

**SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA UN BIODIGESTOR
RURAL OPERADO BAJO CONDICIONES REALES**

Jonathan Stiven Gómez Zuluaga
Einar Camilo Santamaría Mosquera

**Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga**

2021

SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA UN BIODIGESTOR RURAL OPERADO BAJO CONDICIONES REALES

Jonathan Stiven Gómez Zuluaga
Einar Camilo Santamaría Mosquera

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director
Ricardo Alzate Castaño, Ph.D.

Co-Director
Liliana del Pilar Castro Molano, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander
Escuela de Ingenierías
Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Bucaramanga
2021

RESUMEN

TÍTULO: SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA UN BIODIGESTOR RURAL OPERADO BAJO CONDICIONES REALES¹

AUTORES: JONATHAN STIVEN GÓMEZ ZULUAGA; EINAR CAMILO SANTAMARÍA MOSQUERA²

PALABRAS CLAVE: BIODIGESTOR RURAL, DIGESTIÓN ANAEROBIA, MONITOREO EN TIEMPO REAL, SISTEMA DE TELEMETRÍA.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado aborda el diseño e implementación de un sistema electrónico para realizar la captura remota de registros de variables de operación de un biodigestor rural. Inicialmente, se realiza una descripción general del proceso de digestión anaerobia para identificar las etapas principales de un biodigestor rural y a partir de ello las variables relevantes y los rangos de magnitudes durante su operación. Posteriormente, se realizó la selección para dispositivos de sensado de temperatura y de concentraciones de CO_2 , CH_4 y H_2S en localizaciones importantes del bioproceso, complementados por dispositivos adicionales configurados en una arquitectura para la gestión de información de los registros de captura a través de internet, con actualización de datos en tiempo real mediante una interfaz de usuario. Al momento de ejecutar las pruebas de campo, fue necesario ajustar el sistema de telemetría a las características de un biodigestor en laboratorio, debido a las restricciones de movilidad impuestas por la emergencia sanitaria del virus SARS-CoV-2 (COVID 19). A partir de ello, fue posible obtener registros experimentales para las emisiones de gases en el entorno de operación del biodigestor. Trabajo futuro incluye la calibración de las medidas realizadas con patrones de referencia y la implementación del sistema de telemetría en campo, sobre un biodigestor rural.

¹Trabajo de grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

ABSTRACT

TITLE: TELEMETRY OF A RURAL BIOGAS DIGESTER³

AUTHORS: JONATHAN STIVEN GÓMEZ ZULUAGA; EINAR CAMILO SANTAMARÍA MOSQUERA⁴

KEYWORDS: ANAEROBIC DIGESTION, REAL-TIME MONITORING, RURAL BIOGAS DIGESTER, TELEMETRY.

DESCRIPTION:

In this work the design and implementation for an electronic system aimed at performing the remote acquisition for registers of variables on the operation of a rural biogas digester, is performed. By doing so, a general description of the anaerobic digestion process is performed trying to identify the main stages of a rural biogas digester and the variables that are relevant for its operation as well as their magnitudes and ranges. Then, a set of sensing devices are selected to perform the acquisition of data for temperature and concentrations of CO_2 , CH_4 and H_2S at strategic locations of the bioprocess, further complemented by other devices configured in a computation architecture for the management and exchanging of data via internet, in real-time by means of a user interface. However, given the restrictions regarding the SARS-CoV-2 (COVID 19) pandemic the experimental tests were constrained to be performed indoors on a laboratory prototype of a biogas digester. In spite of this, it was possible to acquire experimental registers for gas emissions in the surroundings of the bioprocess. Current ongoing work include the calibration of sensing devices with pattern measures and the implementation of the telemetry system on a biogas digester subjected to real rural outdoors conditions.

³Bachelor Thesis

⁴Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Tabla de Contenido

1. Introducción	10
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo general	14
1.1.2. Objetivos específicos	14
2. Instrumentación de un biodigestor anaeróbico	15
2.1. Biodigestor rural	15
2.1.1. Bioproceso	16
2.1.2. Medicion de gases	18
2.1.3. Medicion de temperatura	18
2.1.4. Medicion de acidez	18
2.1.5. Aprovechamiento energetico	19
2.2. Diseno de sistema de telemetria	19
2.2.1. Seleccion de dispositivos de sensado	20
2.2.2. Seleccion de dispositivo de acopio de informacion	20
2.2.3. Esquema de gestion de datos	22
2.2.4. Interfaz de usuario	24
2.2.5. Analisis de consumo electrico del sistema	26
2.2.6. Esquema final para sistema disenado	28
3. Caso de estudio experimental	32
3.1. Biodigestor para pruebas de laboratorio	32
3.2. Adaptacion de sistema de telemetria a biodigestor en laboratorio	33
3.3. Registros experimentales	37

4. Conclusiones	49
4.1 Recomendaciones	50
4.2 Trabajo futuro	51
Bibliografía	52

Lista de Figuras

1.1. Biodigestor tubular	11
2.1. Arquitectura para biodigestor rural a ser implementado	17
2.2. Apariencia de sensores para medicion de gases y temperatura	21
2.3. Dispositivos empleados en sistema de telemetria	22
2.4. Esquema de gestion de informacion	23
2.5. Ventana de bienvenida para interfaz de usuario desarrollada en Wix.com ..	24
2.6. Distribucion de contenidos en interfaz de usuario	25
2.7. Ilustracion de datos capturados por la interfaz desarrollada	26
2.8. Distribucion para activacion de sistema de telemetria	27
2.9. Elementos seleccionados para alimentacion y conmutacion de dispositivos ..	29
2.10. Diagrama esquematico para sistema de telemetria disenado	31
3.1. Biodigestor implementado en laboratorio	34
3.2. Arquitectura modificada para biodigestor en laboratorio	35
3.3. Distribucion modificada para activacion de sistema de telemetria	36
3.4. Ubicacion de sensores en biodigestor experimental	38
3.5. Registros experimentales de temperatura	39
3.6. Registros experimentales de CH_4 en salida del biodigestor	41
3.7. Registros experimentales de CO_2 en salida del biodigestor	42
3.8. Registros experimentales de H_2S en salida del biodigestor	44
3.9. Registros experimentales de CH_4 en almacenamiento del digerido	45
3.10. Registros experimentales de CO_2 en almacenamiento del digerido	46
3.11. Relacion experimental: emisiones vs. temperatura ambiente	47

3.12. Ilustracion digerido anadido al experimento	48
---	----

Lista de Tablas

2.1. Valores típicos para tiempos de retención (tomado de [16])	16
2.2. Consumo energetico	27
2.3. Elementos utilizados en sistema de telemetria	30
3.1. Modificacion en consumo energetico	36

Capítulo 1

Introducción

En países en vía de desarrollo, aproximadamente el 52 % de las zonas rurales son conocidas como “no interconectadas” y son de difícil acceso debido a sus caminos terciarios. En estas zonas, las personas usan leña y/o gas propano como combustible para cocinar. Sin embargo, el uso de leña genera impactos ambientales y sociales como la deforestación y enfermedades respiratorias, y en el caso del propano se presentan limitaciones económicas (costo del cilindro de gas y costo de transporte) y técnicas (riesgo en la gestión de tanques de propano) para el acceso al combustible. De acuerdo con el contexto descrito, la producción de biogás mediante digestión anaerobia es una alternativa de energía renovable que contribuye a mitigar los impactos y limitaciones mencionados [5].

El proceso de digestión anaerobia consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno por un consorcio microbiano (bacterias hidrolíticas, fermentativas, acetogénicas y archaeas metanogénicas) para la producción de biogás. Dentro de las ventajas del proceso anaerobio, se resalta la capacidad para tratar un amplio rango de sustratos (ej: aguas residuales industriales y municipales, residuos sólidos municipales, estiércoles, residuos agropecuarios y cultivos energéticos) con altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable en forma de carbohidratos, lípidos y proteínas [15].

Actualmente, en Latinoamérica los sistemas más utilizados para llevar a cabo el proceso anaerobio son los digestores tubulares de bajo costo (DTBC). Los DTBC consisten en una

bolsa de plástico, con una entrada (alimentación) y dos salidas en tubo de PVC (descarga de digerido y salida de biogás). El gas producido se recolecta en un reservorio también plástico. Este tipo de digestores, se caracterizan por no tener sistemas de agitación, ni calentamiento y ser de fácil adquisición, por lo cual son llamados sistemas de bajo costo [11]. Los beneficios de los DTBC están asociados a la estabilización de materia orgánica (principalmente estiércoles), producción de biogás como combustible renovable, reducción de gases de efecto invernadero y uso agronómico del digerido [10].

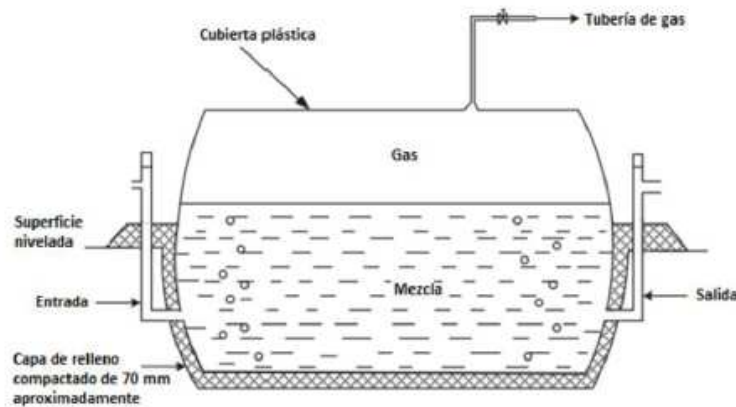


Figura 1.1: Biodigestor tubular

Particularmente, en Colombia, se han instalado alrededor de 500 DTBC en los cuales se utilizan como sustrato: estiércol bovino, estiércol porcino y la co-digestión de estiércol bovino y lactosuero, principalmente [6]. El gas producido en estas pequeñas y medianas plantas de biogás es usado para cocinar y como calefacción para animales [4].

Por otra parte, en Colombia, en términos políticos el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) en el año 2006 reconoció el uso de los DTBC como una tecnología alternativa de manejo del estiércol y optimización en el reciclaje de nutrientes. Sin embargo, aún faltan regulaciones que permitan controlar la calidad de los productos (digerido) generados en el proceso de digestión anaerobia.

A nivel rural, el uso del digerido se basa en su aplicación directa sobre la tierra sin tratamiento previo, generando inconvenientes debidos a la presencia de contaminantes ambientales (patógenos, metales pesados, pesticidas, hormonas). Por tanto, para una adecuada gestión y valorización de los digeridos se requiere evaluar su calidad en función del sustrato alimentado al digestor y de las variables del proceso (Temperatura, pH y tiempo de retención hidráulico), mismas que pueden monitorearse a través de sistemas de medición electrónica [11, 20].

En este sentido, diversos trabajos relacionados con la construcción de biodigestores y el análisis de sus variables relevantes, se encuentran reportados en la literatura, algunos de ellos incorporando tecnología electrónica para el registro, almacenamiento, transporte y procesamiento de información.

En particular, a nivel latinoamericano: en [8] Estrada *et. al* realizaron la instrumentación electrónica de un sistema de generación de biogás para monitorear un biodigestor empleando LabVIEW; en [18] Martínez desarrolló la automatización de un biodigestor anaerobio mediante un PLC Allen-Bradley SLC 500; en [1] Aguilar implementó, empleando un microcontrolador PIC, el control de temperatura y pH sobre biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala. A nivel colombiano se destacan los trabajos: [13] en el diseño de un sistema de control de temperatura y pH para la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos en un biorreactor tipo *Batch*; [7] en el diseño e implementación de un sistema de supervisión, monitoreo y control de temperatura, presión y tiempo de proceso en un sistema de digestión anaerobia de biomasa a escala de laboratorio y [19] en la evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos mediante monitoreo a distancia de un biorreactor batch a escala de laboratorio. A nivel de la Universidad Industrial de Santander se destacan los trabajos: [14] donde Mantilla y Rojas implementaron un reactor rural para la digestión anaeróbica de estiércol bovino; [17] basado en el diseño y construcción que realizaron Martínez y Rodríguez, complementado en [21] por Velandia, para un biodigestor anaerobio de lecho fijo y operación continua a escala piloto con control de temperatura y pH; y finalmente [3] en el cual Bermúdez y Díaz instrumentaron un biodigestor de estiércol animal para analizar su comportamiento dinámico.

A pesar de lo anterior, la mayoría de trabajos realizados se limitan al monitoreo de biodigestores en laboratorio y, por tanto, el factor diferenciador del presente trabajo de grado se orienta hacia la constitución de un sistema de adquisición y manejo de información en sitio (entorno rural de operación del biodigestor).

Adicionalmente, dado el carácter social de alternativas de bajo costo para satisfacer necesidades primarias de poblaciones campesinas, se destacan dos fundaciones interesadas en el desarrollo de soluciones tecnológicas para la gestión de operación de biodigestores anaeróbicos: *Red colombiana de energía de la biomasa* – Red BioCol (<https://www.redbiocol.org/>) y la *Fundación para la producción agropecuaria tropical sostenible* – UTA (<https://utafundacion.wixsite.com/utafoundation>).

De esta manera, a través de la ejecución del presente trabajo de grado se abordarán inquietudes como las siguientes: ¿Cómo instrumentar apropiadamente un biodigestor rural? ¿Qué alternativas de bajo costo existen para sensor electrónicamente las variables de un biodigestor en campo? ¿Cómo desarrollar un sistema electrónico para visualización remota de variables en un biodigestor? ¿Cuál es el tratamiento que debe darse a la precisión de los datos de medida en variables físicas para este tipo de procesos? ¿Cuáles son los rangos de medición importantes para las variables físicas de un proceso de biodigestión anaerobia?

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Diseñar e implementar un sistema electrónico para la monitorización remota de variables relevantes en la operación, bajo condiciones reales, de un biodigestor anaeróbico alimentado con estiércol bovino.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar las variables físicas relevantes en un proceso de biodigestión anaerobia;
- Establecer rangos de medida y seleccionar la instrumentación requerida para realizar monitoreo remoto del proceso de biodigestión anaerobia en campo;
- Desarrollar un sistema electrónico que permita adquirir y visualizar remotamente las variables relevantes del proceso de biodigestión.

Capítulo 2

Instrumentación de un biodigestor anaeróbico

El presente *Capítulo* presenta las generalidades de un biodigestor rural, para comprender su estructura y operación.

A partir de ello, se identificarán variables relevantes cuyo monitoreo permitirá comprender el estado de operación del biosistema.

Para este propósito se realizará una descripción general del biodigestor, su principio de operación y las principales etapas que lo componen. Posteriormente, se abordará la selección de elementos para constituir un sistema electrónico de telemetría orientado al registro en línea de sus variables relevantes.

2.1. Biodigestor rural

La Fig. [2.1](#) muestra un diagrama de bloques para el esquema general de un biodigestor rural, del cual se identifican las principales etapas involucradas en la producción del biogás, como resultado importante de todo el bioproceso (de digestión anaerobia). Adicionalmente, se incorporan a dicho diagrama las etapas correspondientes a la captura electrónica de variables y de gestión de su información, por parte del sistema a ser desarrollado en el

presente proyecto.

A continuación se realiza una descripción detallada de las partes más representativas del esquema.

2.1.1. Bioproceso

Del diagrama de la Fig. 2.1 se observa que el corazón del biodigestor se concentra en la etapa del *bioproceso de digestión anaerobia*. En particular, la digestión anaerobia es un proceso bioquímico de degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, llevado a cabo mediante poblaciones de microorganismos. Los principales productos de este proceso son: 1) fertilizante orgánico líquido, 2) fertilizante orgánico lodoso y 3) biogás. Para producir biogás es posible utilizar cualquier tipo de estiércol ya sea de vaca, cerdo, cabra, aves e incluso desechos humanos.

Para ejecutar el proceso de descomposición de la materia orgánica se requiere definir un *tiempo de retención* o de maduración, necesario para concluir el proceso de biodigestión y generar los respectivos productos. Este tiempo dependerá de la temperatura y las condiciones medioambientales del entorno donde se instale el biodigestor. La Tabla 2.1 ilustra valores típicos para los tiempos en diferentes tipos de región.

Tabla 2.1: Valores típicos para tiempos de retención (tomado de [16])

Región	Temperatura típica (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Para detalles específicos del *bioproceso de digestión anaerobica*, desde un punto de vista químico, se recomienda al lector interesado consultar los trabajos [7, 18].

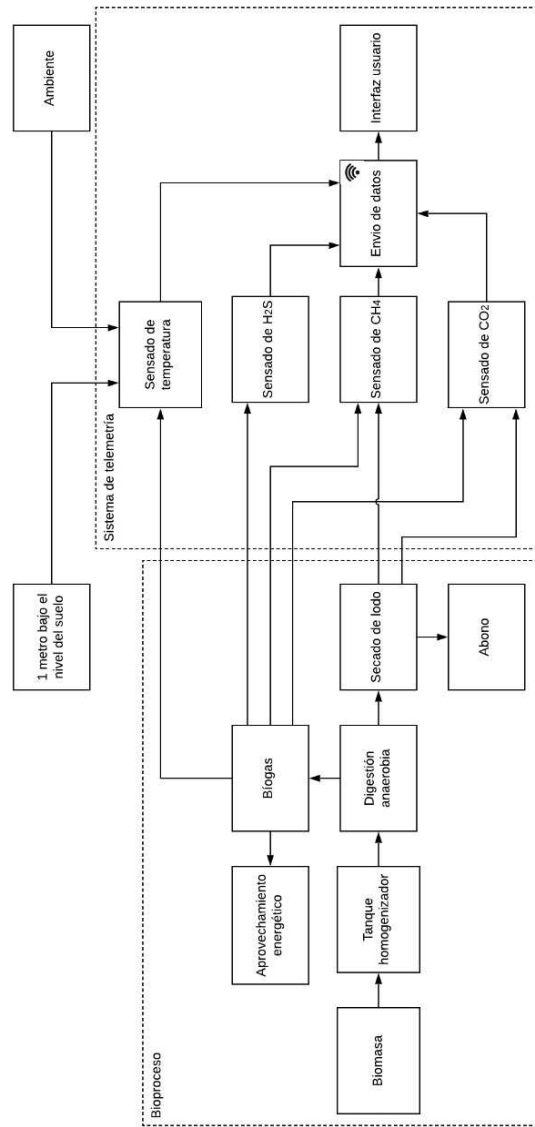


Figura 2.1: Arquitectura para biodigestor rural a ser implementado

2.1.2. Medición de gases

La descomposición orgánica se convierte inicialmente en ácidos volátiles que posteriormente son transformados en biogás. Este último, está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

Otro producto generado es el ácido sulfhídrico (H_2S), correspondiente con un gas tóxico que define la calidad del biogás producido en la reacción.

2.1.3. Medición de temperatura

La temperatura de la mezcla en el biodigestor es un factor importante para la eficiencia del proceso de digestión. La mayoría de las bacterias anaeróbicas funcionan mejor en el rango de temperatura de 30 a $35^\circ C$, constituyendo el rango óptimo para la producción de biogás.

Obsérvese que dicho rango de temperatura es propicio para zonas tropicales de la geografía colombiana, incluyendo Bucaramanga y los Santanderes. Asimismo, se resalta la sensibilidad del proceso sobre estas condiciones de operación, hasta el punto que para temperaturas inferiores a $5^\circ C$ las bacterias se desactivan y con ello la producción del biogás.

La medición de temperaturas debe tener en cuenta, además de aquellas presentes al interior del biodigestor, factores ambientales como la temperatura del suelo y la del exterior.

2.1.4. Medición de acidez

Otro factor importante a tener en cuenta para facilitar la producción del biogás es la variación en acidez o alcalinidad (pH) de la mezcla orgánica en el biodigestor. Durante el proceso de digestión se producen ácidos orgánicos que de no controlarse pueden hacer que la mezcla se torne gradualmente ácida, lo que puede inhibir los procesos bacterianos y enzimáticos.

La mayoría de las bacterias anaerobias, incluyendo las bacterias productoras de metano,

se desempeñan adecuadamente dentro del rango de 6.8 a 7.5 pH (esto es neutral a ligeramente alcalino).

La regulación del pH en el rango deseado se logra agregando a la mezcla materiales alcalinos, tales como cal o cenizas.

2.1.5. Aprovechamiento energético

El biogás producido puede ser empleado como combustible en diversas aplicaciones que van desde la calefacción de alimentos y de agua, hasta su uso como fuente energética para procesos agroindustriales a pequeña escala. De ahí entonces que sea necesario realizar un monitoreo de la calidad del biogás generado por el proceso de digestión anaerobia, para satisfacer los estándares de calidad requeridos por la normatividad colombiana e internacional. Al respecto se pueden mencionar:

1. INTE/ISO 20675:2019: Esquema de clasificación para la producción, acondicionamiento, mejoramiento y utilización de biogás;
2. Resolución CREG 240 de 2016: Regulación para la comercialización del biogás y el biometano como alternativa de combustible en Colombia;
3. NTC 4233:1997: Evaluación de la biodegradabilidad de los compuestos orgánicos en lodos de digestión.

2.2. Diseño de sistema de telemetría

En complemento a la descripción de operación del biodigestor rural, se presenta a continuación el diseño de un sistema electrónico para la captura de información (en tiempo de ejecución) de variables relevantes del sistema a manera de monitorización en tiempo real mediante telemetría.

2.2.1. Selección de dispositivos de sensado

Tomando en cuenta las variables relevantes del *bioproceso* y los rangos típicos para las mismas a nivel práctico, se procedió con la elección de un conjunto de sensores que facilitarían capturar información del estado de las diferentes etapas del *biodigestor* rural.

Para ello, se realizó un balance entre especificaciones y costo, tratando de cubrir el mayor rango de variables con dispositivos de fácil consecución en el mercado y a costos razonables.

Como consecuencia de lo anterior se seleccionaron los siguientes elementos:

- Sensor de metano (CH_4): se eligió el modelo genérico MQ-4, cuyo valor comercial está alrededor de \$9.500 COP. Este sensor permite detectar el gas metano en un rango de entre 200 y 10000 ppm. La Fig 2.2(a) ilustra su apariencia física;
- Sensor de dióxido de carbono (CO_2): se eligió el modelo genérico MQ-135, cuyo valor comercial está alrededor de \$9.500 COP. Este sensor permite detectar el dióxido de carbono en un rango de entre 10 y 200 ppm. La Fig 2.2(b) ilustra su apariencia física;
- Sensor de ácido sulfhídrico (H_2S): se eligió el modelo genérico MQ-136, cuyo valor comercial está alrededor de \$25 USD. Este sensor permite detectar el ácido sulfhídrico en un rango de entre 10 y 200 ppm. La Fig 2.2(c) ilustra su apariencia física;
- Sensor de temperatura: se eligió el modelo genérico DS18B20, cuyo valor comercial está alrededor de \$8.000 COP. Este sensor es sumergible y permite detectar temperaturas en un rango de entre -55 y 125 °C. La Fig 2.2(d) ilustra su apariencia física.

Todos los sensores seleccionados son compatibles con los protocolos de conexión y comunicación disponibles en tarjetas digitales estándar. Características particulares para los mismos se encuentran detalladas en las hojas de datos de los respectivos fabricantes.

2.2.2. Selección de dispositivo de acopio de información

Para almacenar la información capturada de los sensores de gases y temperatura, se propone la utilización del sistema de desarrollo para microcontrolador *ATMEL* denominado: *Arduino MEGA*. Este dispositivo es de fácil consecución en el mercado, a un bajo costo que



(a) Sensor de metano (CH_4)



(b) Sensor de dióxido de carbono (CO_2)



(c) Sensor de ácido sulfhídrico (H_2S)



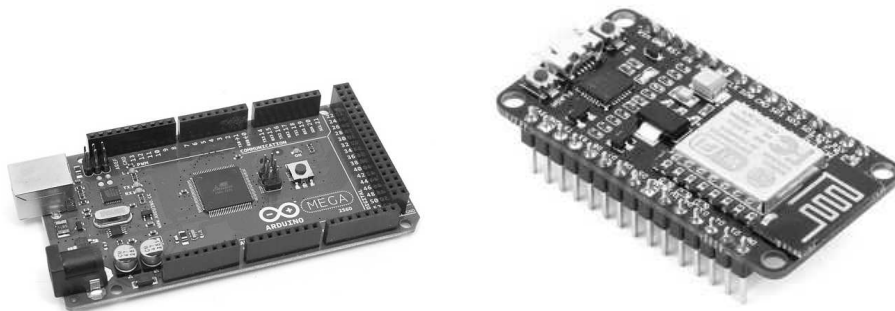
(d) Sensor de temperatura

Figura 2.2: Apariencia física de sensores seleccionados para medición de gases y temperatura

oscila alrededor de los \$50.000 COP. Adicionalmente, posee prestaciones suficientes a nivel de recursos de hardware para facilitar la conexión de los sensores y realizar el procesamiento de la información entregada por los mismos.

Dentro de las especificaciones más importantes del dispositivo se tienen: CPU core: *AT-mega2560*; voltaje de entrada: 7 - 12 VDC; 54 entradas/salidas digitales; 15 salidas PWM; 16 entradas analógicas; 4 periféricos de comunicación UART (serial); 256 kB de memoria (flash) - 8 kB (SRAM) - 4 kB (EEPROM); 16 MHz de velocidad de reloj.

A pesar de lo anterior, la tarjeta *Arduino MEGA* no posee conectividad a internet, y por tanto es necesario agregarle un periférico externo que satisfaga dicho propósito. Dentro de las opciones disponibles en el mercado se seleccionó el *módulo WiFi ESP8266* por ser enteramente compatible con el sistema de desarrollo a emplear, además de poseer un bajo costo (cercano a los \$20.000 COP) y características estándar para conectarse a redes de comunicación, lo cual lo hace popular en aplicaciones.



(a) *Arduino MEGA*

(b) *módulo WiFi*

Figura 2.3: Dispositivos empleados para manejo y transmisión de información en el sistema de telemetría

2.2.3. Esquema de gestión de datos

El esquema de gestión de información del sistema de telemetría se ilustra en la Fig. 2.4. A partir de ello, se reconocen las siguientes fases:

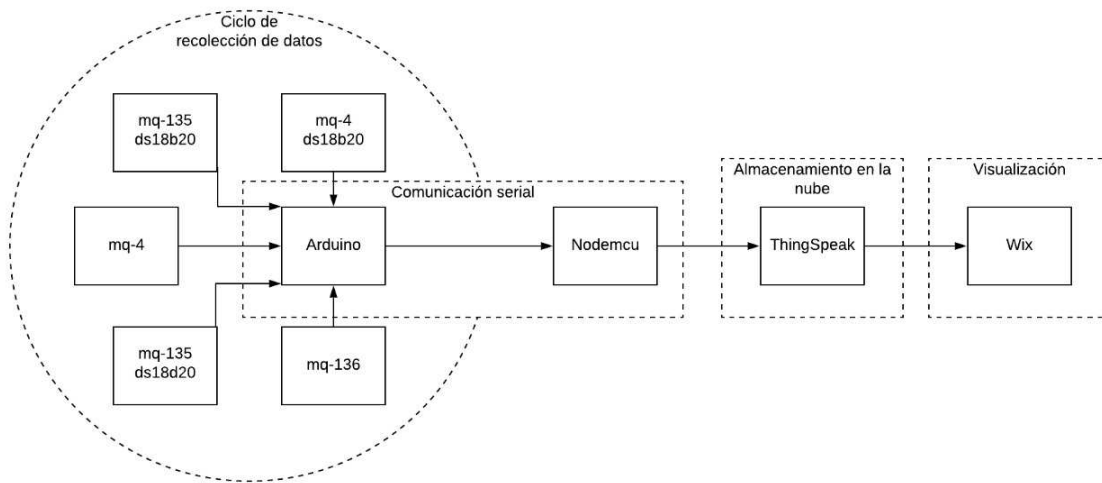


Figura 2.4: Esquema de gestión de información

- a. *Recolección de datos:* corresponde con la captura de información desde los dispositivos de sensado, a partir de la lectura de los puertos de entrada configurados en el *Arduino MEGA*. El procedimiento se realiza en modo secuencial con una tasa de actualización de 1800 s. Posteriormente en el texto se realizará una descripción del formato de operación de lectura implementado;
- b. *Comunicación serial:* posteriormente, la información de sensado es empaquetada en una trama de datos serial, que posteriormente se envía al *módulo WiFi* mediante comunicación serial;
- c. *Almacenamiento en la nube:* en este paso del proceso se envía la información (mediante el *módulo WiFi*) a través de internet hacia los servidores del proyecto *ThingSpeak* (<https://thingspeak.com/>), el cual facilita el almacenamiento gratuito de datos en la nube para aplicaciones de *IoT* (*Internet of Things*) sin ánimo de lucro, como la desarrollada en el presente proyecto;
- d. *Visualización:* el último paso del proceso involucra el acceso remoto de un usuario a la información actualizada de las variables del sistema a través de una interfaz para visualización del comportamiento histórico de las medidas de sensores.



Figura 2.5: Ventana de bienvenida para interfaz de usuario desarrollada en *Wix.com*

2.2.4. Interfaz de usuario

Tal y como fue mencionado en la *Sección* anterior, el almacenamiento de datos se realizó en los servidores del proyecto *ThingSpeak*. Por tanto, para realizar gestión de la información almacenada se desarrolló una interfaz de interacción con el usuario a través de la plataforma *Wix.com* (<https://es.wix.com>) especialmente diseñada para trabajar con datos en la nube.

La programación en *Wix.com* es básica y se desarrolla en lenguaje *HTML5*. La interfaz creada puede accederse en la dirección:

<https://biodigestoruis.wixsite.com/biodigestor>

De otro lado, la Fig. 2.5 muestra el aspecto de la ventana de bienvenida que se despliega accediendo al recurso. A partir de allí, se configuraron las opciones que se indican mediante los menús y submenús que se detallan en el *cuadro sinóptico* de la Fig. 2.6.

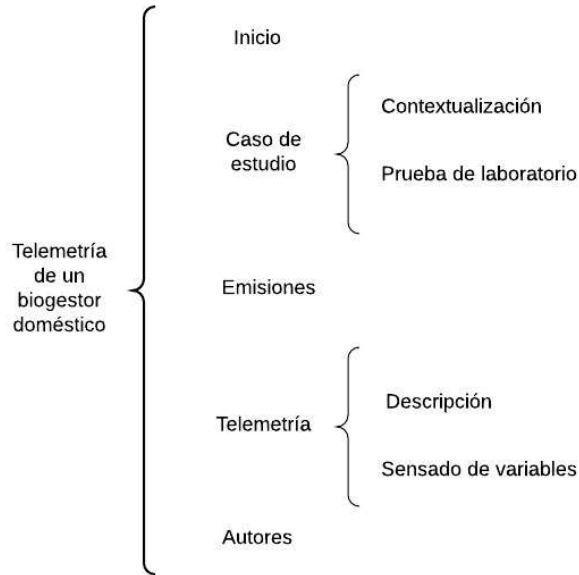


Figura 2.6: Distribución de contenidos en interfaz de usuario

De todas las opciones de menú presentadas en la Fig. 2.6, la correspondiente a **TELEMETRÍA** → **Sensado de variables** es la que permite visualizar a través de series de tiempo la información capturada en los diferentes sensores instalados en un sistema de real de pruebas. La información que se presenta a través de esta opción incluye: 1) el monitoreo de temperatura en el biogás, en el ambiente y a un metro bajo tierra; 2) la captura de CH_4 en el biogás y en el fertilizante orgánico (lodos); 3) la captura de CO_2 en el biogás y en el fertilizante orgánico (lodos); 4) la captura de H_2S en el biogás y 5) los valores medidos para los gases (CH_4 , CO_2 y H_2S) como función de la temperatura ambiente. Adicionalmente, se grafica la superposición para las temperaturas sensadas en los tres puntos del sistema con el ánimo de verificar la uniformidad de los datos y, a su vez, la eficiencia de la construcción del biodigestor (efecto invernadero). Como ejemplo, la Fig. 2.7 ilustra el caso de una captura para la *temperatura bajo tierra* visualizada en la interfaz de usuario desarrollada. Asimismo, puede realizarse la descarga de los datos visualizados a través de la plataforma **ThingSpeak** mediante un archivo de valores separados por comas (*.csv) para efectuar posteriores análisis de la información sensada.

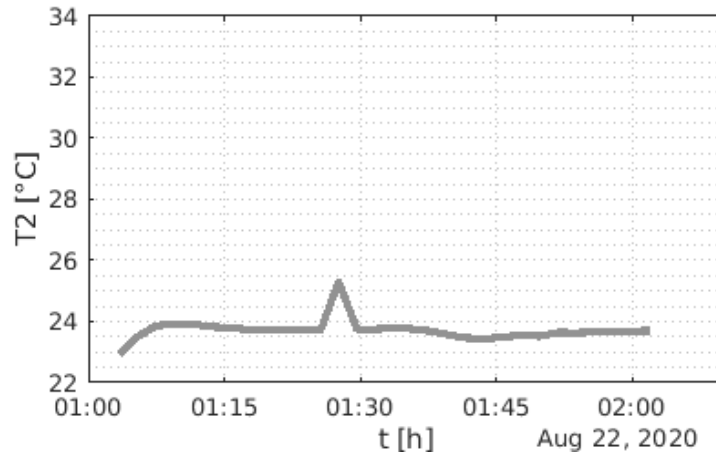


Figura 2.7: Ilustración de datos capturados por la interfaz desarrollada

2.2.5. Análisis de consumo eléctrico del sistema

La calidad de las mediciones electrónicas realizadas por el sistema de telemetría diseñado, depende en gran medida de una apropiada alimentación de potencia en los elementos de sensado. Asimismo, se considera que el sistema desarrollado realizará una operación de monitoreo continua a lo largo del tiempo. Por tanto, en aras de reducir el consumo eléctrico total del sistema se propone una operación alternada de componentes dependiendo de la necesidad de energización, a partir de la secuencia de activación ilustrada en la Fig. 2.8.

La relación de consumo eléctrico por tiempo de uso para los elementos del sistema de telemetría diseñado se muestra en la Tabla 2.2 con base en la información suministrada por las hojas de datos de los fabricantes.

A partir de ello, se estima un consumo promedio de:

$$\frac{1048 [mA]}{1800 [s]} = \frac{1.048 A}{30 [min]} = \frac{1.048 [A]}{0.5 [h]} = 2.096 [Ah],$$

como requerimiento de alimentación de los circuitos del sistema.

Una alternativa de solución para garantizar este suministro, corresponde con la implementación de un esquema basado en baterías. Sin embargo, a pesar de la portabilidad que

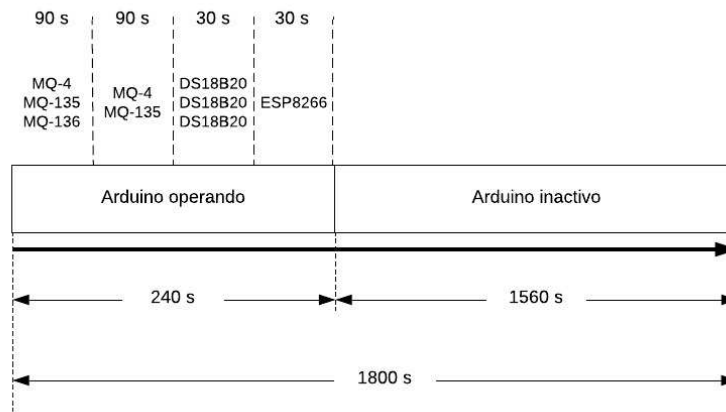


Figura 2.8: Distribución temporal para activación de elementos en sistema de telemetría

Tabla 2.2: Consumo energético

Elemento	Tiempo uso [s]	Consumo [mA]
sensores CH_4 (MQ-4)	180	300
sensores CO_2 (MQ-135)	180	320
sensor de H_2S (MQ-136)	90	160
sensores de temperatura (DS18B20)	90	4.5
<i>Arduino MEGA</i> modo activo	240	93
<i>Arduino MEGA</i> modo inactivo	1560	0.5
<i>módulo WiFi</i> (ESP8266)	30	170
TOTALES	1800	1048

esta solución ofrecería para el sistema de telemetría y a la garantía de continuidad en mediciones, esta posibilidad se descarta en la versión actual del prototipo debido a limitaciones presupuestales.

Por tanto, se opta por realizar la alimentación del sistema a través de una fuente de poder ATX (para computador de escritorio) previamente disponible, en calidad de proporcionar salidas de tensión de corriente continua con valores de: +3.3, 5 y 12 [VDC] respectivamente además de una capacidad de corriente de hasta 5 [A], suficientes para satisfacer el consumo requerido.

Adicionalmente, se incorpora un circuito convertidor reductor DC/DC de referencia *LM2596* y valor comercial cercano a los \$6.000 COP, para compensar las atenuaciones debidas a la distancia de instalación de algunos sensores. En este caso, el dispositivo no actúa como un amplificador sino como un atenuador controlado para una entrada de 12 [VDC], con voltaje de salida configurado a 6 [VDC].

Por su parte, la activación de la secuencia de elementos se logra gracias a una tarjeta de 8 relé, con capacidad de carga de hasta 250 [VAC] / 10 [A] y pulsos de activación de 5 [VDC] protegidas mediante acople óptico. El valor comercial de esta tarjeta es de alrededor de \$28.000 COP.

La apariencia física para la fuente de alimentación, el convertidor reductor y la tarjeta de relé, se presenta en la Fig. [2.9](#).

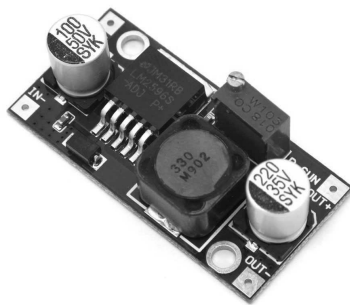
2.2.6. Esquema final para sistema diseñado

La solución de ingeniería propuesta para este proyecto se puede observar a través del diagrama esquemático ilustrado en la Fig. [2.10](#), en el cual se detalla a nivel de plano de conexiones eléctricas la configuración de dispositivos seleccionados para implementar el sistema de telemetría del biodigestor.

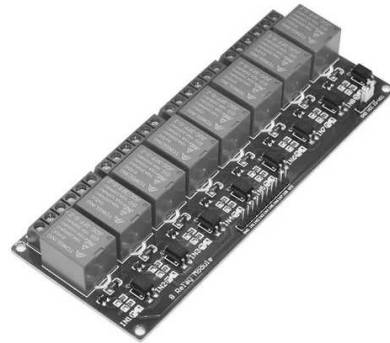
Asimismo, se relaciona en la Tabla [2.3](#) la lista de elementos utilizados, junto con su



(a) Fuente de poder



(b) Convertidor reductor



(c) Tarjeta de relé

Figura 2.9: Elementos seleccionados para alimentación y conmutación de dispositivos

respectivo valor comercial.

Tabla 2.3: Elementos utilizados en sistema de telemetría

Cantidad	Elemento	Precio unitario COP	Precio total COP
1	Arduino Mega	\$50.000	\$50.000
1	Nodemcu	\$20.000	\$20.000
2	Sensor MQ-4	\$9.500	\$19.000
2	Sensor MQ-135	\$9.500	\$19.000
1	Sensor MQ-136	\$99.000	\$99.000
3	Sensor DS18B20	\$8.000	\$24.000
1	Fuente de poder	\$15.000	\$15.000
1	Tarjeta de relé	\$28.000	\$28.000
1	Convertidor reductor	\$6.000	\$6.000
3	Resistencias de $4.7k\Omega$	\$100	\$300
		TOTAL	\$280.300

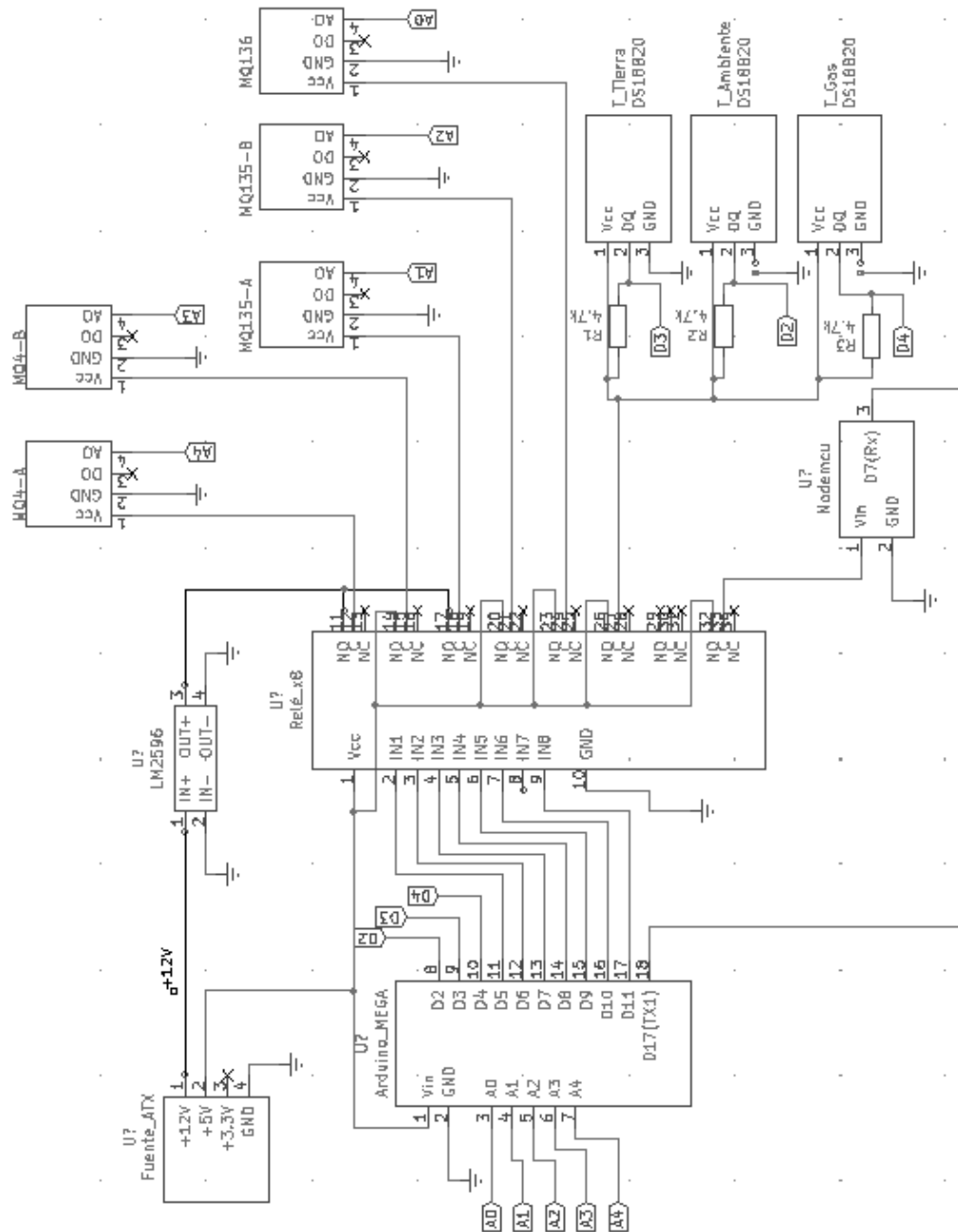


Figura 2.10: Diagrama esquemático para sistema de telemetría diseñado

Capítulo 3

Caso de estudio experimental

El sistema de telemetría diseñado e implementado en el *Capítulo* anterior, fue concebido para ser operado sobre las variables físicas de un biodigestor rural.

Sin embargo, la componente experimental del presente trabajo de grado se desarrolló en medio de la emergencia sanitaria ocasionada por el virus SARS-CoV-2 (COVID 19) y por tanto, fue necesario adaptar el sistema de medición a las características de un biodigestor en laboratorio.

De esta manera, el presente *Capítulo* se orienta a la descripción del prototipo utilizado como caso de estudio, las adaptaciones realizadas al esquema diseñado, las mediciones efectuadas sobre sus variables y los respectivos análisis de datos durante su operación.

3.1. Biodigestor para pruebas de laboratorio

El *laboratorio de biotecnología* (ubicado en el *aula 10B* del *edificio 24*) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, dispone de un *biodigestor tubular* de 9.2 L de volumen total y 6 L de volumen de trabajo. El *biodigestor* está constituido por un tubo PVC de 4" de diámetro y 1 m de longitud. Adicionalmente, dispone de dos tubos de PVC de 1" que funcionan como entrada de alimentación y salida de digerido.

El *biodigestor* es alimentado con una mezcla de estiércol y aguas residuales de lavado de

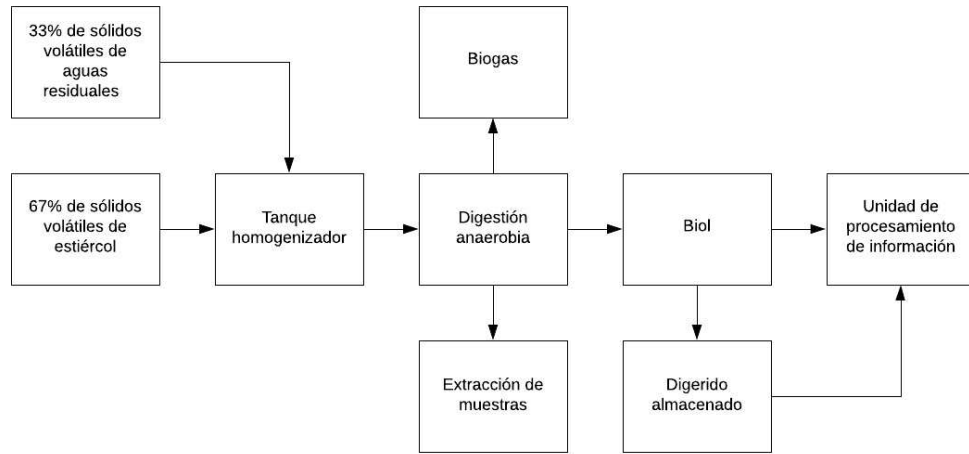
vísceras provenientes de una planta de beneficio bovino, en una relación del 67 % de sólidos volátiles de estiércol y un 33 % de sólidos volátiles de aguas residuales. La carga orgánica del *biodigestor* es de 1.29 kg SV/ m^3 d con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 18 días. Una vez al día, de lunes a viernes, se mide la presión del biogas dentro del *biodigestor* (por medio de un manómetro), se retiran 333 ml de digerido (mediante una válvula de salida) y se alimenta la misma cantidad de mezcla de estiércol y aguas residuales (empleando la tubería de alimentación para dicho fin). Para información detallada al respecto de la operación y características químicas del *biodigestor*, se recomienda al lector interesado consultar el trabajo de investigación de maestría desarrollado por *J. A. Esteves* en [12].

De otro lado, la Fig. 3.1(a) muestra un diagrama de bloques que ilustra la estructura general del *biodigestor* instrumentado. Las mismas etapas se indican en el montaje experimental realizado en laboratorio y presentado en la Fig. 3.1(b), donde además se observan elementos de otros biodigestores que no corresponden con los propósitos del presente trabajo de grado.

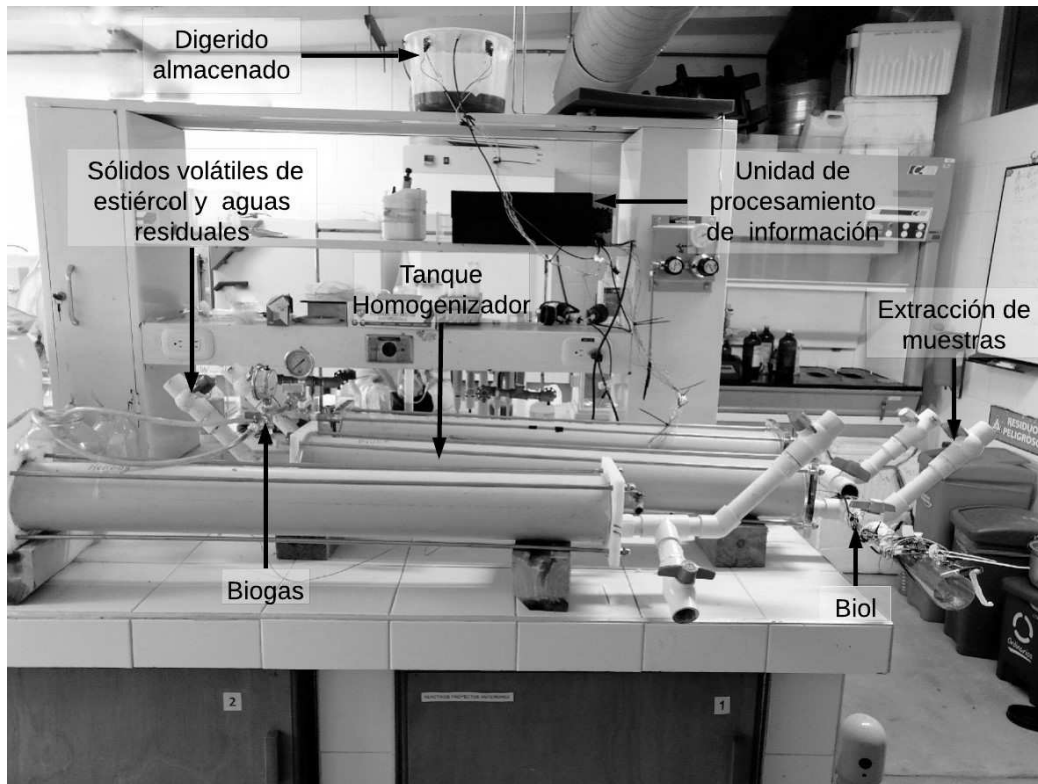
3.2. Adaptación de sistema de telemetría a biodigestor en laboratorio

La arquitectura del sistema de telemetría diseñado para un biodigestor rural (según diagrama ilustrado en la Fig. 2.1), tuvo que ser adaptada a las condiciones del caso de estudio implementado en laboratorio a partir de las siguientes modificaciones:

1. El nuevo *biodigestor* se encuentra ubicado al interior de un edificio de laboratorios y por tanto pierde sentido realizar el monitoreo de la temperatura bajo tierra. Así entonces, esta variable no será medida;
2. En el nuevo montaje las concentraciones experimentales para el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y el ácido sulfhídrico (H_2S) a la salida del biogás, superan los rangos de medida para los sensores seleccionados. Por tanto, se realiza una reorientación del objetivo del monitoreo de manera tal que ahora se identifiquen emisiones de estos componentes en el entorno de operación del *biodigestor*. A partir de ello, se



(a) Diagrama de bloques



(b) Montaje experimental

Figura 3.1: Biodigestor implementado en laboratorio

realiza una modificación para la arquitectura del sistema de telemetría según el esquema propuesto en la Fig. 3.2, del cual se resalta la ausencia de mediciones bajotierra. Asimismo, el sensado de H_2S se realiza directamente a partir del secado de lodo y no a través del biogás, mientras que las mediciones de CO_2 y CH_4 se obtienen del almacenamiento del digerido;

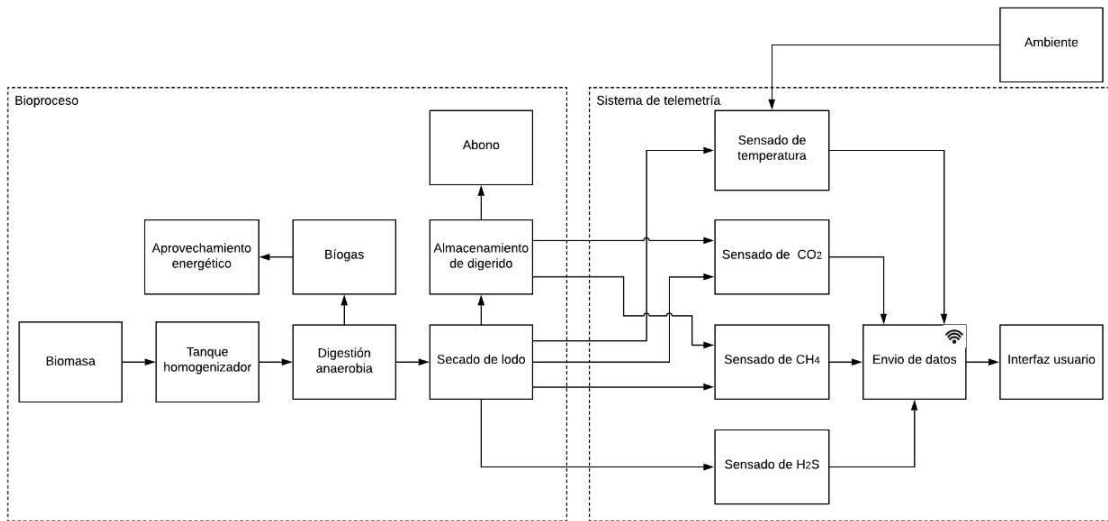


Figura 3.2: Arquitectura modificada para biodigestor en laboratorio

- La dinámica de las variables para el biodigestor en laboratorio es distinta de aquella para un biodigestor rural. En consecuencia, los tiempos de captura y el consumo energético definidos en la *Subsección 2.2.5* para el sistema de telemetría, debieron ser reconsideradas según ilustrado por la nueva distribución temporal para activación de elementos de la Fig. 3.3 y los datos de consumo energético actualizados en la Tabla 3.1. A partir de ello, se observa una captura simultánea de registros de medida en un intervalo de 5 [s] seguida de otros 20 [s] como tiempo de espera para envío de la siguiente trama de datos. Lo anterior, permite estimar un consumo promedio de

$$\frac{1046 [mA]}{25 [s]} = \frac{1.046 A}{0.417 [min]} = \frac{1.046 [A]}{0.00694 [h]} = 150.72 [Ah],$$

valor apreciablemente superior al calculado en la arquitectura inicial y que se justifica por el incremento en la frecuencia de operaciones del sistema de telemetría.

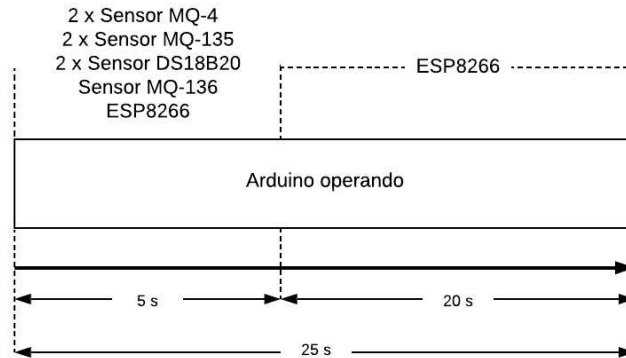


Figura 3.3: Distribución temporal modificada para activación de elementos en sistema de telemetría

Tabla 3.1: Modificación en consumo energético

Elemento	Tiempo uso [s]	Consumo [mA]
sensores CH_4 (MQ-4)	5	300
sensores CO_2 (MQ-135)	5	320
sensor de H_4S (MQ-136)	5	160
sensores de temperatura (DS18B20)	5	3
<i>Arduino MEGA</i> modo activo	25	93
<i>Arduino MEGA</i> modo inactivo	0	0.5
<i>módulo WiFi</i> (ESP8266)	25	170
TOTALES	25	1046

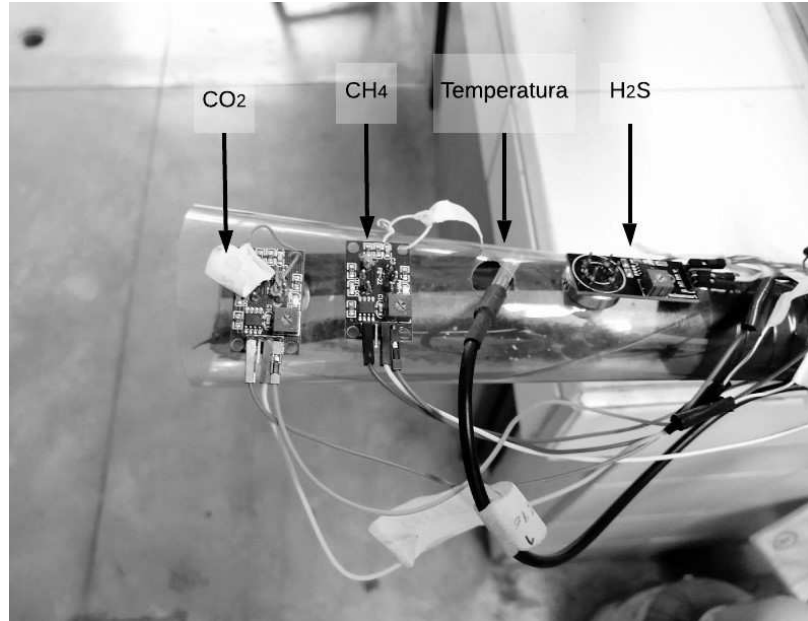
4. Se modifican las gráficas consideradas para la interfaz de visualización de datos, dejando en definitiva a las siguientes: 1) el monitoreo de temperatura en la corriente de salida del biodigestor (lodos) y en el ambiente; 2) las emisiones de CH_4 en el secado de lodos y en el almacenamiento del digerido; 3) las emisiones de CO_2 en el secado de lodos y en el almacenamiento del digerido; 4) las emisiones de H_2S en el secado de lodos y 5) los valores medidos para los gases (CH_4 en el almacenamiento del digerido, CO_2 en el almacenamiento del digerido y H_2S en el secado de lodos) como función de la temperatura ambiente. Adicionalmente, se conserva la gráfica de la superposición entre las temperaturas sensadas. La Fig. 3.4(a) muestra en detalle la ubicación de los sensores en la corriente de salida del biodigestor. Por su parte, la Fig. 3.4(b) hace lo propio para los sensores ubicados en el almacenamiento del digerido.

3.3. Registros experimentales

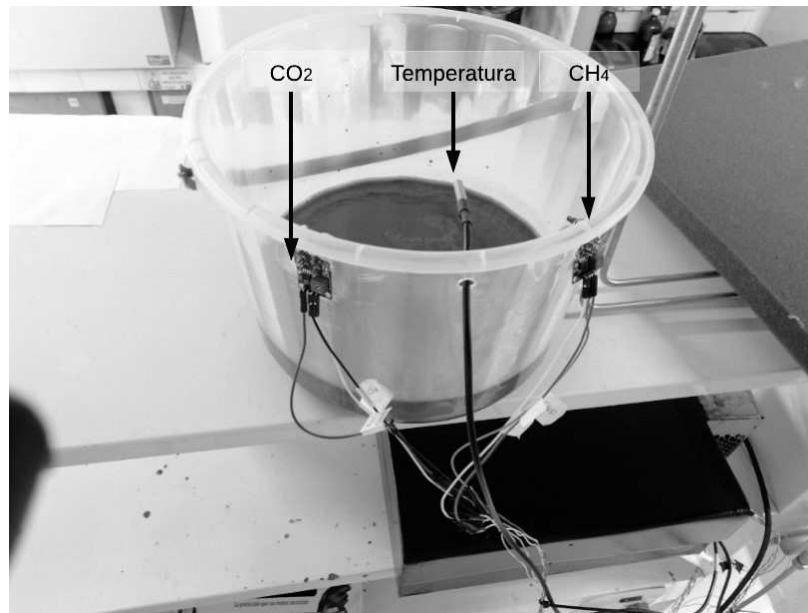
Una vez realizadas las adaptaciones correspondientes al sistema de monitoreo para el *biodigestor* en laboratorio, se procedió con el registro de sus variables operativas en un intervalo de 19 días de captura ininterrumpida (cubriendo el periodo comprendido entre noviembre 25 y diciembre 14 de 2020).

Inicialmente, se presenta en la Fig. 3.5 el resultado para las mediciones de temperatura, de las cuales se observa una tendencia para el caso de la temperatura ambiente (curva en trazo negro) de entre 25 °C y 27 °C durante el intervalo de medición, lo cual concuerda con los promedios históricos de la ciudad de Bucaramanga. Más aún, el detalle de la Fig. 3.5(b) para el día 4 de diciembre, muestra el incremento natural de la temperatura cercana al mediodía acompañado por reducciones en horas de la mañana y de la noche. Por su parte, el comportamiento para la temperatura en la corriente de salida del biodigestor (curva en trazo gris) muestra una forma de onda que coincide con las variaciones de temperatura en el ambiente, aunque manteniéndose siempre alrededor de 2 °C por encima.

De otro lado, la Fig. 3.6 muestra los registros correspondientes a las emisiones de CH_4 en la corriente de salida del biodigestor, permitiendo verificar en la Fig. 3.6(a) la presencia

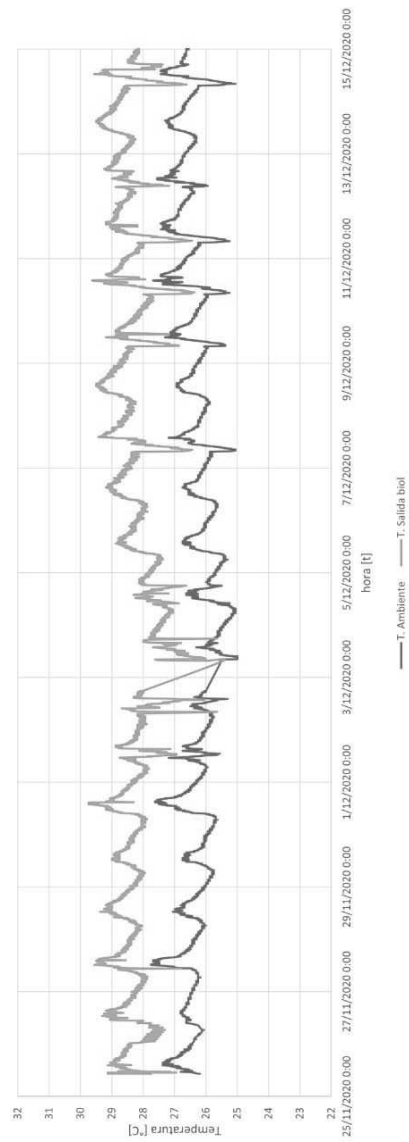


(a) Corriente de salida (lodos)

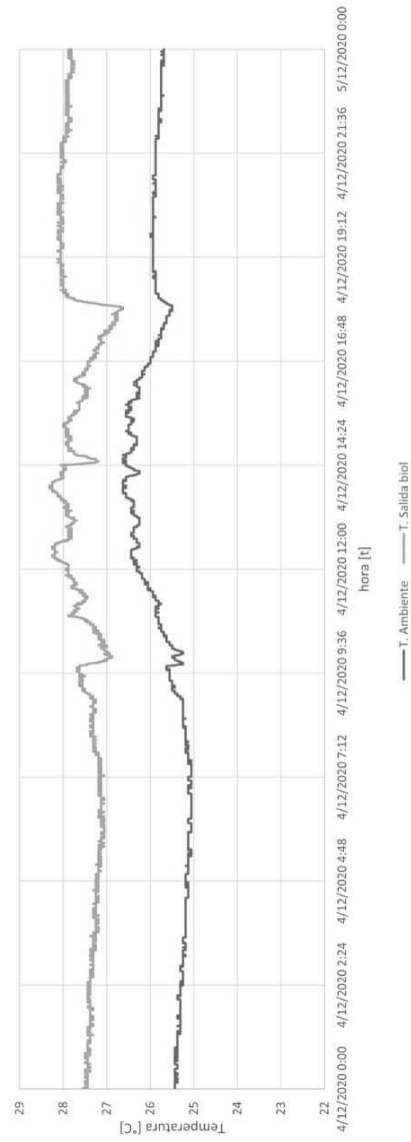


(b) Almacenamiento de digerido

Figura 3.4: Ubicación de sensores en biodigestor experimental



(a) Registro completo



(b) Detalle al 4 de diciembre

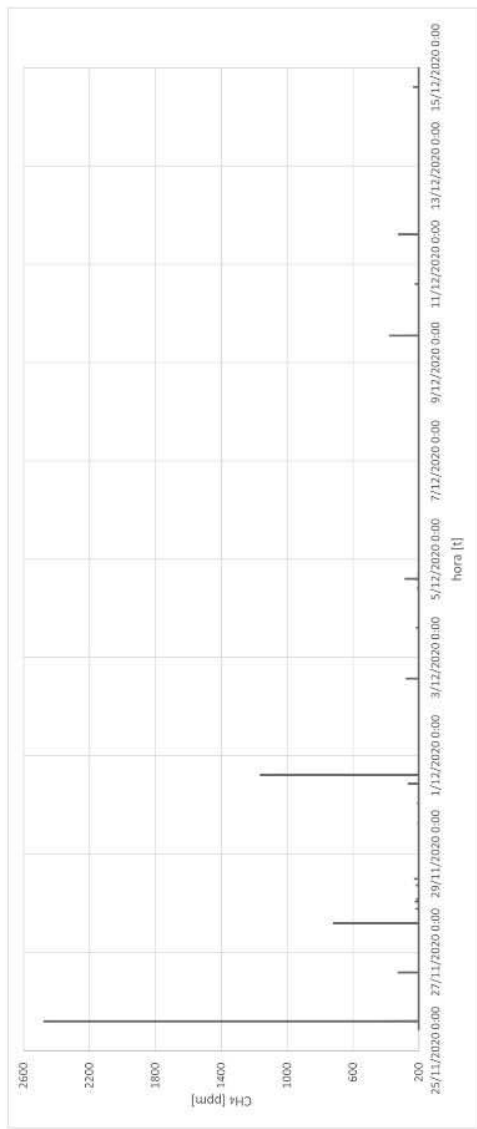
Figura 3.5: Registros experimentales de temperatura (*trazo negro*: temperatura ambiente; *trazo gris*: temperatura en secado de lodos)

de picos de magnitud considerable (con valores máximos de 1000 *ppm*) aunque de corta duración y que dependen de la producción diaria del biodigestor, evidenciados principalmente al momento de realizar los procedimientos de descarga del digerido. Adicionalmente, para evitar que dichos picos se malinterpreten como ruidos de medida, el detalle fino de la Fig. 3.6(b) permite observar transiciones suaves entre los valores sensados para la variable, cuyo valor mínimo se mantiene la mayor parte del tiempo en alrededor de 200 *ppm*.

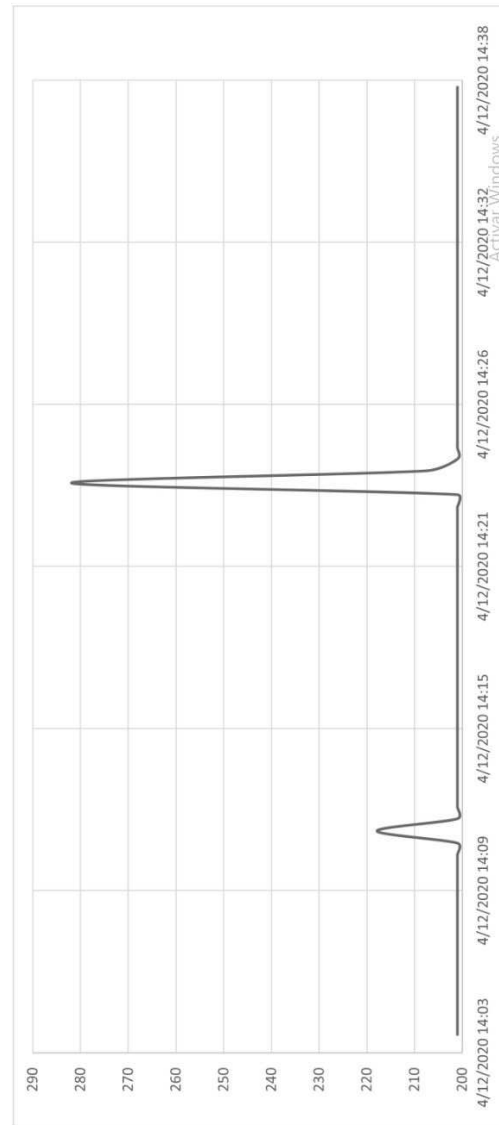
En cuanto respecta a las emisiones de CO_2 en la corriente de salida del biodigestor, la Fig. 3.7 muestra una dinámica interesante para esta variable con un patrón de periodicidad diaria que permite relacionar su comportamiento con los instantes de carga y descarga del bioproceso, adicional a una tendencia media del sensado en alrededor de 30 *ppm* (valor bajo comparado con las 200 *ppm* registradas en sus valores pico).

Por su parte, el comportamiento para las emisiones de H_2S en la corriente de salida del biodigestor se aprecia en la Fig. 3.8. En este caso, la tendencia de los registros es similar a la evidenciada para las emisiones de CH_4 en la corriente de salida del biodigestor. Su valor mínimo se registra alrededor de las 10 *ppm*.

Es conocido que los digestores ayudan a mitigar el efecto de gases de invernadero durante su operación, sin embargo, los datos encontrados muestran que se pueden presentar emisiones que afectan la esfera ambiental de la atmosfera. Estas emisiones son perjudiciales porque atrapan calor en la atmosfera contribuyendo al cambio climático. De hecho, se ha mostrado que pequeñas cantidades de metano pueden causar grandes efectos, llegando a ser mucho más contaminante que el dióxido de carbono. Los límites permitidos de acuerdo con la calidad del aire son 1000 *ppm* de dióxido de carbono en lugares cerrados por lo tanto los digestores aun estando lejanos de estos límites deben implementar estrategias para mitigar estas emisiones propias de su operación. En el caso del ácido sulfhídrico su impacto es más significativo tomando en cuenta la toxicidad en este tipo de gas y por tanto, deberán evitarse los picos de concentración de emisiones detectados al momento de las descargas para reducir posibles afectaciones a la salud de las personas que ingresan diariamente al laboratorio donde se realizaron las mediciones.

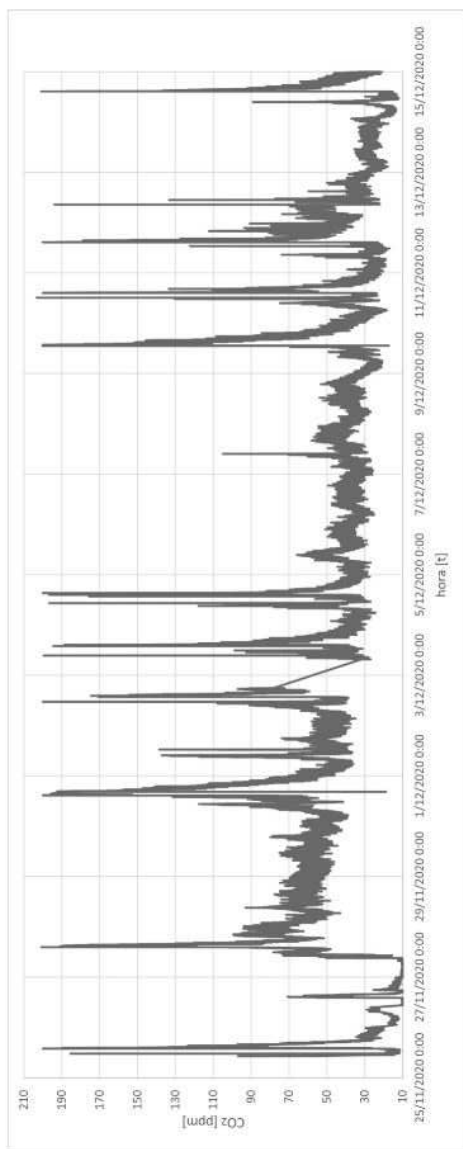


(a) Registro completo

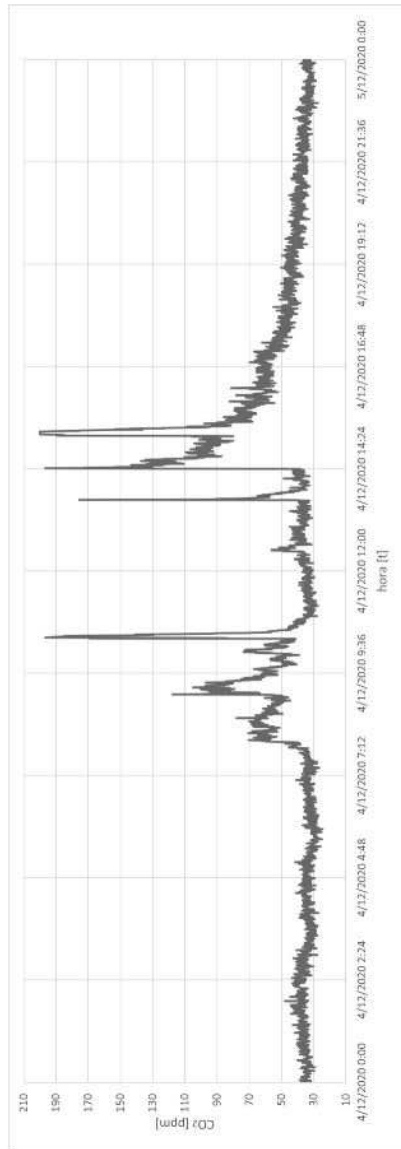


(b) Detalle al 4 de diciembre

Figura 3.6: Registros experimentales de CH_4 en la corriente de salida del biodigestor



(a) Registro completo



(b) Detalle al 4 de diciembre

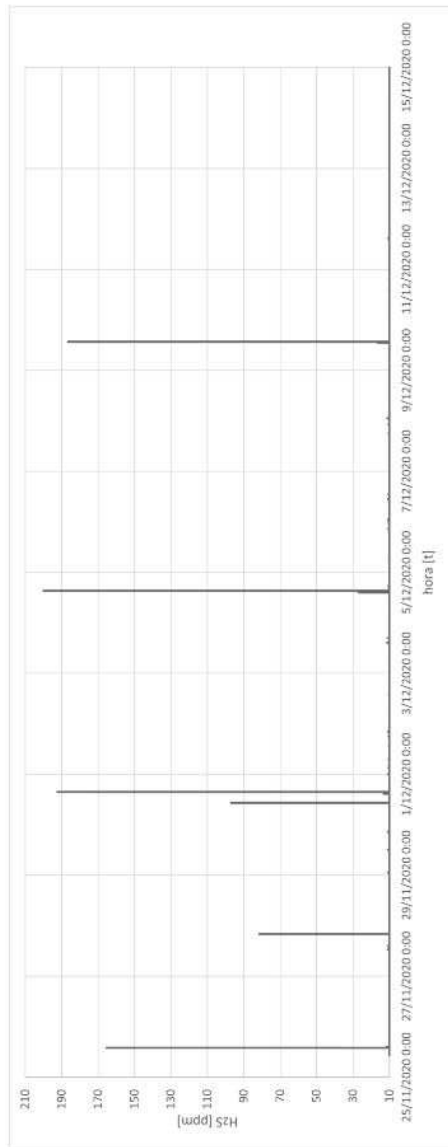
Figura 3.7: Registros experimentales de CO₂ en la corriente de salida del biodigestor

Ahora bien, para las mediciones efectuadas en el almacenamiento del digerido la Fig. 3.9 indica una variación apreciable de las emisiones de CH_4 en los primeros días de la ventana global de captura (Fig. 3.9(a)) con valores pico por encima de las 600 *ppm*, que posteriormente se estabilizan como muestra de la maduración (*bioquímica*) del proceso de digestión. De otro lado, el detalle presentado en la Fig. 3.9(b) sugiere que las variaciones se presentan principalmente en horarios cercanos al mediodía, debido quizás a la incidencia de la temperatura del recinto en dicho intervalo de tiempo. De manera similar, se presentan en la Fig. 3.10 las curvas para el CO_2 en el almacenamiento del digerido las cuales replican la tendencia de los resultados anteriores en cuanto respecta a los periodos de variación. En este caso, la variable alcanza valores pico por encima de las 60 *ppm*.

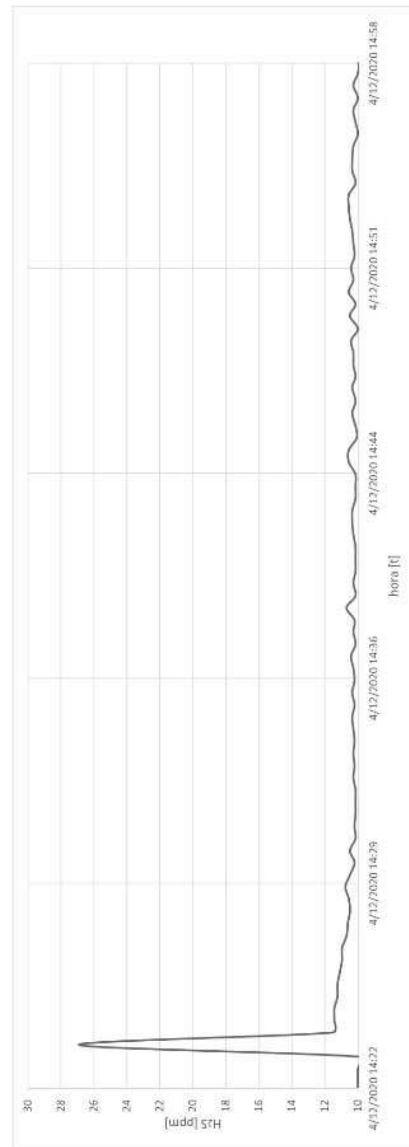
Los datos encontrados van de la mano de uno de los grandes problemas de la digestión anaerobia que es la producción de digerido, que corresponde al 70% del alimento que ingresa a los digestores. Como se mencionó anteriormente las emisiones de metano y dióxido de carbono son grandes contribuyentes al cambio climático, por tanto, el digerido extraído de los digestores debe ser almacenado de tal forma que se puedan controlar sus emisiones. Adicionalmente, realizando una extrapolación de los datos encontrados al tamaño y magnitud de un biodigestor rural las cifras se elevarían de manera considerable y se hace necesario un análisis detallado para encontrar soluciones a las emisiones del digerido almacenado debido a que su afectación al medio ambiente reduce en gran medida los beneficios ambientales obtenidos con la digestión anaerobia.

Finalmente, se ilustra en la Fig. 3.11 el comportamiento para las emisiones (de CH_4 y CO_2 en el almacenamiento del digerido y de H_2S en la corriente de salida del biodigestor) como función de la temperatura ambiente. A pesar de no existir un patrón muy claro que explique la relación entre dichas variables, se observa una tendencia a incrementar las concentraciones de gas (en *ppm*) en el entorno de operación del *bioproceso* a medida que se incrementa la temperatura ambiente.

En este punto es importante mencionar que para mejorar las concentraciones de gases

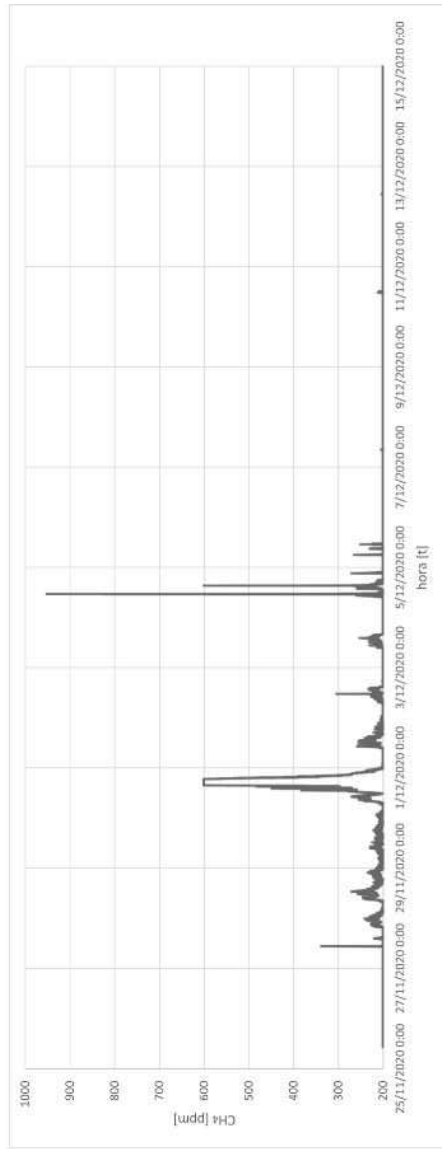


(a) Registro completo

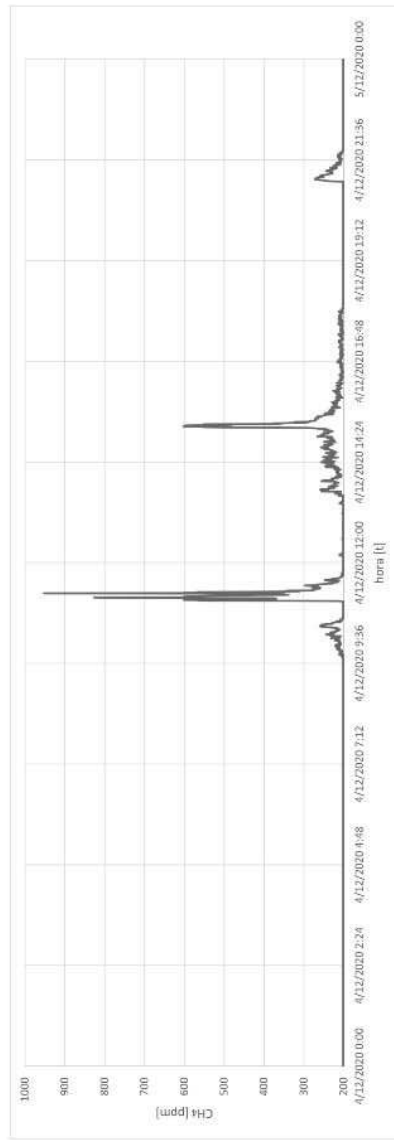


(b) Detalle al 4 de diciembre

Figura 3.8: Registros experimentales de H_2S en la corriente de salida del biodigestor

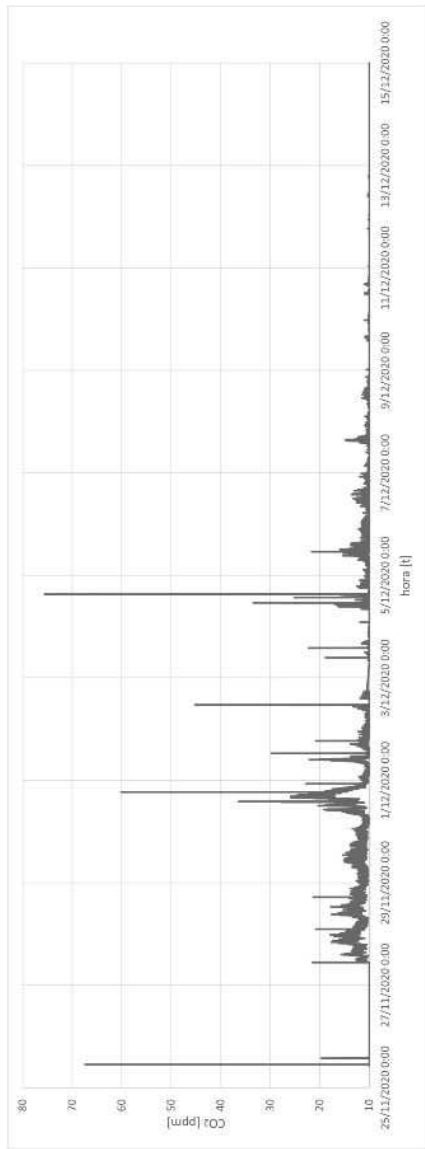


(a) Registro completo

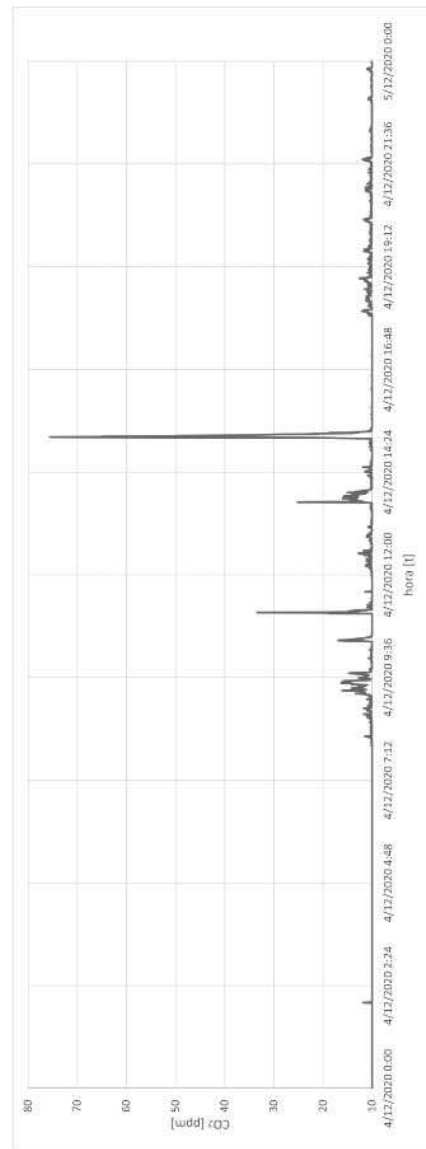


(b) Detalle al 4 de diciembre

Figura 3.9: Registros experimentales de CH_4 en el almacenamiento del digerido

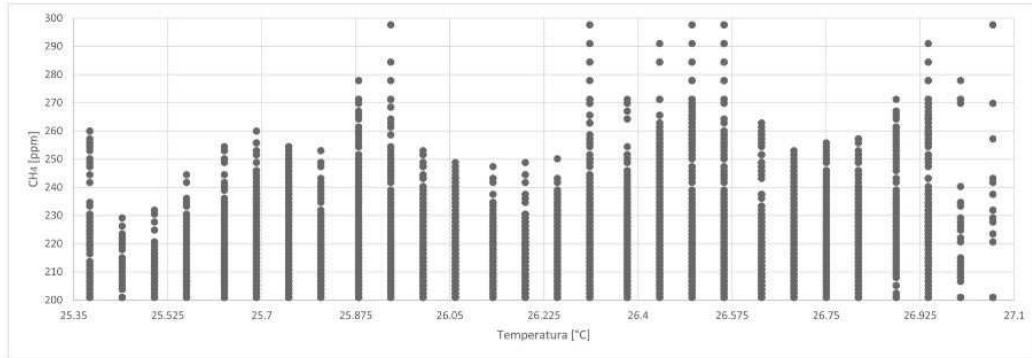


(a) Registro completo

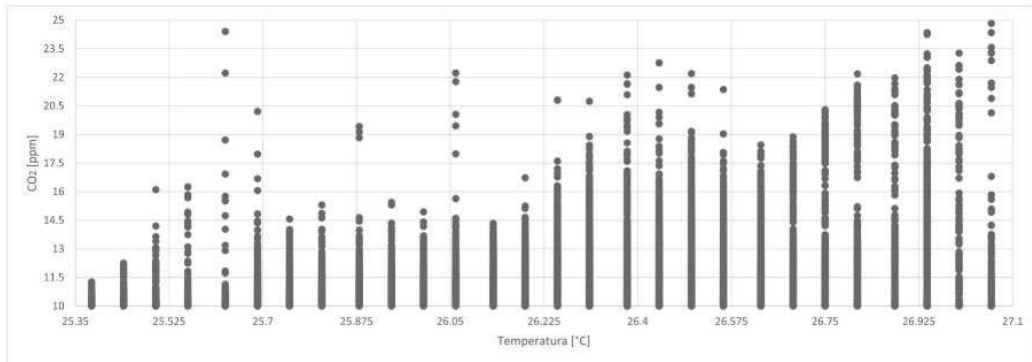


(b) Detalle al 4 de diciembre

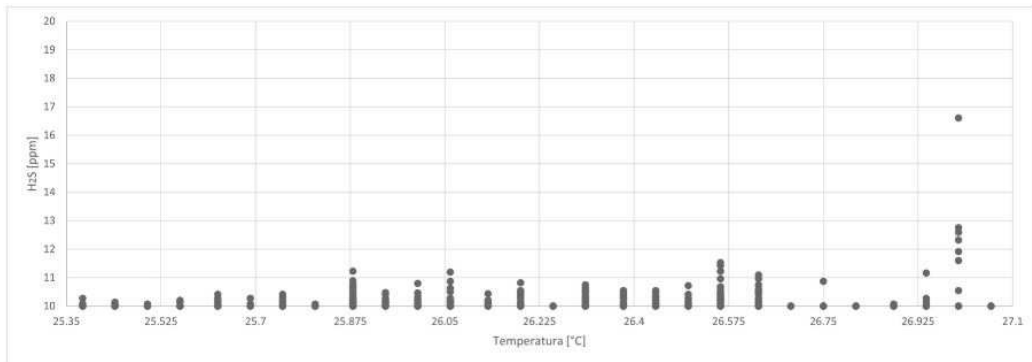
Figura 3.10: Registros experimentales de CO_2 en el almacenamiento del digerido



(a) CH_4 vs. temperatura ambiente



(b) CO_2 vs. temperatura ambiente



(c) H_2S vs. temperatura ambiente

Figura 3.11: Relación experimental para emisiones (CH_4 y CO_2 en almacenamiento de digerido y H_2S en secado de lodos) como función de la temperatura ambiente

medidas en los experimentos, se añadieron 2.5 L de digerido el día 4 de diciembre a las 11 a.m. (ver Fig. 3.12). Asimismo, se detectó la activación involuntaria de un sistema de extractores de aire en el entorno del experimento el día 9 de diciembre. Ambos eventos afectaron significativamente (a favor y en contra) el comportamiento del *bioproceso* y por tanto, de las variables registradas por el sistema de monitoreo.



Figura 3.12: Ilustración digerido añadido al experimento

Un análisis más detallado para las variables involucradas en el proceso de *digestión anaerobia* escapa al alcance del presente trabajo de grado, debido a la intervención de elementos de corte multidisciplinar. No obstante, se recomienda al lector interesado en la medición de emisiones en *biodigestores rurales* consultar los resultados reportados en [2, 9, 22]. A pesar de ello, es en general difícil encontrar documentación especializada que relacione concentraciones de gases ajustada a los rangos descritos en los experimentos presentados.

Capítulo 4

Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

- Se diseñó e implementó un sistema electrónico para la monitorización remota de variables relevantes en la operación, bajo condiciones reales, de un biodigestor anaeróbico alimentado con estiércol bovino, a partir del diseño de una arquitectura para la gestión de datos del sensado de temperatura y de concentraciones de gases en localizaciones específicas del bioproceso, a través de un arreglo de dispositivos de bajo costo configurados a manera de sistema de telemetría para ejecutar la captura y el acopio de la información y facilitar su transmisión en tiempo real hacia una interfaz de usuario a través de internet.

De manera más puntual:

- Se determinaron las variables físicas relevantes en un proceso de biodigestión anaerobia. Tal y como fue abordado en la *Sección 2.1*, se definieron las características principales del proceso de digestión anaerobia y a través de ello las etapas importantes para un biodigestor rural, al igual que sus variables relacionadas, entre las cuales se destacan la medición de temperatura, de las concentraciones de gases y de la acidez.

- Se establecieron rangos de medida y se seleccionó la instrumentación requerida para realizar monitoreo remoto del proceso de biodigestión anaerobia en campo. En particular, la *Sección 2.2* abordó de manera detallada la selección de los dispositivos de sensado para las variables relevantes del bioproceso, así como también de otros elementos importantes para realizar la captura organizada de los datos de operación del sistema, la forma de interactuar y acceder a la información de los registros y las particularidades de consumo energético para garantizar su autonomía de operación.
- Se desarrolló un sistema electrónico que permitió adquirir y visualizar remotamente las variables relevantes del proceso de biodigestión. Más precisamente, en la Fig. 2.10 se ilustró el diagrama esquemático para el sistema de telemetría diseñado. A partir de ello, fue posible adaptar las características del sistema a la operación de un biodigestor en laboratorio, según descrito en el *Capítulo 3*. Estas adecuaciones debieron realizarse como consecuencia de la emergencia sanitaria ocasionada por el virus SARS-CoV-2 (COVID 19), situación que obligó a ejecutar las pruebas de campo al interior de un laboratorio. Aún así, fue posible acondicionar las mediciones a las emisiones de gases en el entorno de operación del *biodigestor*, permitiendo obtener los registros de variables presentados en la *Sección* .
- Se encontraron emisiones de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico en el entorno del digestor durante su operación que pueden afectar la salud de los integrantes del laboratorio donde se realizaron las mediciones, además del daño ambiental causado por las mismas. Adicionalmente, se encontraron emisiones considerables de metano y dióxido de carbono en el almacenamiento del digerido que contrarrestan la reducción de emisiones buscada con la digestión anaerobia.

4.1. Recomendaciones

Las mediciones realizadas sobre las variables del prototipo experimental en laboratorio, representan la escala de magnitudes proporcionada por el fabricante de los elementos de sensado, a partir de conversiones realizadas sobre valores proporcionados originalmente en escala de voltaje. Por tanto, se recomienda realizar una verificación y/o calibración de dichas mediciones a partir de patrones de referencia de medida que permitan cuantificar la

precisión de los dispositivos de medida utilizados en el sistema de telemetría.

4.2. Trabajo futuro

Indudablemente, el desarrollo normal del presente trabajo de grado se vio ampliamente alterado por la emergencia sanitaria ocasionada por el virus SARS-CoV-2 (COVID 19). Por tanto, una actividad inmediata que complementa los desarrollos presentados, corresponde con la implementación definitiva del sistema de telemetría diseñado sobre un biodigestor rural (en campo y no en laboratorio).

Bibliografía

- [1] C Mao y col. “Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion”. En: *Renewable and sustainable energy reviews* 45 (2015), págs. 540-555.
- [2] C Sambusiti y col. “Comparison of various post-treatments for recovering methane from agricultural digestate”. En: *Fuel processing technology* 137 (2015), págs. 359-365.
- [3] Carlos Rodolfo Bermúdez Gómez y Miguel Ángel Dias Hernández. *Instrumentación de un biodigestor de estiércol animal para analizar su comportamiento dinámico*. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2010.
- [4] Claudia Marcela Velandia Ardila. *Implementación de un sistema de control de pH y temperatura para un biodigestor anaerobio de lecho fijo*. Trabajo de Grado (Ingeniero Químico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química, 2010.
- [5] F. Guilayn y col. “First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation”. En: *Waste Management* 86 (2019), págs. 67-79.
- [6] Gabriela Pérez García. *Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos mediante el monitoreo a distancia de un biorreactor Batch a escala laboratorio del programa de bioingeniería*. Trabajo de grado (Bioingeniería). Bogotá, Colombia: Universidad El Bosque, 2018.

- [7] Guillermo Andrés Martínez Ramírez y Rodríguez Walteros Carolina. *Diseño y construcción de un biodigestor anaerobio de lecho fijo para operación en continuo a escala piloto con control de temperatura y pH*. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química, 2007.
- [8] Gustavo Aguilar Álvarez. *Control de temperatura y pH aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala*. Trabajo de grado (Maestro en Ciencias Mecatrónica). Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro, 2013.
- [9] H. Escalante y col. “Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries”. En: *Waste Management* 71 (2018), págs. 711-718.
- [10] Hambaliou Baldé y col. “Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant”. En: *Bioresource Technology* 216 (2016), págs. 914-922.
- [11] Jaime Jaimes Esteves. *Diseño de un proceso integral de la co-digestión anaeróbica del lactosuero mediante la optimización de la sinergia de sustratos que permita la producción de biogás y estruvita*. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Química). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, 2018.
- [12] J. Martí Herrero. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Technical Reference Manual. Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), 2008.
- [13] Jhon Jairo Espitia Pardo y Alvaro Ervey Pulido Aponte. *Diseño e implementación de un sistema de supervisión, monitoreo y control de temperatura, presión y tiempo de proceso en un sistema de digestión anaerobia de biomasa (contenido ruminal bovino) a escala de laboratorio*. Trabajo de grado (Ingeniero en Control). Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [14] José David Álvaro Moreno. *Diseño de un sistema control de temperatura y pH en el proceso de digestión anaeróbica para residuos sólidos orgánicos en un bio-reactor tipo Batch*. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Eléctrica). Ibagué, Colombia: Universidad de Ibagué, 2016.

- [15] Juan Carlos Martínez Trejo. *Automatización de un biodigestor anaerobio con un PLC SLC 500 y una HMI Panel View Plus 1000*. Trabajo de grado (Ingeniero en Control y Automatización). Mexico DF, México: Instituto Politécnico Nacional, 2010.
- [16] L. Castro y col. “Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality”. En: *Fuel processing technology* 239 (2017), págs. 311-317.
- [17] Laura Marcela Mantilla y Gustavo Andres Rojas Amaya. *Implementación de un reactor rural para la digestión anaeróbica de estiércol bovino en la finca La Marcella*. Trabajo de grado (Ingenieros Químicos). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016.
- [18] Leonel Estrada Rojo y col. *Instrumentación electrónica de un sistema de generación de biogás*. Trabajo de grado (Ingeniero Electricista). Guanajuato, México: Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, 2017.
- [19] M. Garfí y col. “Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment”. En: *Bioresource technology* 274 (2019), págs. 541-548.
- [20] Raúl Botero. “El biodigestor de bajo costo, su aporte a la mitigación del cambio climático y su potencial para reducir la pobreza rural en américa latina y el caribe”. En: *UTN informa* (2011).
- [21] Thomas K. Flesch, Raymond L. Desjardins y Devon Worth. “Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester”. En: *Biomass and Bioenergy* 35 (2011), págs. 3927-3935.
- [22] Tine L.I. Vergote y col. “Monitoring methane and nitrous oxide emissions from digestate storage following manure mono-digestion”. En: *Biosystems Engineering* 196 (2020), págs. 159-171.