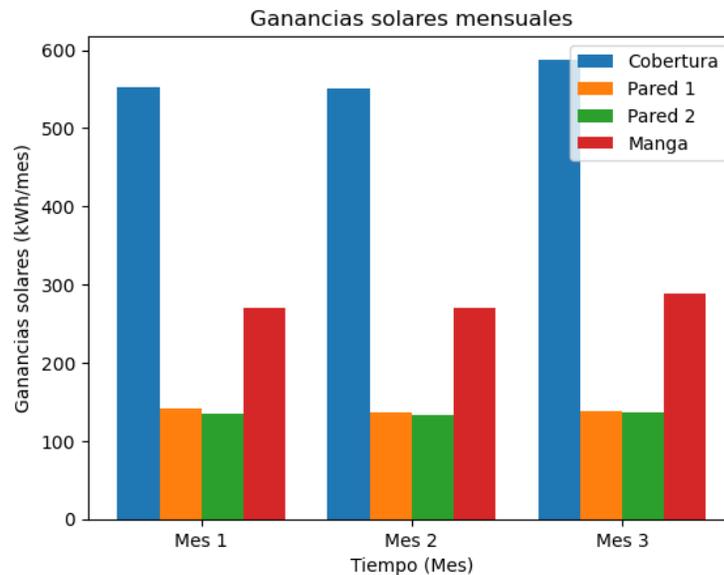


Figura 7-7.: Ganancias solares mensuales.

En la figura 7-8, se presenta el análisis detallado del comportamiento térmico de los elementos del digestor a lo largo de una semana de el periodo de monitoreo. Al observar esta gráfica, se destaca que las temperaturas más elevadas son registradas en la manga del biodigestor. Este fenómeno puede ser atribuido a múltiples factores interrelacionados. En primer lugar, la manga alberga procesos internos, como la DA, que generan calor como subproducto. Sin embargo, también influye la naturaleza del material LLDPE negro utilizado en la manga, que tiende a absorber eficientemente la radiación solar. Esta propiedad se debe a la capacidad del color oscuro para absorber longitudes de onda de luz y convertirlas en calor, en contraste con colores más claros que tienden a reflejar la luz. Adicionalmente, las propiedades térmicas del LLDPE contribuyen a este comportamiento. Su baja conductividad térmica impide la rápida disipación del calor, lo que, combinado con su capacidad de absorción solar, resulta en temperaturas elevadas sostenidas. Paralelamente, el interior del invernadero exhibe temperaturas también elevadas. Esta característica puede ser atribuida a la acumulación de calor en un espacio cerrado con limitada capacidad de disipación.

Al analizar las temperaturas de la cobertura y las paredes del invernadero, surge una observación interesante: aunque la cobertura recibe mayores ganancias solares, su temperatura es ligeramente menor que la de las paredes. Aunque ambos elementos estén compuestos del mismo material, otros factores pueden influir en su comportamiento térmico. Por ejemplo, la exposición al viento y la humedad pueden desempeñar un papel crucial en la disipación del calor. La mayor circulación de aire sobre la cobertura debido al viento puede explicar esta ligera diferencia de temperatura.

La temperatura del biogás, por otro lado, es otro aspecto relevante. Aunque se encuentra en el interior de la manga, su temperatura puede variar. Esto se debe a que el biogás es una mezcla de gases que puede tener una temperatura distinta a la de la manga en sí, debido a su composición y origen.

El modelo también arroja resultados coherentes para la temperatura ambiente, que coincide con las temperaturas promedio máxima y mínima en Bogotá. Esta precisión se debe a que el modelo considera factores geográficos como altitud, latitud y longitud, que influyen en el clima local.

Finalmente, la temperatura constante del lodo y del suelo se debe a su capacidad de actuar como reguladores térmicos. Su alto calor específico y baja conductividad térmica les permiten almacenar y liberar calor gradualmente, manteniendo temperaturas estables. Estas características los convierten en “almacenes térmicos” que absorben y liberan calor sin experi-

mentar cambios significativos en su propia temperatura. Esta cualidad asegura la estabilidad térmica a lo largo del periodo de monitoreo.

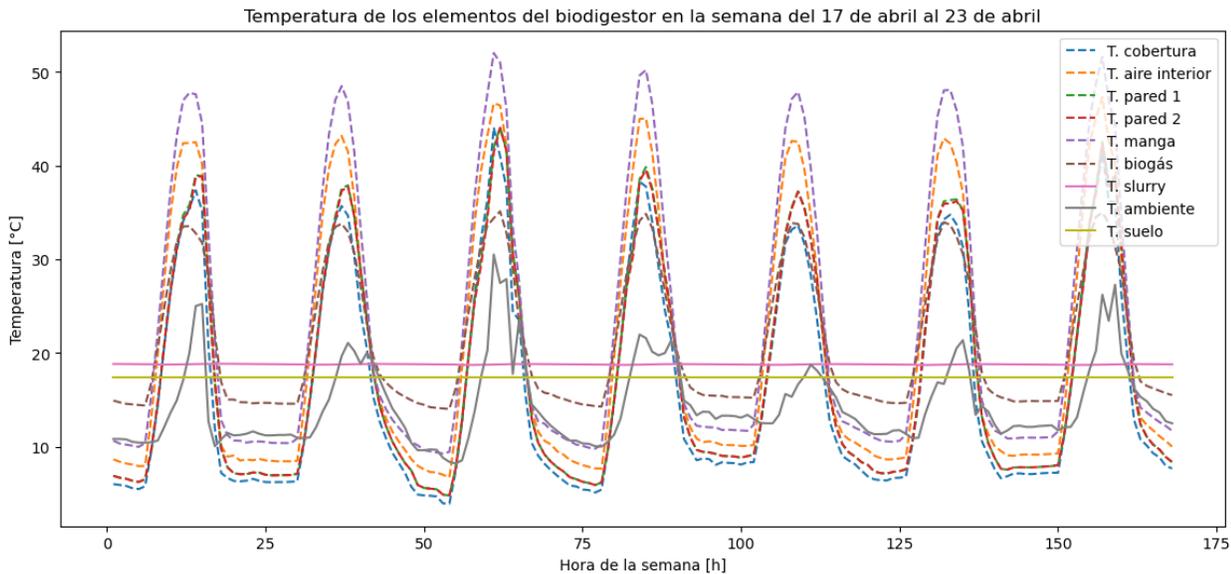


Figura 7-8.: Temperaturas de los elementos del digestor del 17 al 23 de abril de 2023.

7.4. Evaluación del rendimiento de la producción de biogás, la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación.

La evaluación del rendimiento de la producción de biogás y la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación fue fundamental para comprender y cuantificar el impacto de los cambios implementados en el sistema.

Monitoreo de la calidad del afluente y efluente.

Los resultados de la caracterización fisicoquímica para evaluar las condiciones tanto del afluente como del efluente en términos de ST y SV, DQO, AGVs y pH realizados en el Laboratorio de Digestión Anaeróbica de la UIS después de aplicar las modificaciones en las condiciones de operación se muestran en la tabla 7-11

7.4 Evaluación del rendimiento de la producción de biogás, la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación 65

Fecha	Parámetro	Unidades	Muestra	
			Afluente	Efluente
17/04/23	ST	g/kg	23,48±1,5	2,1±0,06
	SV	g/kg	20,74±1,56	1,1±0,005
	DQO	gDQO/L	24,44±0,79	3,92±0,12
	AGVs	mgCaCO ₃ /L	920±70	400±69
	pH	-	6,7±0,05	7,4±0,03

Tabla 7-11.: Resultados de la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente.

Monitoreo de la calidad del biogás.

Los resultados de la cuantificación de metano y dióxido de carbono, que se llevó a cabo para evaluar las condiciones del biogás generado por el digestor después de aplicar las modificaciones en las condiciones de operación, se muestran en la tabla **7-12**.

Muestra de Biogás			
Componente	Formula	Unidades	Resultados
Metano	CH ₄	% Molar	59,82±0,4
Dióxido de Carbono	CO ₂		40,18±0,4
Sulfuro de Hidrogeno	H ₂ S		**

Tabla 7-12.: Calidad del biogás.

**No detectado a la mínima concentración medible en el equipo.

A partir de los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente, junto con los datos de la calidad del biogás, se realizó la caracterización del desempeño del digestor. Esta caracterización permitió determinar la eficiencia del proceso de DA en términos de la generación de biogás. Se analizó la PEB, la VPB y la PEM, lo que brindó información detallada sobre la capacidad del digestor para descomponer la materia orgánica y producir biogás como resultado. La comparación entre los valores iniciales y posteriores a las modificaciones se muestra en la tabla **7-13**. Estos datos permitieron evaluar la mejora real en términos de rendimiento y eficiencia.

Además, evaluar la calidad del afluente y efluente fue esencial para entender como las modificaciones en las condiciones de operación afectan la composición y características del proceso de digestión. Esto se logró al comparar parámetros fisicoquímicos clave, como la reducción de la DQO y SV, entre el afluente y el efluente antes y después de las modificaciones como se evidencia en la tabla 7-13. Estos datos son indicativos de la efectividad del proceso en la degradación de la materia orgánica y la reducción de la carga contaminante.

Caracterización del Desempeño			
Parámetro	Unidades	Antes de las modificaciones	Después de las modificaciones
Carga orgánica diaria	L/d	66,66	120
Tiempo de retención hidráulica	días	84	45
Producción diaria de biogás	Nm^3/d	0,117	0,270
Producción específica de biogás	$Nm^3/kgSV * d$	0,077	0,108
Producción específica de metano	$m^3CH_4/kgSV$	0,047	0,065
Velocidad de producción de biogás	m^3_{biogas}/d	0,021	0,048
Reducción de la demanda química de oxígeno	%	75	84
Reducción de sólidos volátiles	%	96	95

Tabla 7-13.: Resultados de la caracterización del desempeño antes y después de las modificaciones.

Al comparar los resultados iniciales y los obtenidos después de las modificaciones en el digester se observan diferencias significativas en su desempeño. En primer lugar, la mejora en la PEB, que aumentó de 0.077 a 0.108 $Nm^3/kgSV * d$. Este aumento del 40 % en la producción de biogás tiene un impacto directo en la capacidad del sistema para convertir la materia orgánica en biogás. Por otro lado, la VPB también tuvo un incremento significativo de 0,021 a 0,048 m^3_{biogas}/d lo cual puede estar relacionado con una mayor actividad microbiana en el digester.

En cuanto a la PEM, esta experimentó un aumento del 21 %, lo cual sugiere una mayor eficiencia en la conversión de los sustratos orgánicos en metano, un componente de alto valor

7.4 Evaluación del rendimiento de la producción de biogás, la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación

en el biogás en relación a su potencial energético.

Otro aspecto crucial en la evaluación del desempeño del digestor es la reducción en la DQO. La eficiencia del proceso se refleja en el aumento de la reducción de la DQO, que pasó del 75 % al 85 %. Esta reducción indica una mayor eficiencia en la descomposición de la materia orgánica presente en el afluente durante el proceso de DA, lo que a su vez está relacionado con la eficacia de las condiciones operativas implementadas.

La mejora en la producción de biogás tras la reducción del TRH se atribuye a un equilibrio eficiente entre la CO y el TRH. Al acortar el TRH, se logra un paso más rápido del sustrato a través del sistema, lo que reduce la acumulación de AGVs que actúan como inhibidores de la actividad metanogénica [Acosta and Abreu, 2005]. Después de las modificaciones en las condiciones de operación la reducción de AGVs pasó del 48 % al 57 %. Simultáneamente, al aumentar la CO, se le proporciona a los microorganismos una mayor cantidad de sustrato para metabolizar y convertir en biogás. Este ajuste estratégico permitió una producción de biogás más efectiva al minimizar los inhibidores y optimizar la disponibilidad de sustrato, demostrando un buen desempeño en el proceso de DA.

En relación con el comportamiento térmico de los elementos del biodigestor se puede detallar cómo las modificaciones en las condiciones operativas han influido en su desempeño general. Al observar las temperaturas y las ganancias solares, se puede establecer una correlación entre los resultados térmicos y los cambios positivos en el rendimiento del digestor.

Por ejemplo, la alta temperatura registrada en la manga del biodigestor se alinea con la mejora en la PEB y la VPB. La DA, que ocurre en la manga, genera calor como subproducto, y este aumento de temperatura podría estar relacionado con el incremento en la actividad microbiana. Además, el LLDPE negro de la manga, con su capacidad de absorción solar y baja conductividad térmica, contribuye a mantener temperaturas elevadas. Esta relación entre temperatura y producción de biogás sugiere que las modificaciones operativas han creado un ambiente más propicio para la actividad microbiana, resultando en una mayor producción de biogás y una conversión más eficiente de sustratos orgánicos en metano.

En la figura 7-9 se puede observar como la producción de biogás tuvo una linealidad fuerte en los días estudiados, el coeficiente de determinación R^2 tuvo un valor porcentual del 99.6 % lo que indica que durante los días del periodo de monitoreo la PDB tuvo una baja variabilidad y se mantuvo casi constante a pesar de las fluctuaciones térmicas en los elementos del sistema.

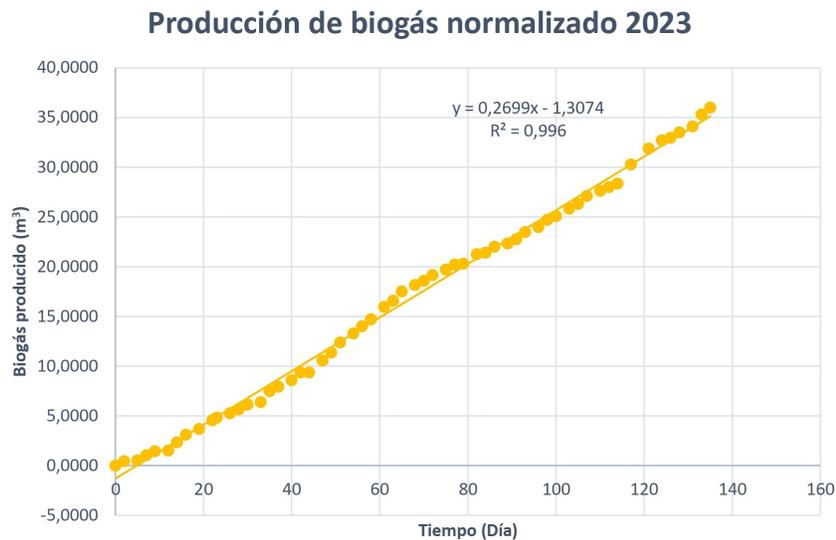


Figura 7-9.: Producción de biogás normalizado en el periodo de monitoreo.

Finalmente, en la tabla 7-14 se puede observar la energía consumida por el uso de propano en la Escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá, el uso de este hidrocarburo genera un consumo al mes de 4.208.435 *kJ* a partir de 90,72 *kg* de este gas. Si se compara esta energía consumida respecto a la generada en el biogás producido por el biodigestor, la energía que se logró recuperar después de las modificaciones en las condiciones de operación fue del 4,2%. Pasar del 2,5% al 4,2% de recuperación de energía representa un aumento significativo en la eficiencia energética del biodigestor, lo que significa que después de la ejecución del proyecto se obtuvo más energía en forma de biogás.

Comubustible	Consumido	Generado		Unidades
	Propano	Biogás antes de las modificaciones (metano)	Biogás después de las modificaciones (metano)	
Concentración	100 %	61 %	60 %	mol/mol
Poder Calorífico	19.944	21.520	21.520	BTU/lbm
	46.390	17.925	17.925	kJ/kg
Volumen	-	0,16	0,27	<i>m</i> ³ /d
Masa	90,72	5,79	9,84	kg/mes
Energía	4.208.435	103.839	176.469	kJ/mes
Energía Recuperada		2,5	4,2	%

Tabla 7-14.: Recuperación de energía del biogás producido.

7.4 Evaluación del rendimiento de la producción de biogás, la calidad del afluente y efluente del digestor antes y después de las modificaciones en las condiciones de operación

En conjunto, estos cambios positivos en la PEB, VPB, PEM y la reducción de la DQO apuntan a un desempeño mejorado y más eficiente del digestor. Así mismo, el comportamiento térmico mostró una estabilidad en la temperatura del lodo del digestor producto de la dinámica de calor entre los elementos del sistema. Lo anterior permitió que al modificar las condiciones operativas como la CO y el TRH se potenciará la actividad microbiana y mejorará la conversión de la materia orgánica en biogás. Lo que se traduce en un aumento de la energía recuperada en el biogás generado por el biodigestor tubular de bajo costo en la escuela de Caballería del Cantón Militar Norte de Bogotá.

8. Conclusiones

- La elección de los sensores para el sistema de monitoreo posibilitó la obtención precisa y constante de los datos de temperatura e iluminancia. El registro de la iluminancia permitió determinar con precisión la radiación directa y difusa mediante el modelo de Duffie y Beckman, lo cual quedó claramente evidenciado en los resultados del modelo térmico matemático. La selección apropiada de los sensores resultó crucial para asegurar la confiabilidad de los datos y la robustez de los análisis realizados.
- Los resultados de la caracterización de las condiciones iniciales de la calidad del biogás, afluente y efluente revelaron que el contenido de metano en el biogás era adecuado para una combustión eficiente, pero la eficiencia en la conversión de materia orgánica en biogás era reducida ($0.077 \text{ Nm}^3/\text{kgSV}\cdot\text{d}$). En respuesta, se tomaron decisiones operativas, como la reducción del TRH (45 días) y el aumento de la CO (125 L/d) para optimizar el rendimiento del sistema.
- A partir de las temperaturas obtenidas durante el periodo de monitoreo, se registraron temperaturas en el lodo y en el suelo de 18.53 y 17.57 °C en promedio, respectivamente. Esta diferencia de 1 °C aproximadamente entre estas dos temperaturas demostró la capacidad del sistema para retener calor y reducir pérdidas con el suelo.
- El análisis térmico mostró que la cubierta del invernadero recibió la mayor cantidad de energía solar (1.75 GW), seguida por la manga del biodigestor (0.86 GW). Las altas temperaturas en la manga se debieron a su material negro (LLDPE), lo que minimizó las pérdidas de calor en comparación con el invernadero. Esto permitió transferir calor al lodo, y el aislamiento redujo las pérdidas de calor (0.14 GW), manteniendo una temperatura estable.
- Los cambios en las condiciones operativas mostraron aumentos en la PEB (28.7%), la VPB (56.25%) y la PEM (27.7%). La recuperación de energía que se obtuvo del biogás producido luego de ejecutar los cambios en el sistema fue del 4.2% y en cuanto a la calidad del afluente y el efluente, el bioproceso se mantuvo estable demostrado en la reducción de la DQO (85%) y la reducción de SV (95%).

9. Recomendaciones

En esta sección se presentan algunas recomendaciones basadas en los resultados y hallazgos del estudio realizado en el biodigestor tubular de bajo costo en la escuela de Cabellería del Cantón Militar Norte de Bogotá.

- Se recomienda continuar investigando y ajustando las condiciones operativas, como el TRH y CO, esto con el objetivo de encontrar un equilibrio óptimo entre estas dos variables, de manera que se maximice la producción de biogás y se logre una conversión más eficiente de los sustratos orgánicos en metano.
- Considerando el potencial de sinergia identificado en la co-digestión de una mezcla 3:1 de estiércol equino y residuos de cocina, se sugiere explorar la implementación de esta estrategia en proyectos futuros de biodigestores. Esto permitiría maximizar la producción de biogás y, por ende, mejorar la eficiencia energética de los sistemas.
- Dada la naturaleza económica y rudimentaria del sistema de digestor, se sugiere llevar a cabo una búsqueda enfocada en la mejora de la herramienta utilizada para medir el gas. El objetivo sería encontrar una alternativa económica que ofrezca mediciones más confiables y precisas. Esto podría incluir la exploración de tecnologías de bajo costo que utilicen sensores de gas mejorados o la adaptación de dispositivos existentes para una medición más exacta.

Bibliografía

- [Acosta and Abreu, 2005] Acosta, Y. L. and Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. aspectos teóricos. parte i. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1):35–48.
- [Arroyave et al., 2007] Arroyave, C., Orozco, C., Maya, A., et al. (2007). Aplicación de la metodología qfd en el proceso de ingeniería de requisitos. B.S. thesis, Universidad EAFIT.
- [Association et al., 2016] Association, A.-A. P. H. et al. (2016). Standard methods for the examination of water and wastewater. washington, dc: American public health association, 2012. on-site electricity generation. *Energy and Fuels*, 30:1849–1857.
- [Barbero et al., 2015] Barbero, S., Dorronsoro, C., and Gonzalo, J. (2015). La luz: ciencia y tecnología. *La luz*, pages 1–167.
- [Braskem, 2022] Braskem (2022). Polipropileno pg35l. Ficha técnica. Elaborado por Braskem.
- [Caldera et al., 2003] Caldera, Y. A., Madueño, P. I., Griborio, A. G., Fernández, N. M., and Gutiérrez, E. C. (2003). Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor uasb tratando efluentes cárnicos. *Multiciencias*, 3(1).
- [Casanovas et al., 2019] Casanovas, G., Della, F., Reymundo, F., and Serafini, R. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. *FAO. Obtenido de http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf*.
- [Castro et al., 2017] Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L., Vecino, K., Rojas, G., and Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource technology*, 239:311–317.
- [Cleves et al., 2016] Cleves, L. M. C., Orobio, B. A. P., Lozada, P. T., and Vásquez-Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de potencial bioquímico de metano-pbm para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos.

- [Corona et al., 2014] Corona, L., Abarca, G., and Mares, J. (2014). *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino*. Grupo Editorial Patria, México.
- [Corrales et al., 2015] Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., and Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24):55–81.
- [Cortes et al., 2016] Cortes, M., Avella, M., and Rojas, O. (2016). Métodos para mitigar la corrosión por ácido sulfúrico biogenico en los sistemas de alcantarillado. *L'esprit Ingénieux*, 7(1).
- [De Kuyper, 2018] De Kuyper, J. C. V. (2018). *Principios y aplicaciones de la energía fotovoltaica y de las baterías*. Ediciones UC.
- [Duffie and Beckman, 2013] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- [Gerday et al., 2007] Gerday, C., Glansdorff, N., et al. (2007). *Physiology and biochemistry of extremophiles*. ASM press.
- [Gozalo San José et al., 2017] Gozalo San José, D. et al. (2017). Estudio del flujo luminoso para la estabilidad de luminarias.
- [Hadin and Eriksson, 2016] Hadin, Å. and Eriksson, O. (2016). Horse manure as feedstock for anaerobic digestion. *Waste management*, 56:506–518.
- [IDEAM, 2016] IDEAM (2016). Atlas climatológico de colombia. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales República de Colombia*.
- [IDEAM, 2017] IDEAM (2017). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Ministerio de Minas y Energía e IDEAM.
- [ISO, 2018] ISO (2018). Iso 20675:2018 biogas — biogas production, conditioning, upgrading and utilization — terms, definitions and classification scheme.
- [Jaimes-Estévez et al., 2020] Jaimes-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., Gomez, C., Castro, L. d. P., and Escalante Hernández, H. (2020). Psychrophilic full scale tubular digester operating over eight years: Complete performance evaluation and microbiological population. *Energies*, 14(1):151.

- [Jaimes-Estévez et al., 2021] Jaimes-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., Gomez, C., Castro, L. d. P., and Escalante Hernández, H. (2021). Psychrophilic full scale tubular digester operating over eight years: Complete performance evaluation and microbiological population. *Energies*, 14(1).
- [Llorens et al., 2019] Llorens, M., Serrano, Á., and Valcuende, M. (2019). Sensores para la determinación de la durabilidad de construcciones de hormigón armado. *Revista ingeniería de construcción*, 34(1):81–98.
- [Maps, sf] Maps, G. (s.f.). K7, cl. 106, bogotá.
- [Martí Herrero, 2019] Martí Herrero, J. E. (2019). Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación.
- [Matiz-León et al., 2019] Matiz-León, J. C., Rodríguez-Rodríguez, G., and Alfaro-Valero, C. (2019). Modelos de temperatura del suelo a partir de sondeos superficiales y sensores remotos para el área geotérmica de paipa, boyacá-colombia. *Boletín de Geología*, 41(2):71–88.
- [Morcelle del Valle, 2018] Morcelle del Valle, P. (2018). Transductores-instrumentación.
- [Oegussa, 2009] Oegussa (2009). Platinum equipment. resistance and handling. PDF document. Elaborado por Oegussa el 24 de septiembre de 2009.
- [ONSET, 2022a] ONSET (2022a). *HOBO Pendant MX Temp (MX2201) and Temp/Light (MX2202) Logger Manual*. Manual del usuario.
- [ONSET, 2022b] ONSET (2022b). *HOBO Pendant Temperature Data Logger (UA-001-08, UA-001-64) User's Manual*. Manual del usuario.
- [ONSET, 2022c] ONSET (2022c). *HOBO Pendant Temperature/Light Data Logger (UA-002-08, UA-002-64) User's Manual*. Manual del usuario.
- [Palau Estevan, 2016] Palau Estevan, C. V. (2016). Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. fundamentos.
- [Paucar Malpica and Quispe Astucuri, 2015] Paucar Malpica, L. and Quispe Astucuri, M. E. (2015). Producción y evaluación de la calidad del biogas y biol en un biodigestor usando estiércol de codorniz de la granja va velebit sac ubicada en el distrito de lurigancho-chosica.

- [PCE-Instruments, 2022] PCE-Instruments (2022). Controlador de luz con logger de datos pce-174. Página de especificaciones técnicas.
- [Perrigault, 2010] Perrigault, T. (2010). Mejoramiento del comportamiento térmico de un biodigestor low-cost tipo plug-flow.
- [Perrigault et al., 2012] Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J., and Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource technology*, 124:259–268.
- [Planeación, 2016] Planeación, D. d. (2016). Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. *Documento Conpes*.
- [Pro, 2016] Pro, A. (2016). ¿qué es un gráfico?
- [Ramírez et al., 2014] Ramírez, L. G. C., Jiménez, G. S. A., and Carreño, J. M. (2014). *Sensores y actuadores*. Grupo Editorial Patria.
- [Salazar and Torres, 2019] Salazar, S. and Torres, H. (2019). Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural.
- [Terradas-Ill et al., 2014] Terradas-Ill, G., Pham, C. H., Triolo, J. M., Martí-Herrero, J., and Sommer, S. G. (2014). Thermic model to predict biogas production in unheated fixed-dome digesters buried in the ground. *Environmental science & technology*, 48(6):3253–3262.
- [Timmerman et al., 2015] Timmerman, M., Schuman, E., van Eekert, M., and van Riel, J. (2015). Optimizing the performance of a reactor by reducing the retention time and addition of glycerin for anaerobically digesting manure. *Environmental technology*, 36(10):1223–1236.
- [Varnero-Moreno, 2011] Varnero-Moreno, M. T. (2011). Manual de biogás.
- [Weatherford and Zhai, 2015] Weatherford, V. C. and Zhai, Z. J. (2015). Affordable solar-assisted biogas digesters for cold climates: Experiment, model, verification and analysis. *Applied Energy*, 146:209–216.
- [Zabaleta et al., 2017] Zabaleta, R., Viera, M. V. A., and Aldana, M. D. M. (2017). Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región piura. In *Proceedings of the XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Huaraz, Peru*, pages 13–17.
- [Zhang et al., 2017] Zhang, J., Loh, K.-C., Lee, J., Wang, C.-H., Dai, Y., and Wah Tong, Y. (2017). Three-stage anaerobic co-digestion of food waste and horse manure. *Scientific reports*, 7(1):1269.

A. Anexo: Matrices QFD

		Resistencia al agua	Rango de pH	Rango de temperatura	Precisión	Resolución máxima	Duración de batería	Costo del sensor	Tiempo de obtención	Método de obtención de los datos	Intervalo de registro	
Que sea resistente al agua	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que sea resistente a la corrosión	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que pueda soportar un ambiente con presencia de humedad	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que tenga un amplio rango de temperatura	5	0	0	3	3	3	9	3	0	0	0	
Que tenga alta precisión	5	0	0	1	9	3	0	3	0	0	0	
Que la forma de obtener los datos registrados del sensor sea sin trasladarse del sitio de operación	4	0	0	0	0	0	0	3	0	9	0	
Que tenga un tiempo de respuesta corto	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
Que sea asequible	5	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
Que sus costo no sea elevado	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Que la batería no dependa de una fuente externa	5	0	0	0	0	0	9	3	0	0	0	
Importancia	Absoluta	159	159	44	84	54	114	130	24	45	21	834
Valores técnicos meta		Si	0-14	0 a 50 °C	±0.5°C	0,14°C	≥ 1 año	180.000-500.000	2 -3meses	Trasladar el sensor	¡15 minutos	

Tabla A-1.: Matriz QFD para el sensor HOBO UA-001-08.

		Resistencia al agua	Rango de pH	Rango de temperatura	Precisión	Resolución máxima	Duración de batería	Costo del sensor	Tiempo de obtención	Método de obtención de los datos	Intervalo de registro	
Que sea resistente al agua	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que sea resistente a la corrosión	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que pueda soportar un ambiente con presencia de humedad	5	9	9	0	0	0	0	3	0	0	0	
Que tenga un amplio rango de temperatura	5	0	0	9	9	9	9	3	0	0	0	
Que tenga alta precisión	5	0	0	9	3	9	0	3	0	0	0	
Que la forma de obtener los datos registrados del sensor sea sin trasladarse del sitio de operación	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Que tenga un tiempo de respuesta corto	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
Que sea asequible	5	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	
Que sus costo no sea elevado	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Que la batería no dependa de una fuente externa	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	
Importancia	Absoluta	159	159	114	84	114	69	118	24	9	9	859
Valores técnicos meta		Si	0-14	0 a 50 °C	±0.5°C	0,14°C	≥ 1 año	180.000-500.000	2 -3meses	Trasladar el sensor	¡15 minutos	

Tabla A-2.: Matriz QFD para el sensor PT100.

		Resistencia al agua	Rango de pH	Rango de iluminancia	Precisión	Duración de batería	Costo del sensor	Tiempo de obtención	Método de obtención de los datos	Intervalo de registro	
Que sea resistente al agua	5	9	9	0	0	0	3	0	0	0	
Que sea resistente a la corrosión	5	9	9	0	0	0	3	0	0	0	
Que pueda soportar un ambiente con presencia de humedad	5	9	9	0	0	0	3	0	0	0	
Que tenga un amplio rango de temperatura	5	0	0	3	3	9	3	0	0	0	
Que tenga alta precisión	5	0	0	1	3	0	3	0	0	0	
Que la forma de obtener los datos registrados del sensor sea sin trasladarse del sitio de operación	4	0	0	0	0	0	3	0	9	0	
Que tenga un tiempo de respuesta corto	4	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
Que sea asequible	5	3	3	3	1	3	3	3	0	0	
Que sus costo no sea elevado	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Que la batería no dependa de una fuente externa	5	0	0	0	0	9	3	0	0	0	
Importancia	Absoluta	159	159	44	44	114	130	24	45	21	740
Valores técnicos meta		Si	0-14	40 a 20.000 lux	±10 %	≥ 1 año	180.000-500.000	2 -3meses	Trasladar el sensor	1 hora	

Tabla A-3.: Matriz QFD para el sensor HOBO UA-002-64.

		Resistencia al agua	Rango de pH	Rango de iluminancia	Precisión	Duración de batería	Costo del sensor	Tiempo de obtención	Método de obtención de los datos	Intervalo de registro	
Que sea resistente al agua	5	3	3	0	0	0	1	0	0	0	
Que sea resistente a la corrosión	5	3	3	0	0	0	1	0	0	0	
Que pueda soportar un ambiente con presencia de humedad	5	3	3	0	0	0	3	0	0	0	
Que tenga un amplio rango de temperatura	5	0	0	1	3	9	3	0	0	0	
Que tenga alta precisión	5	0	0	1	9	0	3	0	0	0	
Que la forma de obtener los datos registrados del sensor sea sin trasladarse del sitio de operación	4	0	0	0	0	0	3	0	3	0	
Que tenga un tiempo de respuesta corto	4	0	0	0	0	0	1	0	0	3	
Que sea asequible	5	3	3	3	1	3	3	3	0	0	
Que sus costo no sea elevado	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3	
Que la batería no dependa de una fuente externa	5	0	0	0	0	9	3	0	0	0	
Importancia	Absoluta	69	69	34	74	114	104	18	21	21	524
Valores técnicos meta		Si	0-14	40 a 20.000 lux	±10%	> 1 año	180.000-500.000	2 -3meses	Trasladar el sensor	1 hora	

Tabla A-4.: Matriz QFD para el sensor PCE-174.

B. Anexo: Resultados encuestas diseños evaluados para el desarrollo del dashboard.

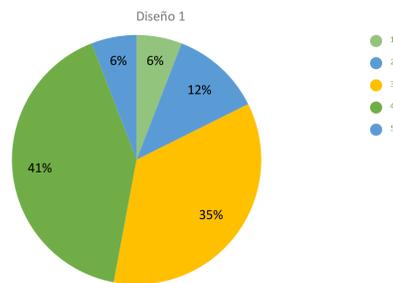


Figura B-1.: Diseño A.

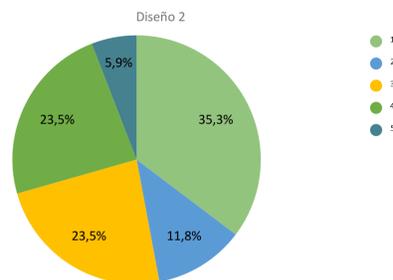


Figura B-2.: Diseño B.

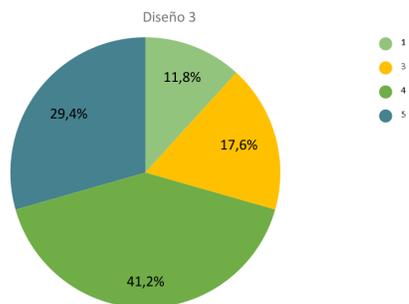


Figura B-3.: Diseño C.

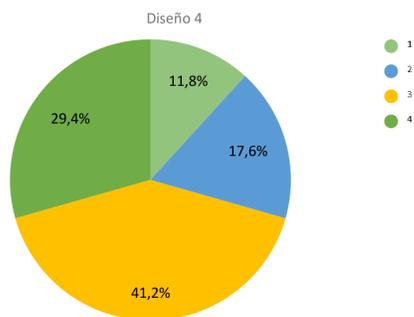


Figura B-4.: Diseño D.

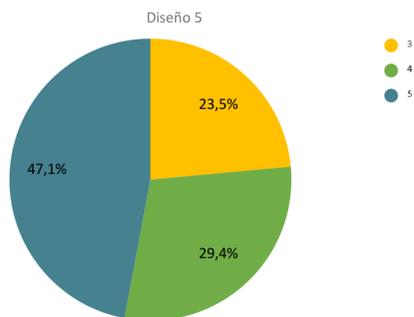


Figura B-5.: Diseño E.

C. Anexo: Certificado de participación congreso investigativo.

Con la culminación exitosa del proyecto, se procedió a presentar los resultados obtenidos en el XXVIII congreso institucional de investigaciones en la Universidad El Bosque. Durante este evento, se expusieron los logros alcanzados mediante el desarrollo del sistema de monitoreo de temperatura, radiación solar, calidad del biogás, afluente y efluente. Estos esfuerzos contribuyeron a mejorar el rendimiento del proceso en el biodigestor tubular de bajo costo, alimentado con estiércol equino y operando bajo condiciones psicrófilas en la Escuela de Caballería Cantón Norte de Bogotá.



La Vicerrectoría de Investigaciones

Certifica que

Laura Mecón

Participó como ponente en el XXVIII Congreso Institucional de Investigaciones, llevado a cabo del 23 al 24 de noviembre de 2022, en modalidad virtual.

Gustavo Silva Carrero
Vicerrector de Investigaciones

Figura C-1.: Certificado de participación XXVIII congreso institucional de investigaciones en la Universidad El Bosque de la estudiante Laura Mecón.



La Vicerrectoría de Investigaciones

Certifica que

Andres González

Participó como ponente en el XXVIII Congreso Institucional de Investigaciones,
llevado a cabo del 23 al 24 de noviembre de 2022, en modalidad virtual.


Gustavo Silva Carrero
Vicerrector de Investigaciones

Figura C-2.: Certificado de participación XXVIII congreso institucional de investigaciones en la Universidad El Bosque del estudiante Andres González.

D. Anexo: Guía de instalación y uso de los sensores de temperatura e iluminancia para el sistema de monitoreo.

Los sensores usados para el monitoreo de las temperaturas e iluminancia fueron los sensores HOBO MX2201 y MX2202, respectivamente. Para la instalación se deben de seguir los siguientes pasos:

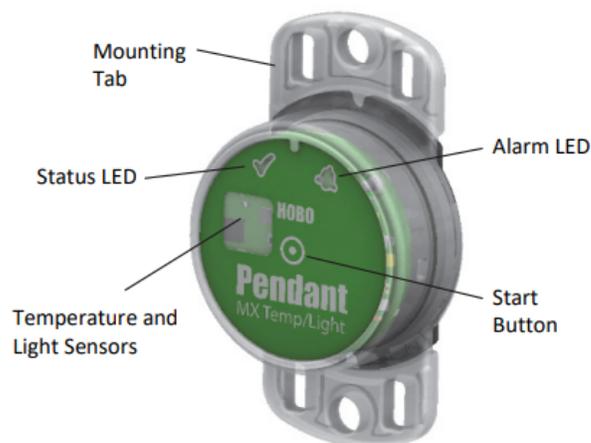


Figura D-1.: Modelo del sensor MX2201 Y MX2202.

1. Instalar en cada sensor una pila de 3V CR2032 de litio.
2. Para encender los sensores, se debe presionar el **Start Button** durante más de 5 segundos. Los sensores estarán en funcionamiento cuando aparezca una luz roja intermitente en el **Status LED** (ver figura D-1).
3. Instalar la aplicación móvil HOBOconnect en un dispositivo móvil.
4. Establecer la conexión via Bluetooth entre los sensores y el dispositivo móvil.

5. Configurar la frecuencia de registro de los datos desde una fecha y hora determinada a través de la opción **Start Loggin** en la aplicación.
6. Por medio de la aplicación renombrar los sensores a gusto del usuario. Esto con el fin de diferenciarlos uno del otro.
7. Ubicar los sensores en los sitios de operación preestablecidos de acuerdo a las variables que se quieran registrar.
8. Una vez instalados en su lugar de operación, iniciar con el registro de los datos de temperatura e iluminancia.
9. Recopilar la información periódicamente a través de la aplicación. Se puede obtener la información en archivos de extensión .csv u .hobo.

Para más información respecto al uso de los sensores y de la aplicación HOBObconnect consultar el documento HOBOb Pendant MX Temp (MX2201) and Temp/Light (MX2202) Logger Manual o el documento HOBObconnect User's Guide