

# **Diseño de un sistema de instrumentación electrónica para un biodigestor tipo Taiwán**

Daniel David Duque López

Luisa Fernanda Ortega Montoya

Asesor

Joan Sebastián Bustos Miranda

Ingeniería Electrónica

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Electrónica

2025

## Glosario

- Biodigestor: Un biodigestor es un contenedor o tanque sellado donde se introducen residuos orgánicos. Dentro de él, ocurre la descomposición de la materia orgánica, lo que da lugar a la producción de biogás, un combustible que puede utilizarse para cocinar, calentar agua y generar electricidad a través de un generador a gas. El subproducto de este proceso, compuesto por efluentes y lodo, se emplea como biofertilizante. (Gobierno de Argentina, s.f.).

- pH: Es el Potencial de Hidrógeno. Es una medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una disolución. Con el pH determinamos la concentración de hidrogeniones en una disolución. (Hanna Instruments, s.f)

- Temperatura: La temperatura del biodigestor es un factor crítico ya que afecta directamente la velocidad de las reacciones bioquímicas. Los biodigestores mesofílicos operan a temperaturas moderadas (35°C-40°C), mientras que los termofílicos funcionan a temperaturas más elevadas (50°C-65°C). (Gobierno de Chile, 2011)

- Metano (CH<sub>4</sub>): El metano es el principal componente del biogás producido en un biodigestor. Su concentración es un indicador clave de la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, y es una fuente valiosa de energía renovable. (Gobierno de Chile, 2011)

- Biogás: El biogás es una mezcla de metano y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producida durante la digestión anaeróbica. Es una fuente de energía renovable que se puede utilizar para generar electricidad o calor. (Gobierno de Chile, 2011)

Los procesos básicos de un biodigestor para producir gas y fertilizante son los siguientes:

- Alimentación del biodigestor: Los materiales orgánicos, como estiércol de animales, restos de alimentos, cultivos agrícolas o cualquier otro residuo orgánico, se introducen en el

biodigestor. Estos materiales son la fuente de materia orgánica que se descompondrá para producir biogás. (Gobierno de Chile, 2011)

- Descomposición anaeróbica: En el interior del biodigestor, la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno debido a la acción de microorganismos anaeróbicos, como bacterias metanogénicas. Estos microorganismos descomponen los compuestos orgánicos en sustancias más simples, liberando metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el proceso. (Gobierno de Chile, 2011)

- Producción de biogás: La descomposición de la materia orgánica genera biogás, que consiste principalmente en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con pequeñas cantidades de otros gases. El biogás es capturado y almacenado en un depósito o sistema de recolección, donde se puede utilizar como fuente de energía para cocinar, iluminación o generación de electricidad. (Gobierno de Chile, 2011)

- Producción de fertilizante líquido (efluente): A medida que la materia orgánica se descompone, se produce un efluente líquido que es rico en nutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio. Este efluente es una forma de fertilizante orgánico valioso que puede utilizarse para fertilizar cultivos y mejorar la calidad del suelo. Es importante gestionar adecuadamente este efluente para evitar la contaminación del agua. (Gobierno de Chile, 2011)

- Recolección de biogás: El biogás producido se recoge y se utiliza según las necesidades del usuario. Esto puede requerir sistemas de tuberías y dispositivos de recolección, como quemadores o generadores de electricidad. (Servicios manufactureros, s.f.)

- Manejo del efluente: El efluente líquido producido se debe gestionar adecuadamente para evitar la contaminación ambiental. Puede requerir sistemas de almacenamiento y técnicas de aplicación controlada en campos agrícolas. (Gobierno de Chile, 2016).

Los tipos de insumos orgánicos que se pueden utilizar incluyen:

- Estiércol animal: El estiércol de ganado, cerdos, aves de corral y otros animales es una fuente común de materia orgánica para los biodigestores. Contiene una cantidad significativa de materia orgánica y nutrientes que pueden descomponerse para producir biogás y fertilizante.

(Minambiente, 2020)

- Residuos de alimentos: Los residuos de alimentos, como restos de cocina, cáscaras de frutas y verduras, y sobras de alimentos, son una fuente rica en materia orgánica. Pueden ser una fuente de alimentación conveniente para los biodigestores en entornos residenciales o comerciales. (Minambiente, 2020)

- Cultivos agrícolas y residuos de cosecha: Los restos de cultivos, tallos, hojas y otras partes de las plantas pueden utilizarse como insumos orgánicos. También pueden incluir cultivos no aptos para la venta o productos agrícolas dañados. (Minambiente, 2020)

- Residuos de jardín: Los residuos de jardín, como hojas caídas, ramas podadas y recortes de césped, contienen materia orgánica que puede ser procesada en un biodigestor. (Minambiente, 2020)

- Residuos forestales: En áreas forestales o con abundante biomasa forestal, los residuos de la tala de árboles y la limpieza de bosques pueden utilizarse como insumos orgánicos.

(Minambiente, 2020)

- Efluentes de procesamiento de alimentos: En industrias alimentarias, los subproductos y efluentes orgánicos pueden ser una fuente valiosa de materia orgánica para los biodigestores.

(Minambiente, 2020)

- Aguas residuales municipales: En algunas plantas de tratamiento de aguas residuales, se utilizan biodigestores para procesar los lodos de lodos de aguas residuales, convirtiendo los sólidos orgánicos en biogás y reduciendo la carga de desechos. (Minambiente, 2020)

- Biomasa energética: Algunos cultivos energéticos, como el maíz forrajero o la caña de azúcar, pueden destinarse a la producción de biogás en lugar de su uso tradicional como alimento o materia prima para la industria. (Minambiente, 2020)

- Biol: Fertilizante líquido orgánico obtenido tras la descomposición anaeróbica de materia orgánica como estiércol y restos vegetales en biodigestores. Su aplicación ayuda a mejorar la salud del suelo, estimula el desarrollo vegetal y ayuda a incrementar la producción de frutos, además favorece el verdor y fertilidad de las plantas. (FAO, 2024).

## Resumen

En esta investigación, se desarrolló e implementó un sistema de monitoreo y control remoto para un biodigestor de pequeña escala, el cual permitió la observación en tiempo real de variables críticas, tales como el pH, la temperatura y la concentración de metano. Estos parámetros son muy importantes en el progreso de la digestión anaeróbica, mejorando el rendimiento y la eficiencia del biodigestor. Además, se diseñó un sistema de control para la condensación de agua en una tubería de gas con drenaje automático, para así evitar que el agua se acumule en la tubería de gas, lo que podría causar problemas en el sistema de suministro de gas. La condensación de agua es un fenómeno común en las tuberías de salida del biodigestor debido a las fluctuaciones de temperatura, lo que puede resultar perjudicial para el proceso. Para ello, se implementó una trampa de agua ya que este es un componente esencial en sistemas de digestión anaeróbica, que permitirá capturar y eliminar la condensación de agua que se genere durante el proceso de producción de biogás.

***Palabras claves:*** *Biogás, biodigestor tipo Taiwán, control automático, instrumentación electrónica, monitoreo remoto.*

### **Abstract**

In this research, a remote monitoring and control system was developed and implemented for a small-scale biodigester, enabling real-time observation of critical variables such as pH, temperature, and methane concentration. These parameters are very important in the progress of anaerobic digestion, improving the performance and efficiency of the biodigester. Additionally, a control system for water condensation in a gas pipe with automatic drainage was designed to prevent water from accumulating in the gas pipe, which could cause problems in the gas supply system. Water condensation is a common phenomenon in biodigester outlet pipes due to temperature fluctuations, which can be detrimental to the process. For this purpose, a water trap was implemented, as this is an essential component in anaerobic digestion systems. It will capture and eliminate the water condensation generated during the biogas production process.

**Keywords:** *Biogas, Taiwan-type biodigester, automatic control, electronic instrumentation, remote monitoring.*

## Tabla de Contenido

Introducción .....	16
Planteamiento del Problema .....	18
Justificación .....	19
Objetivos.....	21
Objetivo General.....	21
Objetivos Específicos.....	21
Marco Teórico.....	22
Biodigestores y su funcionamiento.....	22
Proceso de Biodigestión.....	24
Fases del Proceso .....	26
Hidrólisis.....	26
Metanogénesis.....	26
Instrumentación Electrónica en Biodigestores.....	26
Sensores y Dispositivos de Monitoreo.....	27
Control y Automatización del Sistema .....	28
Beneficios de la Instrumentación Electrónica en Biodigestores.....	29
Estado del arte.....	30
Análisis de Dispositivos de Medición en Biodigestores.....	33
Sensores Seleccionados .....	38
Potencial de Hidrógeno.....	39
Temperatura .....	40
Conductividad Eléctrica.....	41

Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S).....	42
Concentración de Metano (CH <sub>4</sub> ).....	43
Sensor de Nivel.....	44
Electroválvula .....	45
Sistema Automatizado de Sensores .....	46
Fuente Simétrica para Alimentación del Circuito.....	46
Cálculos Teóricos para Sensor de Potencial de Hidrógeno SEN0161 .....	46
Cálculos Teóricos y Diseño para Sensor de Temperatura PT100.....	48
Acondicionamiento de la Señal .....	48
Cálculos Teóricos para Representación de Sensor de Conductividad Eléctrica DFR0300- H.....	60
Cálculos Teóricos para Determinar la Concentración de Sulfuro de Hidrogeno con Sensor MQ-136.....	62
Cálculos Teóricos para Determinar la Concentración de Metano del Sensor MQ-4.....	66
Integración de Sensores y Control de Nivel .....	69
Ubicación de Sensores en el Biodigestor.....	70
Prototipo Físico.....	72
Diseño de Implementación para Control de Condensación de Agua .....	72
Simulación y Funcionamiento .....	72
Funcionamiento General del Sistema .....	77
Validación de Funcionamiento para el Ph .....	77
Validación de Funcionamiento para la Temperatura .....	81
Validación de Funcionamiento para la Conductividad Eléctrica.....	82

Validación de Funcionamiento para Concentración de Metano .....	84
Metodología .....	86
Tipo de Investigación.....	86
Fases de la Investigación .....	86
Caso de Estudio.....	88
Resultados .....	89
Interfaz Gráfica .....	89
Diagrama de Bloques de App Inventor.....	91
Implementación Física .....	95
Conclusiones .....	103
Discusión.....	105
Referencias Bibliográficas .....	107
Apéndices.....	115

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Composición del Biogás</i> .....	24
<b>Figura 2</b> <i>Esquema del Proceso de la Digestión Anaerobia</i> .....	25
<b>Figura 3</b> <i>Sensor SEN0161 para Medición de pH</i> .....	39
<b>Figura 4</b> <i>Sensor PT100 para Medición de Temperatura</i> .....	40
<b>Figura 5</b> <i>Sensor DFR0300-H para Medición de Conductividad Eléctrica</i> .....	41
<b>Figura 6</b> <i>Sensor MQ-136 para Medición de Sulfuro de Hidrógeno</i> .....	42
<b>Figura 7</b> <i>Sensor MQ-4 para Medición de Concentración de Metano</i> .....	43
<b>Figura 8</b> <i>Flotador Horizontal para Medición de Nivel</i> .....	44
<b>Figura 9</b> <i>Electroválvula para Drenaje del Sistema</i> .....	45
<b>Figura 10</b> <i>Fuente Simétrica para Alimentar el Sistema</i> .....	46
<b>Figura 11</b> <i>Simulación del Sensor de pH</i> .....	48
<b>Figura 12</b> <i>Puente de Wheatstone</i> .....	49
<b>Figura 13</b> <i>Voltaje de Salida en Puente de Wheatstone con Temperatura de 45°C</i> .....	50
<b>Figura 14</b> <i>Amplificador de Instrumentación AD620 a 3.3V</i> .....	51
<b>Figura 15</b> <i>Amplificador de Instrumentación AD620 a 0V</i> .....	52
<b>Figura 16</b> <i>Valores de las Constantes para Filtro Tschebyscheff con un Rizado de 3dB</i> .....	53
<b>Figura 17</b> <i>Circuito de Filtro Activo Pasa Bajo de Segundo Orden</i> .....	54
<b>Figura 18</b> <i>Respuesta del Filtro Activo Pasa Bajo de Segundo Orden</i> .....	54
<b>Figura 19</b> <i>Respuesta del Filtro Activo Pasa Bajo de Segundo Orden</i> .....	55
<b>Figura 20</b> <i>Circuito Convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA</i> .....	56
<b>Figura 21</b> <i>Circuito Convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA y Temperatura de 45°C</i> .....	58
<b>Figura 22</b> <i>Circuito Convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA y Temperatura de 0°C</i> .....	59

<b>Figura 23</b> <i>Circuito Integrado para Lectura de Temperatura</i> .....	60
<b>Figura 24</b> <i>Ingreso al Modo Calibración</i> .....	61
<b>Figura 25</b> <i>Ingreso al Modo Calibración</i> .....	62
<b>Figura 26</b> <i>Característica de Sensibilidad del Sensor MQ-136</i> .....	63
<b>Figura 27</b> <i>Simulación Sensor MQ-136 para Medición de H<sub>2</sub>S</i> .....	65
<b>Figura 28</b> <i>Característica de Sensibilidad del Sensor MQ-4</i> .....	66
<b>Figura 29</b> <i>Simulación Sensor MQ-4 para Medición De CH<sub>4</sub></i> .....	68
<b>Figura 30</b> <i>Simulación de Sensores y Control de Nivel</i> .....	69
<b>Figura 31</b> <i>Esquema del Circuito con ESP32</i> .....	70
<b>Figura 32</b> <i>Biodigestor Tipo Taiwán del CIP Dosquebradas</i> .....	71
<b>Figura 33</b> <i>Propuesta de Disposición de Sensores en el Biodigestor</i> .....	71
<b>Figura 34</b> <i>Implementación de Electroválvula de Manera Física en el Biodigestor</i> .....	72
<b>Figura 35</b> <i>Simulación de Drenaje Activo</i> .....	73
<b>Figura 36</b> <i>Prototipo Físico Integrado</i> .....	74
<b>Figura 37</b> <i>Vista Frontal del Prototipo Físico Integrado</i> .....	75
<b>Figura 38</b> <i>Vista Lateral Derecha del Prototipo Físico Integrado</i> .....	75
<b>Figura 39</b> <i>Vista Superior del Prototipo Físico Integrado</i> .....	76
<b>Figura 40</b> <i>Toma de Medida pH en Leche Deslactosada</i> .....	79
<b>Figura 41</b> <i>Toma de Medida pH En Coca Cola</i> .....	80
<b>Figura 42</b> <i>Toma de Medida Temperatura</i> .....	82
<b>Figura 43</b> <i>Solución de Referencia Para Medir Conductividad Eléctrica</i> .....	83
<b>Figura 44</b> <i>Toma de Medida Conductividad Eléctrica</i> .....	84
<b>Figura 45</b> <i>Toma de Medida Gas Metano</i> .....	85

<b>Figura 46</b> <i>Interfaz Gráfica Creada con APP Inventor</i> .....	90
<b>Figura 47</b> <i>Diagrama de Bloques Creado con APP Inventor</i> .....	91
<b>Figura 48</b> <i>Implementación Física para Prueba del Código</i> .....	96
<b>Figura 49</b> <i>Implementación Física del Prototipo</i> .....	97
<b>Figura 50</b> <i>Baquelita Tipo Protoboard para Creación de Circuito</i> .....	98
<b>Figura 51</b> <i>Resultados Tras Soldadura de Componentes</i> .....	99
<b>Figura 52</b> <i>Prueba de Funcionamiento del Prototipo</i> .....	99
<b>Figura 53</b> <i>Construcción de Prototipo</i> .....	100
<b>Figura 54</b> <i>Calibración para Sensor de Conductividad Eléctrica</i> .....	101
<b>Figura 55</b> <i>Prototipo Terminado</i> .....	102

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Tipos de Biodigestores</i> .....	22
<b>Tabla 2</b> <i>Análisis de Sensores de pH</i> .....	34
<b>Tabla 3</b> <i>Análisis de Sensores de Temperatura</i> .....	35
<b>Tabla 4</b> <i>Análisis de Sensores de Conductividad Eléctrica</i> .....	36
<b>Tabla 5</b> <i>Análisis de Sensores de Sulfuro de Hidrógeno</i> .....	37
<b>Tabla 6</b> <i>Análisis de Sensores de Concentración de Metano</i> .....	38
<b>Tabla 7</b> <i>Validación de Funcionamiento de Variable pH en Leche Deslactosada</i> .....	78
<b>Tabla 8</b> <i>Validación de Funcionamiento de la Variable pH en Coca Cola</i> .....	80
<b>Tabla 9</b> <i>Validación de Funcionamiento de la Variable Temperatura</i> .....	81
<b>Tabla 10</b> <i>Validación de Funcionamiento de la Variable Conductividad Eléctrica</i> .....	83

**Lista de Apéndices**

**Apéndice A** *Código del Programa*..... 115

**Apéndice B** *Certificado de Calibración Termómetro RT-803E* ..... 123

## Introducción

El presente trabajo propone el diseño e implementación de un sistema de instrumentación electrónica orientado a la monitorización de variables críticas en biodigestores tipo Taiwán. Como caso de aplicación, se plantea la futura integración del sistema en el biodigestor del Centro de Investigación y Producción (CIP) Dosquebradas, seleccionado por su accesibilidad, disponibilidad de datos y relevancia como entorno experimental en el ámbito académico.

El biodigestor tipo Taiwán es una solución eficaz para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, logrando la gestión sostenible de recursos y la reducción de desechos. Este sistema no solo promueve la generación de energía renovable, sino que también facilita el tratamiento de residuos, mejorando la calidad del medio ambiente. Sin embargo, para maximizar su rendimiento y garantizar un correcto funcionamiento, es importante implementar un sistema de instrumentación electrónica que permita el monitoreo de pH, temperatura, concentración de metano, conductividad eléctrica y control de condensado en la tubería de salida del biodigestor, las cuales son variables críticas del proceso de digestión anaeróbica.

La instrumentación electrónica del sistema implementado tiene la capacidad de recopilar datos en tiempo real sobre parámetros esenciales como el pH, temperatura, concentración de metano, nivel de agua y conductividad eléctrica que influyen en el funcionamiento eficiente del biodigestor. Con estos datos, los funcionarios pueden tomar decisiones informadas, optimizando así el rendimiento del sistema. Además, el monitoreo continuo permite detectar irregularidades y prevenir posibles fallos, asegurando la sostenibilidad y viabilidad del biodigestor. (Dena, J. et al, 2020)

Este proyecto se centró en el diseño de un sistema de instrumentación electrónica para biodigestores tipo Taiwán. Aunque este modelo se tomó como referencia, el sistema propuesto es

adaptable a otros tipos de biodigestores, ya que aborda las etapas del proceso de digestión anaerobia. A través de esta investigación, se ha buscado mejorar la eficiencia del proceso, y también contribuir al desarrollo de tecnologías más accesibles y efectivas en el ámbito de la energía renovable.

## Planteamiento del Problema

Actualmente, algunos biodigestores funcionan sin un sistema de instrumentación electrónica adecuado que permita recopilar datos en tiempo real. Esta falta de monitoreo impide a los funcionarios tomar decisiones informadas y conscientes, teniendo como consecuencia un rendimiento poco óptimos y problemas operativos que afecten la producción de biogás y la calidad de los biofertilizantes. La dificultad para detectar irregularidades y desviaciones en las condiciones operativas limita la eficiencia del sistema, y también aumenta el riesgo de fallas, lo que pone en peligro la viabilidad a largo plazo del biodigestor. (Estrada, L. et al, 2017)

Además, la condensación de agua en las tuberías de gas es un problema que puede afectar el suministro de biogás. Si no se tiene un sistema de drenaje óptimo, la acumulación de agua puede obstruir el flujo de gas y causar daños en el sistema. Esto destaca la importancia de diseñar un mecanismo de control para la gestión de la condensación, en este caso una trampa de agua, que permita mantener el sistema operativo y eficiente.

Por lo tanto, se diseñó el prototipo de un sistema de instrumentación electrónica que permita el monitoreo de las variables críticas de pH, temperatura, concentración de metano y conductividad eléctrica en tiempo real que incluya un sistema de control para la gestión de la condensación de agua. Esto ayudará a una operación más estable y eficiente del biodigestor, optimizando su rendimiento y asegurando su sostenibilidad como solución ambiental.

## Justificación

La gestión de biodigestores para la producción de biogás y biofertilizantes genera la necesidad de optimizar el rendimiento y la eficiencia del proceso. Para lograrlo, es esencial contar con un monitoreo preciso y en tiempo real de variables críticas, como el pH, la temperatura, conductividad eléctrica, sulfuro de hidrógeno y la concentración de CH<sub>4</sub>, que son fundamentales para el éxito de la digestión anaeróbica. Actualmente, la falta de una herramienta de visualización específica y accesible limita la capacidad de los operadores y gestores, en consecuencia, se dificulta la optimización del proceso y la promoción de la sostenibilidad en la producción de biogás y biofertilizantes.

La desinformación de las condiciones operativas en tiempo real del biodigestor, así como la incapacidad para detectar desviaciones críticas en las variables limita una gestión eficiente de los recursos orgánicos y energéticos. Además, la falta de alertas y registros históricos dificulta la identificación y prevención de problemas potenciales, lo que impacta negativamente en la producción de biogás y en la calidad de los biofertilizantes. (Aguas residuales, 2020)

Por consiguiente, se diseñó la instrumentación electrónica para su posterior implementación como trabajo futuro en biodigestores anaeróbicos donde se usó el tipo Taiwán como modelo de referencia, el cual esboza la necesidad de desarrollar una herramienta de interfaz al usuario que permita supervisar y controlar en tiempo real las variables críticas del biodigestor, facilitando la toma de decisiones para la optimización del proceso y la promoción de la sostenibilidad en la producción de biogás y biofertilizantes.

La estabilización del biodigestor y la maximización de su eficiencia son objetivos clave en la operación de un sistema de biodigestión anaeróbica, además es un proceso que requiere atención constante. La estabilización se refiere a mantener un proceso de biodigestión

equilibrado y constante, mientras que la eficiencia se relaciona con la obtención máxima de biogás y biofertilizante.

Las herramientas y software que se usarán para el desarrollo de este proyecto son: Tarjeta de adquisición de datos ESP32, APP Inventor, sensor de metano, sensor de pH, sensor de temperatura, conductividad eléctrica y control de condensado de agua.

La implementación física del sistema en el biodigestor del CIP Dosquebradas no pudo llevarse a cabo durante el desarrollo de este trabajo ya que el equipo no se encuentra en funcionamiento, el tiempo requerido para la estabilización de un biodigestor puede ser de aproximadamente 60 días, y adicionalmente, no se cuenta con el recurso humano necesario para alimentar el equipo con la materia orgánica requerida para su operación. Por lo tanto, las pruebas del sistema se realizaron en condiciones de laboratorio y simulaciones de las señales de los sensores. Se propone como trabajo futuro la instalación y validación del prototipo en condiciones reales de operación del biodigestor.

## Objetivos

### Objetivo General

Desarrollar un sistema de instrumentación electrónica para el monitoreo en tiempo real de variables críticas en un biodigestor tipo Taiwán, tales como pH, temperatura, conductividad eléctrica, concentración de metano y nivel de condensado de agua, e implementar el control automático del drenaje de condensado, con el fin de facilitar una operación eficiente y sostenible del biodigestor.

### Objetivos Específicos

Analizar dispositivos de medición de pH, temperatura, conductividad eléctrica y concentración de metano (CH<sub>4</sub>) en el biodigestor y verificar su funcionamiento.

Diseñar un sistema automatizado de adquisición de datos en tiempo real que recoja información continua de los sensores y la presente de manera clara en una herramienta de visualización, con alarmas de funcionamiento.

Implementar un prototipo físico que integre los sensores, el sistema de adquisición, el control del condensado de agua y la interfaz gráfica, permitiendo el monitoreo completo del biodigestor.

Validar funcionamiento general del sistema, para variables de pH, conductividad eléctrica, temperatura y metano con patrones estándar para las mediciones a cuantificar.

## Marco Teórico

### Biodigestores y su funcionamiento

Los biodigestores son dispositivos cerrados herméticamente, los cuales son llenados con materiales orgánicos para la degradación anaeróbica, con el fin de producir biogás (combustible útil para cocinar o generar energía eléctrica) y biofertilizantes. (Gobierno de Argentina, s.f).

Los diferentes tipos de biodigestores disponibles, sus características, ventajas o aplicaciones se describen en la tabla 1.

**Tabla 1**

#### *Tipos de Biodigestores*

Tipos	Tipo de flujo	Material de construcción	Principales aplicaciones	Ventajas	Características
Taiwán . <sup>a</sup>	Flujo continuo (fijo)	Concreto + cubierta plástica	Fincas rurales, zonas tropicales	Alta eficiencia, fácil limpieza, buen rendimiento	Integra sistema de separación sólido-líquido. Mayor eficiencia en la captura y uso de biogás.  Versátil en tipo de residuos.
Biodigestor de mezcla completa - chino. <sup>b</sup>	Flujo continuo (fijo)	Ladrillo y concreto	Hogares rurales, zonas permanentes	Estructura robusta, poco mantenimiento	Hermético, enterrado. Ideal en zonas con mano de obra calificada.  Buena retención de temperatura interna.

Tipos	Tipo de flujo	Material de construcción	Principales aplicaciones	Ventajas	Características
Biodigestor de mezcla completa - indio. <sup>b</sup>	Flujo continuo (fijo)	Concreto + campana metálica	Pequeñas granjas, comunidades rurales	Medición visible del gas, buena durabilidad	Campana metálica permite visualizar la producción. Requiere más mantenimiento por corrosión.  Funciona bien con residuos de cocina y estiércol.
Tubular o tipo salchicha. <sup>c</sup>	Flujo continuo	Polietileno o PVC flexible	Escuelas rurales, proyectos piloto	Bajo costo, fácil instalación y transporte	Sensible a daños físicos y exposición solar. Ideal para climas cálidos y uso temporal. Requiere bombeo manual o por gravedad.

*Nota.* Tipos de biodigestores y sus principales características. Tomado de <sup>a</sup>Botero, R.

(s.f.). <sup>b</sup>Genia (s.f.). <sup>c</sup>Biogás metano (2024).

Entre los diferentes tipos, el biodigestor tipo Taiwán se caracteriza por su estructura de geomembrana flexible y su eficiencia en la producción de biogás en climas tropicales como el de Colombia ya que aprovecha la radiación solar para mantener una temperatura óptima en la cámara de fermentación. (Herrero, J. 2019).

El proceso biológico que ocurre al interior del biodigestor es basado en la acción de microorganismos anaerobios, quienes se encargan de descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo una mezcla de diferentes componentes mostrados en la figura 1 que en orden descendente sería: metano, el dióxido de carbono, vapor de agua, oxígeno, nitrógeno, amoníaco, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. (Herrero, J. 2019).

El funcionamiento ideal del biodigestor se basa en una alta concentración de metano y una baja concentración de sulfuro de hidrógeno.

### Figura 1

#### *Composición del Biogás*

Componente	Símbolo	Concentración
Metano	CH <sub>4</sub>	50 - 75 Vol. %
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	25 - 45 Vol. %
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	2-7 Vol. %
Oxígeno	O <sub>2</sub>	< 2 Vol. %
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	< 2 Vol. %
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	< 1 Vol. %
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	< 1 Vol. %
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	20 - 20.000 ppm

*Nota.* Componentes y concentración del biogás producido por un biodigestor. Tomado de Burke, K. (2021). El biogás, fuente de energía renovable. <https://www.esders.es/2021/04/biogas-fuente-de-energia-ecologica-y-renovable/>

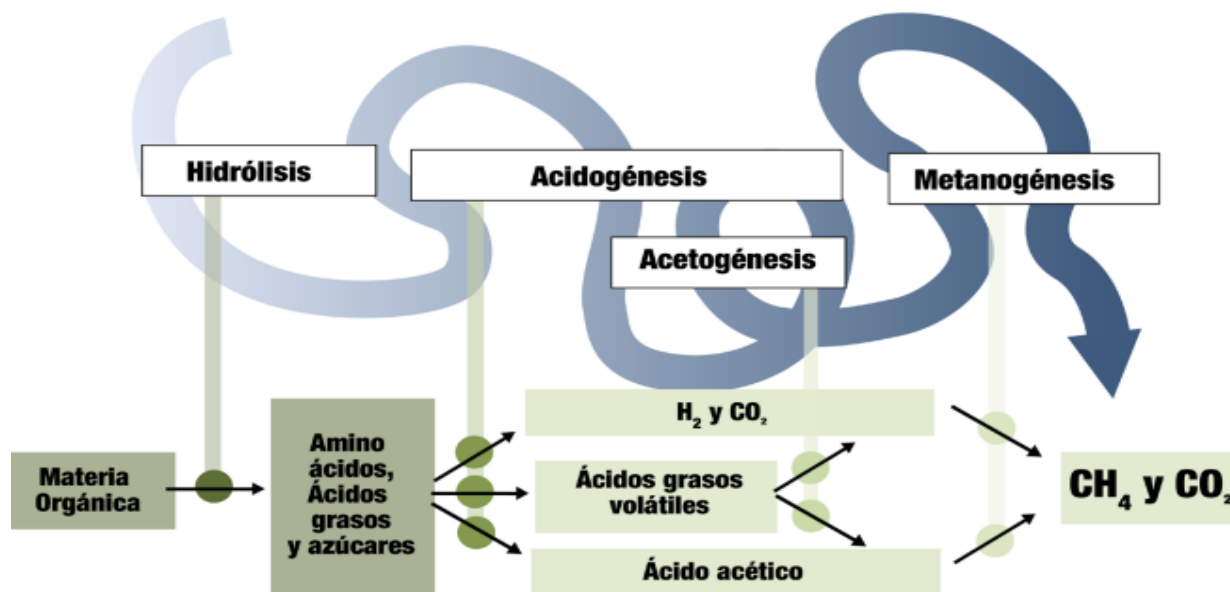
### Proceso de Biodigestión

La digestión anaerobia es un proceso biológico donde la materia orgánica es degradada y logra producir biogás. Para que este proceso sea exitoso se deben desarrollar diferentes etapas

gracias al equilibrio de diferentes poblaciones de bacterias dentro del biodigestor, la figura 2 indica las etapas de Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis del proceso de digestión anaerobia. (Herrero, J. 2019).

**Figura 2**

*Esquema del Proceso de la Digestión Anaerobia*



*Nota.* Fases que vive la materia orgánica al interior de un biodigestor. Tomado de Herrero, J. (2019). Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación.

[https://img1.wsimg.com/blobby/go/8b0f1fce-2a3d-48b2-aa50-](https://img1.wsimg.com/blobby/go/8b0f1fce-2a3d-48b2-aa50-8ce1a2fc2bf6/downloads/Libro_Manual%20de%20Dise%C3%B1o%20e%20Instalaci%C3%B3n%20de%20Biodig.pdf?ver=1740410430360)

[8ce1a2fc2bf6/downloads/Libro\\_Manual%20de%20Dise%C3%B1o%20e%20Instalaci%C3%B3n%20de%20Biodig.pdf?ver=1740410430360](https://img1.wsimg.com/blobby/go/8b0f1fce-2a3d-48b2-aa50-8ce1a2fc2bf6/downloads/Libro_Manual%20de%20Dise%C3%B1o%20e%20Instalaci%C3%B3n%20de%20Biodig.pdf?ver=1740410430360)

## Fases del Proceso

### *Hidrólisis*

En esta fase se descomponen las moléculas de una sustancia o compuesto gracias a la acción del agua, donde se producen azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. El pasto o compuestos altos en fibra son difíciles de hidrolizar y puede alargar el tiempo del proceso.

### *Acidogénesis y Acetogénesis*

Los productos obtenidos en la primera fase ahora son transformados en otros ácidos grasos volátiles como el H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y ácido acético.

### *Metanogénesis*

En esta fase el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono son usados para generar metano, completando el proceso de producción de biogás. (Herrero, J. 2019).

## Instrumentación Electrónica en Biodigestores

La instrumentación electrónica aplicada a biodigestores permite la medición, monitoreo y control de variables críticas que influyen en la eficiencia del proceso. Algunas de las principales variables a medir y sus variables óptimas de acuerdo con lo descrito por Herrero, J (2019) son:

- **Temperatura interna:** Influye en la actividad microbiana y la producción de biogás, requiriendo un tiempo de retención más corto y produciendo mayor biogás a temperaturas entre 30°C a 35°C.
- **Presión del biogás:** En los biodigestores tipo Taiwán de bajo costo la presión oscila entre 5 cm y 15 cm de columna de agua y es necesario mezclar el estiércol con agua en una relación 1:3, esto con el fin de garantizar que el lodo fluya en su interior.

- **Nivel de sustrato:** La materia orgánica dentro del biodigestor es llamada sustrato. Esta cuenta con tres parámetros importantes (sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y pH) los cuales pueden interferir en la producción de biogás.
- **pH del sustrato:** Esta variable es esencial para el equilibrio del proceso anaeróbico. Las bacterias que desarrollan la digestión anaeróbica suelen estar en ambientes con pH entre 6.5 y 7.5 (7 es el valor neutro de pH).

### **Sensores y Dispositivos de Monitoreo**

Para la implementación de un sistema de instrumentación electrónica aplicado a biodigestores, se utilizan diversos sensores y dispositivos:

- **Sensor de temperatura** (PT100) para monitoreo térmico, la cual incrementa su resistencia al aumentar la temperatura. A 0°C su resistencia es de 100 ohmios, tiene un rango de medición amplio (-200°C a 850°C) y ofrece mediciones precisas; se requiere un circuito acondicionador de señal para su uso. (Arian, s.f).
- **Sensores de pH** (módulo PH-4502C y electrodo E201) para medir la acidez del sustrato. Requiere una fuente de alimentación de 5V, su tiempo de respuesta es de 5s, su rango de detección es de 0 a 14 y ofrece una señal analógica que se puede conectar directamente a una tarjeta de desarrollo Arduino. (Unit electronics, s.f).
- **Sensores de conductividad eléctrica** (DFR0300-H) para medir la capacidad del sustrato de conducir electricidad. Requiere un voltaje de suministro de 3 a 5 VDC, ofrece un rango de medición de 10 mS/cm a 100 mS/cm y brinda una salida de 0 a 3.2 V. (DFRobot, s.f)

Por lo tanto, es indispensable acondicionar la señal para brindar una señal útil al microcontrolador.

- **Sensor de nivel** (horizontal) para determinar el nivel de agua condensada en la tubería de salida del biogás. Construido en material plástico para evitar daños por corrosión, ofrece una tensión de ruptura máxima de 220VDC y puede ser conectado al sistema por medio de una rosca de 16 mm. (Electronilab, s.f).
- **Sensor de sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S)** (módulo MQ-136) para la detección de sulfuro de hidrógeno, funciona en temperaturas que oscilan entre -10°C y 45°C, requiere una alimentación de 5V y brinda salida análoga que puede conectarse directamente a un arduino. Detecta la presencia de gas en concentraciones de 1 a 200 partes por millón; requiere de un tiempo de precalentamiento de 48 horas aproximadamente para garantizar mediciones estables. (Winson, 2015).
- **Sensor de concentración de metano (CH<sub>4</sub>)** (módulo MQ-4) para la detección de gas metano, funciona en temperaturas que oscilan entre 20°C y 50°C, requiere una alimentación de 5V y brinda salida análoga que puede conectarse directamente a un Arduino. Detecta la presencia de gas en concentraciones de 200 a 10.000 partes por millón. (Hanwei Electronics, s.f).

Estos sensores pueden ser integrados a una plataforma IoT, permitiendo la transmisión de los datos en tiempo real mediante tecnologías como LoRa, Wi-Fi o GSM.

### **Control y Automatización del Sistema**

Para garantizar una alta eficiencia en la producción de metano y biol del biodigestor, el sistema de instrumentación puede estar basado en microcontroladores o microprocesadores como

Arduino, ESP32 o Raspberry Pi que facilitan la comunicación entre los dispositivos y la nube. (AWS, 2024).

Esto permitiría:

- Adquirir y procesar datos de los sensores para la toma de decisiones.
- Activar actuadores implementados en el sistema.
- Regular el flujo de biogás mediante electroválvulas.
- Enviar alertas o notificaciones a los usuarios en caso de fallos o parámetros fuera de rango.

### **Beneficios de la Instrumentación Electrónica en Biodigestores**

Tras revisar los proyectos realizados por Ordoñez (2022) y Estrada et al. (2017) se puede concluir que la implementación de un sistema de monitoreo y control en un biodigestor tipo Taiwán puede ofrecer ventajas como:

- Optimización de la producción de biogás.
- Reducción de pérdidas por ineficiencia en el proceso.
- Alertas en tiempo real para mantenimiento preventivo.
- Mayor autonomía y disminución de la intervención manual.
- Generación de energías renovables en actividades domésticas de las zonas rurales.
- Suministrar una herramienta para la generación de modelos matemáticos que relacionen la producción de biogás con las variables monitoreadas.

## Estado del arte

Para el desarrollo de este proyecto se ha hecho una revisión bibliográfica de diferentes proyectos desarrollados tanto nacional como internacionalmente, que están relacionados con la instrumentación de biodigestores, lo que ayuda a conocer el panorama de las investigaciones desarrolladas en este campo y nos acerca a otras fuentes bibliográficas que brindan información valiosa sobre el funcionamiento de los biodigestores y los valores óptimos de las variables que se quieren medir.

En el artículo titulado "Instrumentación Electrónica de un Sistema de Generación de Biogás" de la autoría de Estrada et al. (2017). Se presenta el diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo en el Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato - México que permite medir variables claves relacionadas con la producción de biogás en un biodigestor que fue diseñado en el software SolidWorks y tiene la forma de una caneca. Adicionalmente, usando la tarjeta MyRIO y el software LabVIEW de National Instruments se logra la supervisión en tiempo real de los parámetros de temperatura, presión y pH dentro del tanque. Finalmente, se desarrolló una interfaz gráfica para visualización remota de los datos a través de una red Wi-Fi con almacenamiento en memoria USB para análisis posteriores. Este sistema busca beneficiar a la comunidad científica al proporcionar datos que ayuden a identificar modelos matemáticos que determinan el tipo y proporción de materia orgánica produce una mayor cantidad de metano, sin embargo, se resalta la importancia de mejorar el sistema de acondicionamiento de señales ya que los datos mostrados presentan un alto margen de error.

El segundo artículo investigado ha sido "Diseño y Simulación de un Biodigestor mediante PLC y Pantalla HMI" donde se presenta el desarrollo de un sistema automatizado para la gestión eficiente de un biodigestor en Guayaquil - Ecuador. En este proyecto Soto y Reyes

(2024) proponen una solución que integra un Controlador Lógico Programable (PLC) y una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) para monitorear y controlar variables críticas en el proceso de digestión anaeróbica. Este desarrollo aborda la importante necesidad de optimizar la producción de biogás mediante la automatización del proceso, donde se garanticen condiciones óptimas dentro del biodigestor. El diseño del sistema permite la supervisión en tiempo real de los parámetros de temperatura, presión y nivel de sustrato para asegurar la operación eficiente y segura en el equipo. Este proyecto contribuye al desarrollo de tecnologías sostenibles, promueve el uso de energías renovables y la gestión adecuada de residuos orgánicos para la generación de biogás. La automatización propuesta ha funcionado correctamente y aunque no ha sido aplicada en un biodigestor, ofrece herramientas de automatización que pueden ser implementadas para mejorar la eficiencia del proceso de biodigestión y brinda un apoyo educativo para futuros proyectos en el ámbito de la ingeniería electrónica.

Finalmente, en el artículo titulado "Desarrollo de un sistema de monitoreo para las variables de temperatura, presión y pH en un biodigestor anaeróbico" desarrollado por Gómez et al. (2021) en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña - Colombia, se presenta la creación de un sistema de adquisición de datos y visualización en tiempo real de las variables de temperatura, presión y potencial de hidrógeno (pH) para supervisar y mejorar la producción de biogás a partir de residuos orgánicos en biodigestores anaeróbicos. El sistema de supervisión desarrollado en LabVIEW analiza las variables y brinda información para ajustar la carga orgánica proveniente de fuentes agropecuarias. Con el análisis de los datos se busca mejorar el proceso de biodigestión de biomasa para la producción de metano y aprovechamiento como energía renovable. En conclusión, el proyecto ofrece un instrumento virtual para visualización y análisis de datos que se enfoca en proyectos futuros y podría ser implementado en biodigestores;

se debe validar la viabilidad de los sensores sugeridos y no se plantea el acondicionamiento de las señales.

Tras la revisión del estado del arte, se puede concluir que existen diferentes investigaciones en el campo y varían las formas de realizar la automatización del proceso, ya sea mediante microcontroladores o PLC, implementando sistemas HMI que facilitan la interacción con el usuario. Sin embargo, son pocos los proyectos que han sido aplicados en campo y han interactuado directamente con un biodigestor, lo que evidencia la necesidad de pruebas en entornos reales para validar su eficiencia y adaptabilidad. Además, la automatización del proceso de biodigestión aún se encuentra abierta a recibir mejoras, especialmente en la integración de sensores precisos y el desarrollo de plataformas de monitoreo remoto que permitan un análisis de datos más robusto. Estas mejoras podrían contribuir significativamente a la estabilidad del proceso, la eficiencia en la producción de biogás y una fácil aceptación para la implementación del sistema.

### **Análisis de Dispositivos de Medición en Biodigestores.**

En este capítulo se analizan cada uno de los sensores disponibles en el mercado para las variables de pH, temperatura, concentración de metano, conductividad eléctrica y nivel, esto con el fin de seleccionar aquellos que cumplan con un rango de operación óptimo y su costo beneficio sea apropiado para usar en el prototipo.

La tabla 2 presenta cinco sensores disponibles en el mercado colombiano para la medición de pH. En ella se detallan aspectos como marca, rango de operación, material de fabricación y valor comercial de cada dispositivo. Con base en esta información, se analiza la viabilidad de uso de cada sensor y se selecciona el más adecuado para su implementación en el prototipo.

**Tabla 2***Análisis de Sensores de pH*

Sensor	Marca	Rango de operación	Material fabricado	Costos (COP)
Electrodo de pH de vidrio <sup>a</sup>	Maher	0 - 13 pH	Vidrio Cerámica	200.000 - 600.000
SEN0161: módulo pH 4502C con electrodo E201-BNC <sup>b</sup>	Arduino	0 - 14 pH	Plástico Vidrio	106.000
Sensor digital de pH/ORP de combinación <sup>c</sup>	Hach	0 - 14 pH	Fluoropolímero termoplástico semicristalino opaco	250.000 - 700.000
Sensor sumergible <sup>d</sup>	Milwaukee	0 - 14 pH	Plástico Vidrio	175.000
Sensor de pH industrial <sup>e</sup>	Endress+Hauser	0 - 14 pH	Cerámica Acero inoxidable	800.000 - 2.000.000

*Nota.* Tabla comparativa de sensores aptos para la medición de pH. Adaptado de <sup>a</sup>Maher (s.f.). <sup>b</sup>Arduino (2024). <sup>c</sup>Hach (s.f.). <sup>d</sup>Tech (2022). <sup>e</sup>Endress + Hauser (s.f.)

La tabla 3 presenta cuatro sensores disponibles en el mercado colombiano para la medición de temperatura. En ella se detallan aspectos como marca, rango de operación, material

de fabricación y valor comercial de cada dispositivo. Con base en esta información, se analiza la viabilidad de uso de cada sensor y se selecciona el más adecuado para su implementación en el prototipo.

**Tabla 3**

*Análisis de Sensores de Temperatura*

Sensor	Marca	Rango de operación	Material fabricado	Costos (COP)
Termopar tipo K <sup>a</sup>	Omega Engineering	-200°C - 1150 °C	Acero inoxidable	300.000
Termistor <sup>b</sup>	TME	-50 °C a 120°C	Acero inoxidable Silicona	60.000
Sensor PT 100 <sup>c</sup>	Siemens	-70 °C a 260 °C	Acero inoxidable	65.000
DTH22 <sup>d</sup>	Electronilab	-40°C a 80°C	Plástico	30.000 - 70.000

*Nota* Tabla comparativa de sensores aptos para la medición de temperatura. Adaptado de <sup>a</sup>

Farnel (2025). <sup>b</sup>TME (s.f.). <sup>c</sup>Siemens (2025). <sup>d</sup>Naylamp mechatronics (2023).

La tabla 4 presenta cuatro sensores disponibles en el mercado colombiano para la medición de conductividad eléctrica. En ella se detallan aspectos como marca, rango de operación, material de fabricación y valor comercial de cada dispositivo. Con base en esta información, se analiza la viabilidad de uso de cada sensor y se selecciona el más adecuado para su implementación en el prototipo.

**Tabla 4***Análisis de Sensores de Conductividad Eléctrica*

Sensor	Marca	Rango de operación	Material fabricado	Costos (COP)
CLS21D <sup>a</sup>	Endress + Hauser	k=1: 10 $\mu$ S/cm a 20 mS/cm	Eje del sensor: Poliéster Electrodos: grafito	2.500.000
CS675 <sup>b</sup>	Sensorex	0,01 a 2000 mS/cm.	Acero inoxidable	1.500.000
Hamilton Conducell 4USF <sup>c</sup>	Hamilton	1 a 300 000 $\mu$ S/cm	Acero inoxidable	2.000.000
DFR0300-H <sup>d</sup>	Gravity	10 a 100 mS/cm	Platino negro y acero inoxidable	520.000

*Nota.* Tabla comparativa de sensores aptos para la medición de conductividad eléctrica.

Adaptado de <sup>a</sup>Endress + Hauser EH (s.f.). <sup>b</sup>pH center (s.f.). <sup>c</sup>Hamilton (s.f.). <sup>d</sup>DFRobot (s.f.).

La tabla 5 presenta cuatro sensores disponibles en el mercado colombiano para la medición de sulfuro de hidrogeno. En ella se detallan aspectos como marca, rango de operación, material de fabricación y valor comercial de cada dispositivo. Con base en esta información, se analiza la viabilidad de uso de cada sensor y se selecciona el más adecuado para su implementación en el prototipo.

**Tabla 5***Análisis de Sensores de Sulfuro de Hidrógeno*

Sensor	Marca	Rango de operación	Material fabricado	Costos (COP)
Polytron 8100 EC <sup>a</sup>	Dräger	0-100 ppm	Acero inoxidable	5.500.000
MSA Altair Pro H <sub>2</sub> S Detector <sup>b</sup>	Altair	0-100 ppm	Polímero	1.400.000
HXG-2d <sup>c</sup>	Sensit	0-1.000 ppm	Plástico	1.800.000
MQ-136 <sup>d</sup>	Arduino	1-100 ppm	Plástico	200.000

*Nota.* Tabla comparativa de sensores aptos para la medición de sulfuro de hidrogeno. Adaptado de <sup>a</sup>Dräger (s.f.), <sup>b</sup>MSA (s.f.), <sup>c</sup>Sensit (s.f.), <sup>d</sup> Didácticas electrónicas (s.f.)

La tabla 6 presenta seis sensores disponibles en el mercado colombiano para la medición de concentración de metano. En ella se detallan aspectos como marca, rango de operación, material de fabricación y valor comercial de cada dispositivo. Con base en esta información, se analiza la viabilidad de uso de cada sensor y se selecciona el más adecuado para su implementación en el prototipo.

**Tabla 6***Análisis de Sensores de Concentración de Metano*

Sensor	Marca	Rango de operación	Material fabricado	Costos (COP)
IR-F9 <sup>a</sup>	Honeywell	0 a 3000 ppm	Acero inoxidable	6.000.000
Polytron 5700 IR <sup>b</sup>	Dräger	0 a 100 % de vol	Acero inoxidable o aluminio	9.000.000
Crowcon Xgard IR <sup>c</sup>	Crowcon	0-100% LEL	Aluminio o acero inoxidable	4.500.000
MH-Z16 <sup>d</sup>	N/R	0-2000 partes por millón (PPM)	Plástico	650.000
MGP261 <sup>e</sup>	Vaisala	0 a 100 % de vol	Acero inoxidable	5.000.000
MQ-4 <sup>f</sup>	Arduino	200- 10000 partes por millón (PPM)	Plástico	16.000

*Nota.* Tabla comparativa de sensores aptos para la medición de concentración de metano.

Adaptado de <sup>a</sup> Honeywell (s.f.). <sup>b</sup>Dräger (2020). <sup>c</sup> Crowcon (2011). <sup>d</sup>Electrónica Embajadores (s.f.). <sup>e</sup>Vaisala (s.f.). <sup>f</sup>Hanwei electronics (s.f.).

**Sensores Seleccionados**

Los sensores seleccionados para usar en este proyecto han sido los de más bajo costo y fácil adquisición teniendo en cuenta que se quiere obtener un prototipo funcional, por lo tanto, la vida útil de la instrumentación se puede ver afectada por los gases corrosivos del proceso de biodigestión en especial el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).

## *Potencial de Hidrógeno*

### **Figura 3**

*Sensor SEN0161 para Medición de pH*



*Nota.* Fotografía del sensor SEN0161 para medición de pH. Tomado de Electronicadiy. (s.f).

Sensor analógico de PH SEN0161. <https://www.electronicadiy.com/products/sensor-de-ph-analogico-sen0161>

- ✓ Marca: Arduino
- ✓ Modelo: SEN0161
- ✓ Rango de trabajo: 0 – 14
- ✓ Rango óptimo en biodigestores: El valor óptimo de pH está en el rango entre 6.5 y 7.5
- ✓ Fuente de alimentación: 5V DC
- ✓ Correlación: Señal análoga de 0V a 5V que es directamente proporcional a la medición de pH en un rango de 0 a 14.

## *Temperatura*

### **Figura 4**

#### *Sensor PT100 para Medición de Temperatura*



*Nota.* Fotografía del sensor PT100 para medición de temperatura. Tomado de Zamu electrónica.

(s.f). PT100 Sensor de temperatura RTD 2 hilos. <https://www.zamux.co/sensor-de-temperatura-rtd-pt100>

- ✓ Marca: Siemens
- ✓ Modelo: PT100
- ✓ Rango de trabajo: -70 °C a 260 °C
- ✓ Rango óptimo en biodigestores: El valor óptimo está en el rango entre 30°C a 35°C
- ✓ Fuente de alimentación: 5V DC, requiere acondicionamiento de la señal por medio de un puente de Wheatstone.
- ✓ Correlación: Incrementa su resistencia al aumentar la temperatura. A 0°C su resistencia es de 100 ohmios.

## Conductividad Eléctrica

### Figura 5

#### Sensor DFR0300-H para Medición de Conductividad Eléctrica



*Nota.* Fotografía de sensor DFR0300-H para medición de conductividad eléctrica. Tomado de DFRobot. (s.f). *DFR0300-H*.

[https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_Analog\\_Electrical\\_Conductivity\\_Sensor\\_Meter\\_K%3D10\\_SK\\_U\\_DFR0300-H](https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_Electrical_Conductivity_Sensor_Meter_K%3D10_SK_U_DFR0300-H)

- ✓ Marca: Gravity
- ✓ Modelo: DFR0300-H
- ✓ Rango de trabajo: 10 a 100 mS/cm
- ✓ Rango óptimo en biodigestores: Un máximo de 2290  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un mínimo de 979  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Sanchez et al. 2016).
- ✓ Fuente de alimentación: 3 a 5 VDC
- ✓ Correlación: Salida de 0 a 3.2 V
- ✓ Rango de temperatura: 0 a 40 °C

## *Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S)*

### **Figura 6**

*Sensor MQ-136 para Medición de Sulfuro de Hidrógeno*



*Nota.* Fotografía del sensor MQ-136 para medición de sulfuro de hidrógeno. Tomado de Moviltronics. (s.f). Sensor de gas MQ136. <https://moviltronics.com/tienda/sensor-mq136/>

- ✓ Marca: Arduino
- ✓ Modelo: MQ-136
- ✓ Rango de trabajo: 1 a 100 ppm
- ✓ Rango óptimo en biodigestores: 100 a 300 ppm para controlar el problema de la corrosión en los sistemas. (Torres et al. 2020).
- ✓ Fuente de alimentación: 5V DC
- ✓ Correlación: Señal analógica de 0V a 5V que puede conectarse directamente al microcontrolador. (Se requiere un precalentamiento de 48h)

## Concentración de Metano ( $CH_4$ )

### Figura 7

*Sensor MQ-4 para Medición de Concentración de Metano*



*Nota.* Fotografía del sensor MQ-4 para medición de concentración de metano. Tomado de IC-Components. (s.f). Guía del sensor de gas MQ4: principios operativos, configuración de pines y calibración. <https://www.ic-components.es/blog/mq4-gas-sensor-guide-operational-principles,pin-configuration,and-calibration.jsp#5.%20Working%20Principle%20of%20the%20MQ-4%20Gas%20Sensor>

- ✓ Marca: Arduino
- ✓ Modelo: MQ-4
- ✓ Rango de trabajo: 200 a 10000 ppm
- ✓ Rango óptimo en biodigestores: 50 a 75%
- ✓ Fuente de alimentación: 5V DC
- ✓ Correlación: Señal análoga de 0V a 5V que puede conectarse directamente al microcontrolador. (Se requiere un precalentamiento de 24h)

## *Sensor de Nivel*

### **Figura 8**

#### *Flotador Horizontal para Medición de Nivel*



*Nota.* Fotografía de flotador horizontal para medición de nivel. Tomado de Ferretronica. (s.f).

Sensor Horizontal de Nivel de Agua Tipo Flotador. <https://ferretronica.com/products/sensor-horizontal-de-nivel-de-agua-tipo-flotador>

- ✓ Marca: Genérico
- ✓ Modelo: Horizontal
- ✓ Rango de trabajo: N/A
- ✓ Rango óptimo en biodigestores: N/A
- ✓ Fuente de alimentación: Máximo 220VDC
- ✓ Correlación: Señal ON/OFF usada para activación del circuito de potencia de una electroválvula

## *Electroválvula*

### **Figura 9**

#### *Electroválvula para Drenaje del Sistema*



*Nota.* Fotografía de electroválvula para drenaje automático del sistema.

- ✓ Marca: JELPC
- ✓ Modelo: 2 vías, 2 posiciones
- ✓ Rango de trabajo: N/A
- ✓ Rango óptimo en biodigestores: N/A
- ✓ Fuente de alimentación: Máximo 220V
- ✓ Correlación: Señal ON/OFF para apertura o cierre del paso del fluido

## Sistema Automatizado de Sensores

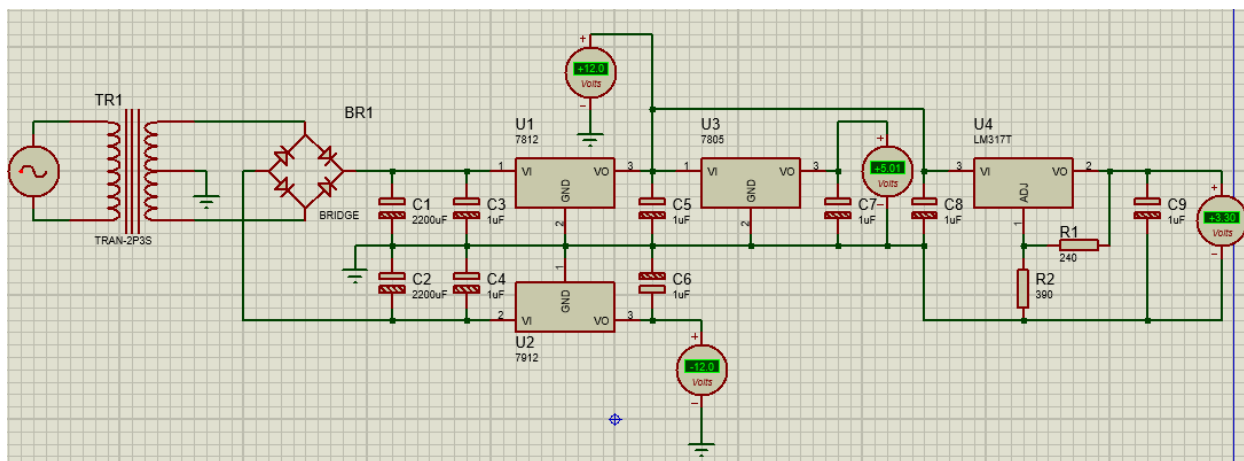
El capítulo 2 presenta el análisis matemático y la simulación de los esquemas electrónicos necesarios para la implementación del prototipo de instrumentación electrónica. Dichas simulaciones se realizaron utilizando la versión de prueba del software Proteus, permitiendo validar el funcionamiento de cada circuito antes de su construcción física.

### Fuente Simétrica para Alimentación del Circuito

El circuito requiere ser alimentado con 12V, 5V, 3.3V y -12V DC, por lo tanto, se implementó una fuente simétrica que suministró estos voltajes, para ellos, se diseñó el circuito de la figura 10.

**Figura 10**

*Fuente Simétrica para Alimentar el Sistema*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de fuente simétrica para alimentar el sistema.

### Cálculos Teóricos para Sensor de Potencial de Hidrógeno SEN0161

Este sensor no requiere un acondicionamiento de su señal, puesto que la señal analógica que entrega se conecta directamente al microcontrolador, sin embargo, para garantizar lecturas

más precisas se ordenan los valores usando QuickSort, se eliminan valores extremos (para reducir ruido) y se calcula un promedio de las lecturas más confiables.

La fórmula para usar con el ESP32 es:

$$V = \frac{avgValue * 3.3}{4095 * 6}$$

Para simular con Arduino en la versión de prueba del software Proteus:

$$V = \frac{avgValue * 5}{1023 * 6}$$

*avgValue* corresponde a la suma de las 6 lecturas centrales obtenidas usando el algoritmo QuickSort.

Para ESP32 sería:

$$pH = 14 * \frac{V}{3.3}$$

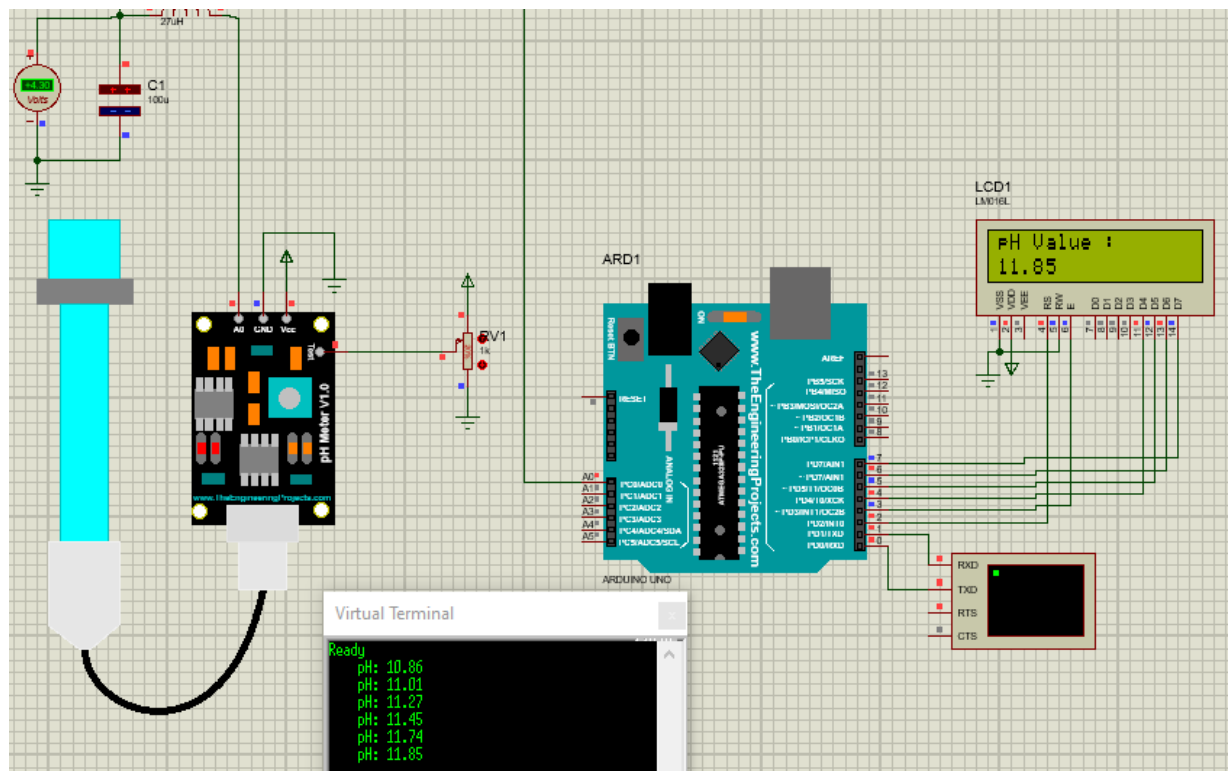
Para Arduino sería:

$$pH = 14 * \frac{V}{3.3}$$

El sensor de pH se implementó con Arduino y se verificó su funcionamiento mediante el terminal virtual, arrojando lecturas de pH en el rango de 10,86 hasta 11,85. La figura 11 indica el funcionamiento del sensor.

**Figura 11**

*Simulación del Sensor de pH*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de simulación del sensor de pH.

### **Cálculos Teóricos y Diseño para Sensor de Temperatura PT100**

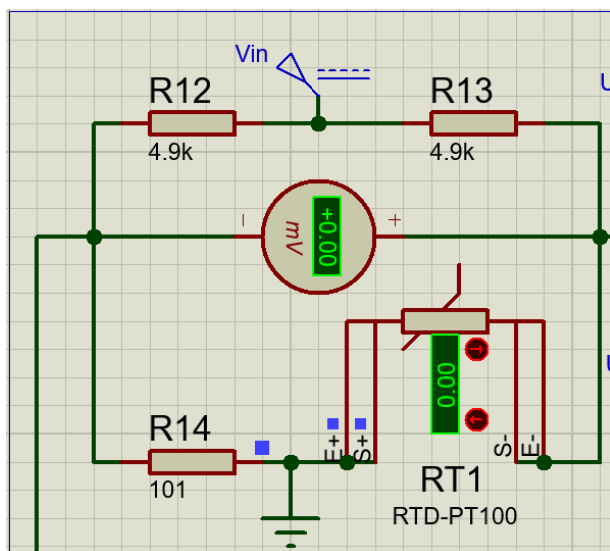
A continuación, se describen las diferentes etapas del acondicionamiento de señal para el sensor de temperatura, incluyendo los convertidores de voltaje y corriente, así como los filtros necesarios para garantizar una lectura precisa y estable.

#### ***Acondicionamiento de la Señal***

El sensor seleccionado ha sido el PT100, por lo tanto el circuito en equilibrio se indica en la figura 12:

**Figura 12**

*Puente de Wheatstone*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de puente de Wheatstone para acondicionamiento de sensor de temperatura PT100.

En la simulación del puente Wheatstone se garantizó un voltaje de equilibrio de 0V, con un arreglo resistivo de dos resistencias  $4,9k\Omega$ , una resistencia de  $101\Omega$  y el sensor PT100 que ofrece  $100\Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ .

- Amplificar a un rango de voltaje:

En la implementación del amplificador de instrumentación AD620, se calculó la resistencia de ganancia haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$R_G = \frac{49.4K}{G - 1}$$

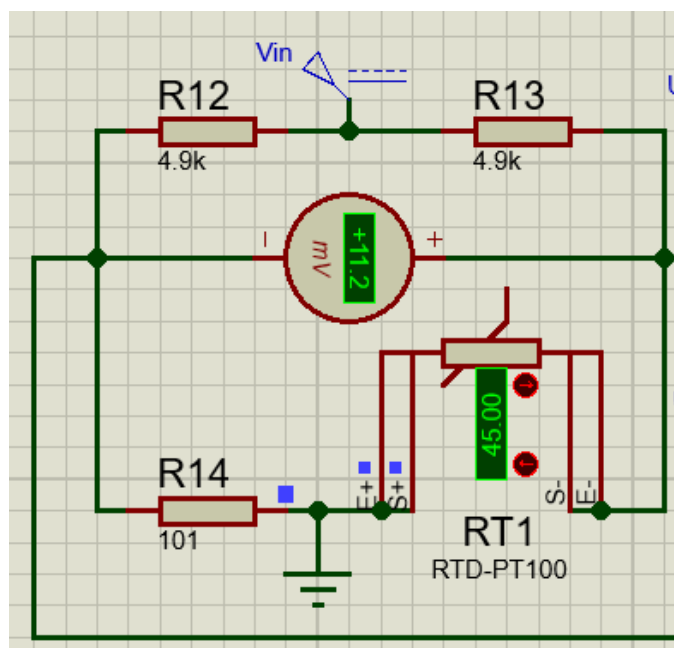
Donde,

$$G = \frac{3.3V}{\text{Voltaje de salida en el puente Wheatstone}}$$

Para el cálculo de la ganancia, se trabajó con una temperatura de  $45^{\circ}\text{C}$ , en la simulación del puente Wheatstone se garantizó un voltaje de equilibrio de  $11,2\text{mV}$ , con un arreglo resistivo de dos resistencias  $4,9\text{k}\Omega$ , una resistencia de  $101\Omega$  y el sensor PT100 que ofrece  $117,31\Omega$  a  $45^{\circ}\text{C}$ , tal y como se aprecia en la figura 13.

**Figura 13**

*Voltaje de Salida en Puente de Wheatstone con Temperatura de  $45^{\circ}\text{C}$*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus para representar voltaje de salida en puente Wheatstone con temperatura de  $45^{\circ}\text{C}$ .

El AD620 es un amplificador de instrumentación de alta precisión y bajo consumo, ampliamente utilizado para amplificar señales de baja magnitud. Una de sus principales ventajas es la posibilidad de ajustar la ganancia mediante una única resistencia externa. En este caso, se ha calculado la resistencia de ganancia considerando que la entrada máxima de voltaje que puede recibir el ESP32 es de  $3,3\text{ V}$ , como se muestra en la figura 14. Posteriormente, en la figura 15, se

presenta la verificación del correcto funcionamiento del circuito, donde se observa una salida de 0 V correspondiente a una temperatura de 0 °C.

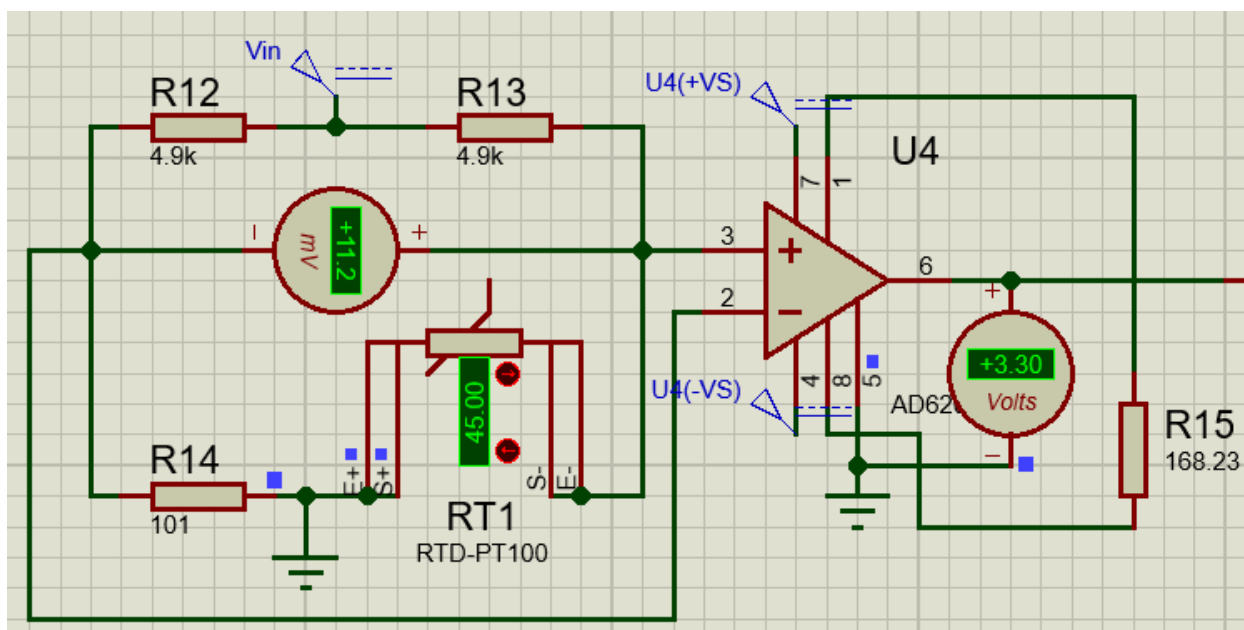
$$G = \frac{3.3V}{11.2mV} = 294.642$$

Por lo tanto, la resistencia de ganancia es:

$$R_G = \frac{49.4K}{294.642 - 1} = 168.23\Omega$$

**Figura 14**

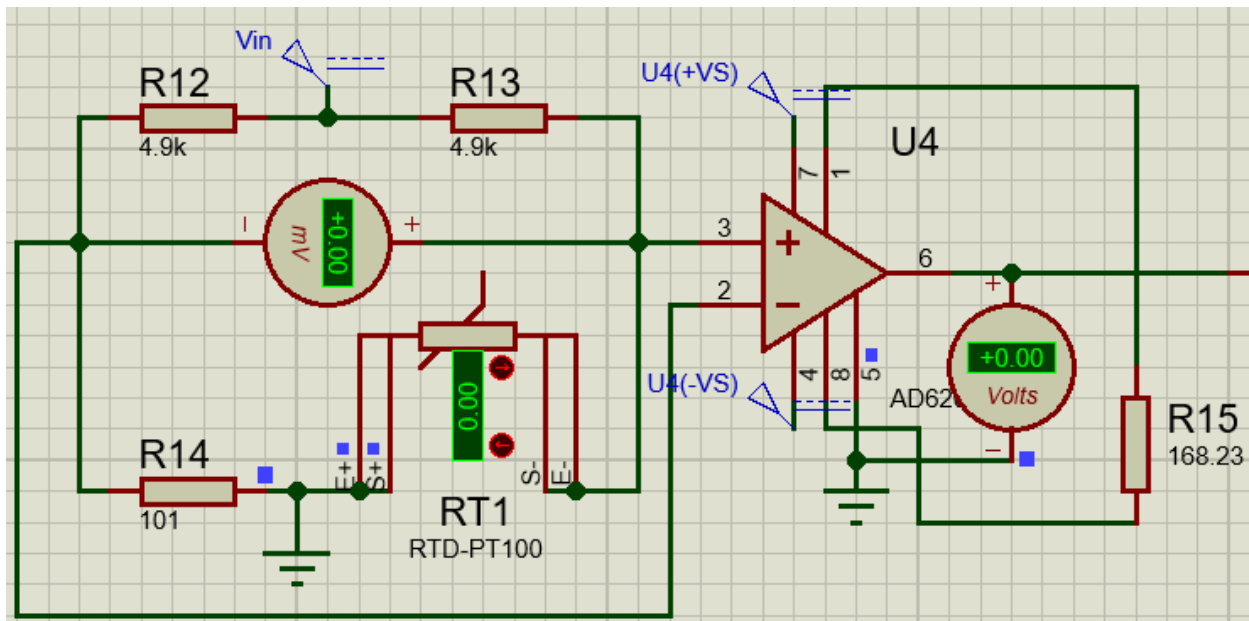
*Amplificador de Instrumentación AD620 a 3.3V*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de amplificador de instrumentación AD620 con salida de 3.3V a 45°C.

**Figura 15**

*Amplificador de Instrumentación AD620 a 0V*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de amplificador de instrumentación AD620 con salida de 0V a 0°C.

- Eliminar el ruido de la señal:

Para un filtro activo pasa bajo de segundo orden, cuya frecuencia de corte es de 180Hz, se hace uso de un tipo de filtro Tschebyscheff con un rizado de 3dB.

Para ello se establece el valor de un condensador cerámico comercial:

$$C1 = 0.1\mu F$$

**Figura 16**

Valores de las Constantes para Filtro Tschebyscheff con un Rizado de 3dB

Tschebyscheff			3-dB		
n	i	a <sub>i</sub>	b <sub>i</sub>	k <sub>i</sub> = f <sub>Ci</sub> / f <sub>C</sub>	Q <sub>i</sub>
1	1	1.0000	0.0000	1.000	—
2	1	1.0650	1.9305	1.000	1.30
3	1	3.3496	0.0000	0.299	—
	2	0.3559	1.1923	1.396	3.07
4	1	2.1853	5.5339	0.557	1.08
	2	0.1964	1.2009	1.410	5.58
5	1	5.6334	0.0000	0.178	—
	2	0.7620	2.6530	0.917	2.14
	3	0.1172	1.0686	1.500	8.82

Nota. Valores de constantes para aplicar en la creación de un filtro Tschebyscheff con un rizado de 3dB. Tomado de Cabrera, J. (s.f). Filtros activos.

<https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>

$$C2 \geq C1 * \frac{4b_i}{(a_i)^2} = 0.1(10)^{-6} * \frac{4 * 1.9305}{(1.065)^2} \approx 6.8(10)^{-7}$$

$$C2 \approx 0.68\mu F \text{ ó } 680nF$$

Cálculo de resistencias:

$$R1 = \frac{a_i C2 - \sqrt{(a_i)^2 (C2)^2 - 4b_i C1 C2}}{4\pi f_c C1 C2}$$

$$R1 = \frac{(1.065)(0.68(10)^{-6}) - \sqrt{(1.065)^2 (0.68(10)^{-6})^2 - 4(1.9305)(0.1(10)^{-6})(0.68(10)^{-6})}}{4\pi(180)(0.1(10)^{-6})(0.68(10)^{-6})}$$

$$R1 = \frac{7.242(10)^{-7} - 2.51069(10)^{-8}}{1.538(10)^{-10}} = 4545.46$$

$$R2 = \frac{a_i C2 + \sqrt{(a_i)^2 (C2)^2 - 4b_i C1 C2}}{4\pi f_c C1 C2}$$

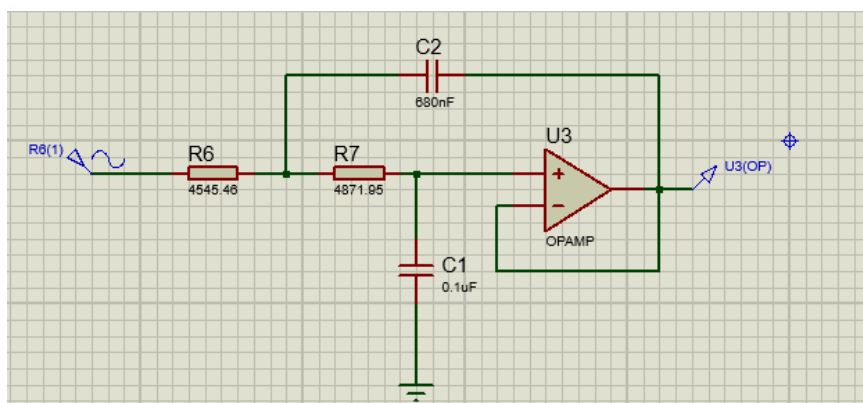
$$R2 = \frac{(1.065)(0.68(10)^{-6}) + \sqrt{(1.065)^2(0.68(10)^{-6})^2 - 4(1.9305)(0.1(10)^{-6})(0.68(10)^{-6})}}{4\pi(180)(0.1(10)^{-6})(0.68(10)^{-6})}$$

$$R2 = \frac{7.242(10)^{-7} + 2.51069(10)^{-8}}{1.538(10)^{-10}} = 4871.95$$

Con los cálculos obtenidos se planteó el circuito del filtro Tschebyscheff con un rizado de 3dB como se muestra en la figura 17.

**Figura 17**

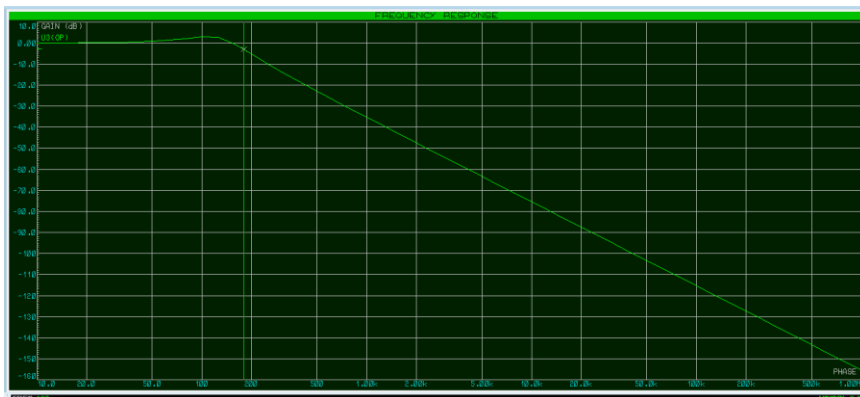
*Circuito de Filtro Activo Pasa Bajo de Segundo Orden*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de circuito de filtro activo pasa bajo de segundo orden.

**Figura 18**

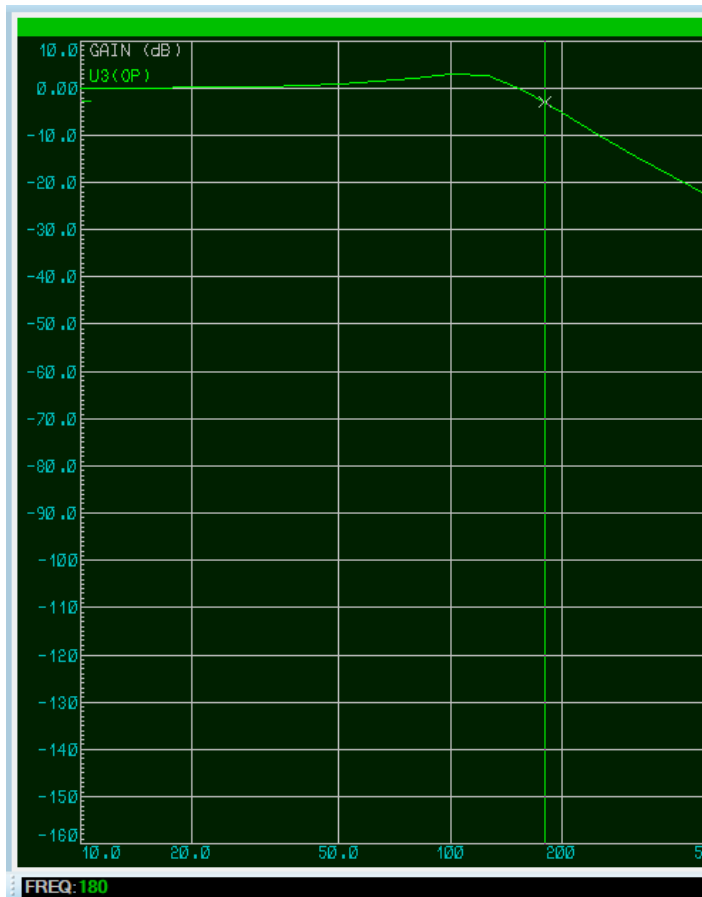
*Respuesta del Filtro Activo Pasa Bajo de Segundo Orden*



*Nota.* Elaboración propia de respuesta del filtro activo pasa bajo de segundo orden.

**Figura 19**

*Respuesta del Filtro Activo Pasa Bajo de Segundo Orden*



*Nota.* Elaboración propia de respuesta del filtro activo pasa bajo de segundo orden con frecuencia de corte de 180Hz.

En la figura 18 y figura 19 se puede observar la respuesta del filtro activo pasa bajo de segundo orden tipo Tschebyscheff con un rizado de 3dB donde se cumple que su frecuencia de corte es de 180Hz.

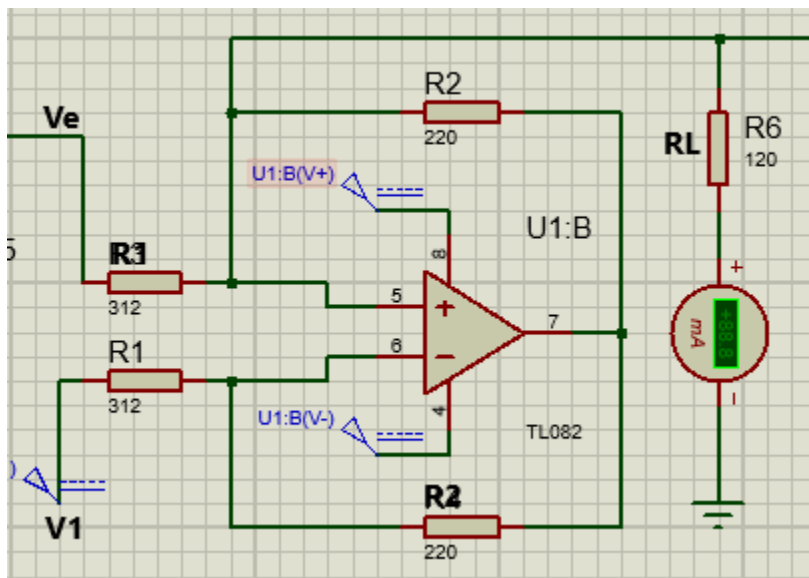
- Conversión de voltaje a corriente y conversión de corriente a voltaje:

Para el diseño de un circuito convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA con OPAMP se implementó la simulación de la etapa en Proteus como se indica en la figura 20, luego se han

verificado los cálculos analíticos con los valores simulados y garantizando su adecuado funcionamiento como se muestra en la figura 21 y 22.

### Figura 20

*Circuito Convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA*



*Nota.* Elaboración propia de circuito convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA con amplificador operacional.

Para ello se plantean las siguientes ecuaciones:

$$I_L = \frac{V_e - V_1}{R_1}$$

Donde,

$$V_e = \text{voltaje de entrada}$$

Como se desea que al tener un voltaje de 0V el circuito nos entregue 4mA y cuando se tengan 3.3V el circuito entregue 20mA, entonces:

$$R_1 I_L = V_e - V_1$$

$$R_1 (4 * 10^{-3} A) = 0V - V_1$$

$$R_1(20 * 10^{-3}A) = 3.3V - V_1$$

Se calcula R1:

$$R_1(20 * 10^{-3}A) = 3.3V - R_1(4 * 10^{-3}A)$$

$$R_1((20 * 10^{-3}A) - (4 * 10^{-3}A)) = 3.3V$$

$$R_1 = \frac{3.3V}{(20 * 10^{-3}A) - (4 * 10^{-3}A)} = 206.25\Omega$$

Por lo tanto,

$$206.25\Omega(4 * 10^{-3}A) = 0V - V_1$$

$$V_1 = -0.825V$$

Se asigna un valor a R2 que sea menor a R1 y se procede a calcular el valor de RL, para ello se usa la siguiente ecuación:

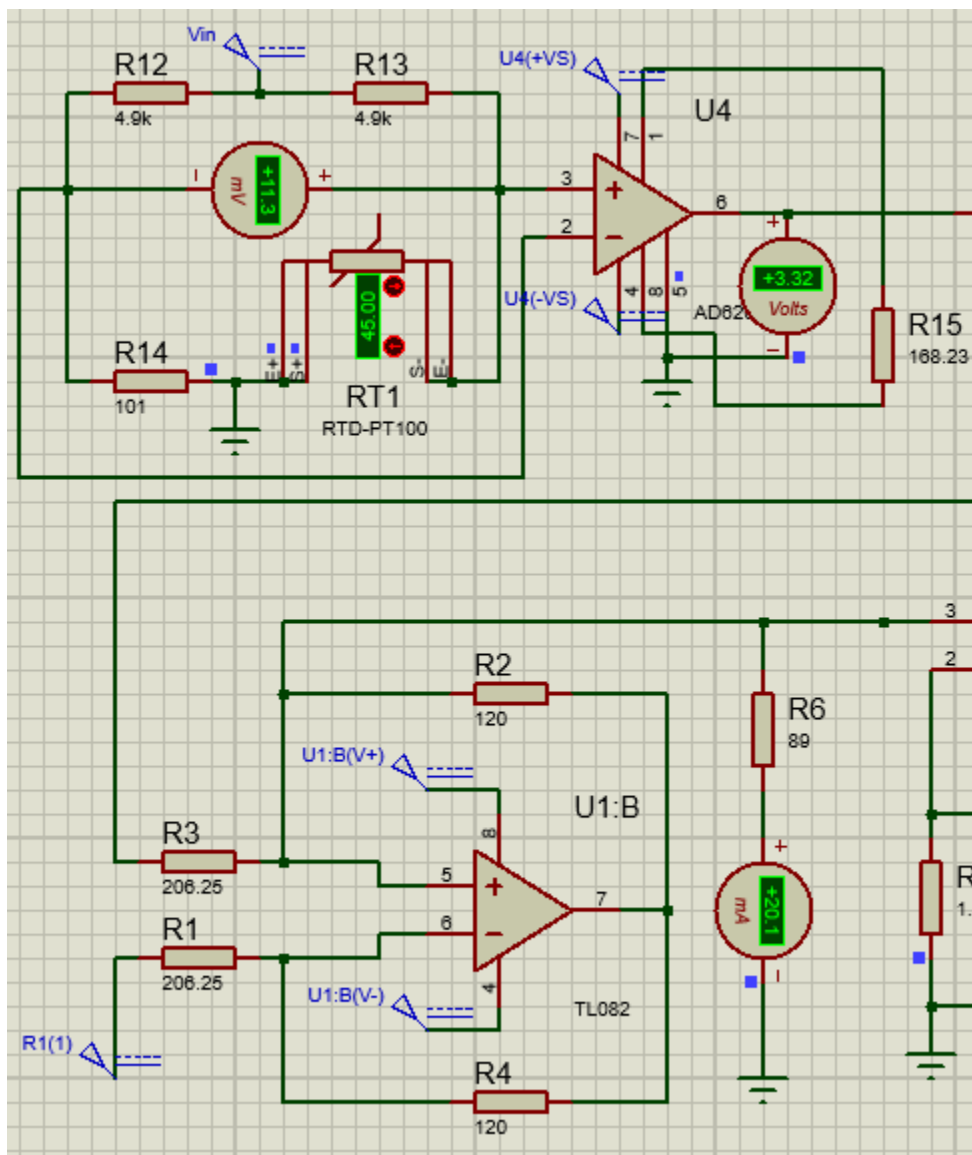
$$V_c = V_e + \frac{I_L R_2 + V_e}{R_1} (R_1 + R_2)$$

$$3.3V = -0.825V + \frac{(20 * 10^{-3}A)R_L + 0.825V}{206.25\Omega} (206.25\Omega + 120\Omega)$$

$$R_L = 89.137\Omega$$

**Figura 21**

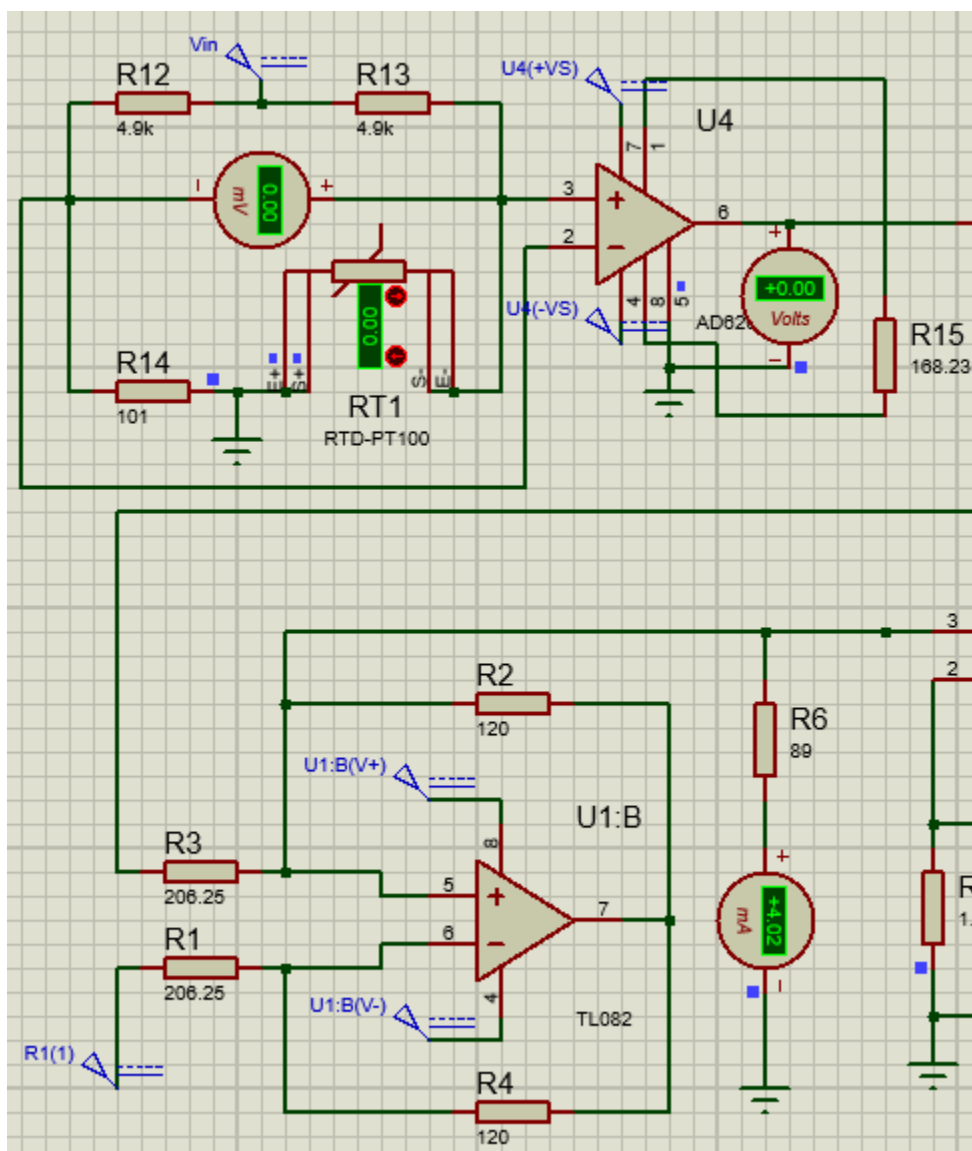
*Circuito Convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA y Temperatura de 45°C*



*Nota.* Elaboración propia de circuito convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA con amplificador operacional y lectura de 45°C.

**Figura 22**

*Circuito Convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA y Temperatura de 0°C*

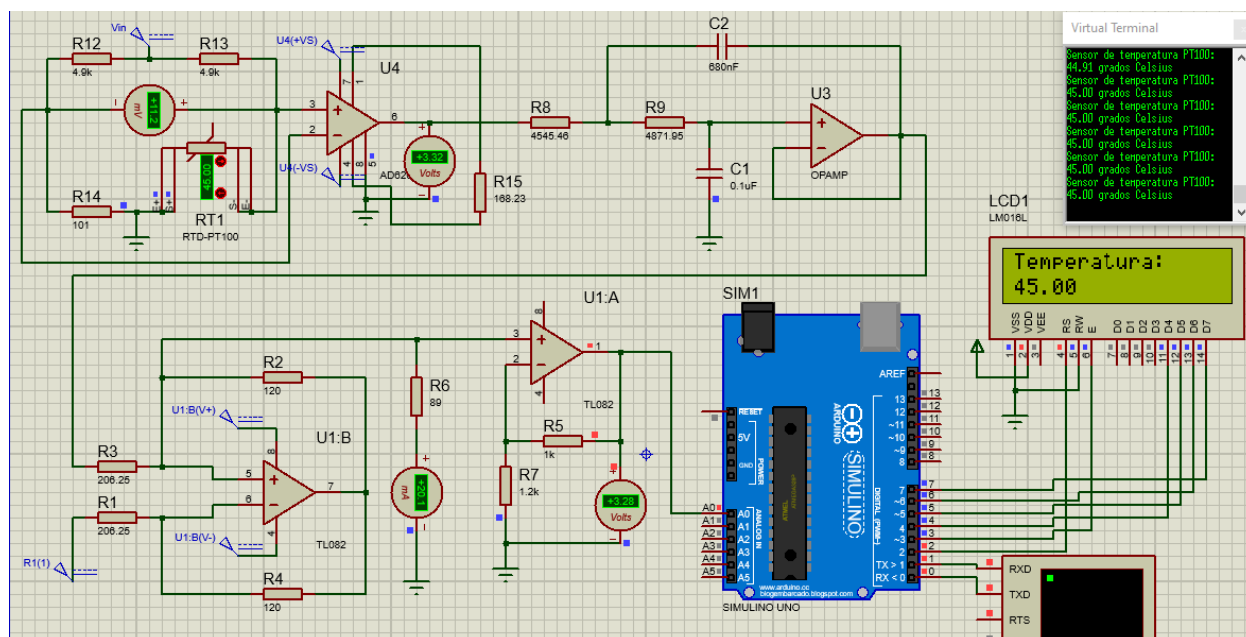


*Nota.* Elaboración propia de circuito convertidor de 0 – 3.3V a 4 – 20mA con amplificador operacional y lectura de 0°C.

Finalmente, se agregó un convertidor de corriente a voltaje y se integró el circuito con el puente de Wheatstone que usa el sensor de temperatura PT100 como se plantea en la figura 23.

Figura 23

## Circuito Integrado para Lectura de Temperatura



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de circuito integrado con amplificación y convertidor de voltaje a corriente y convertidor de corriente a voltaje.

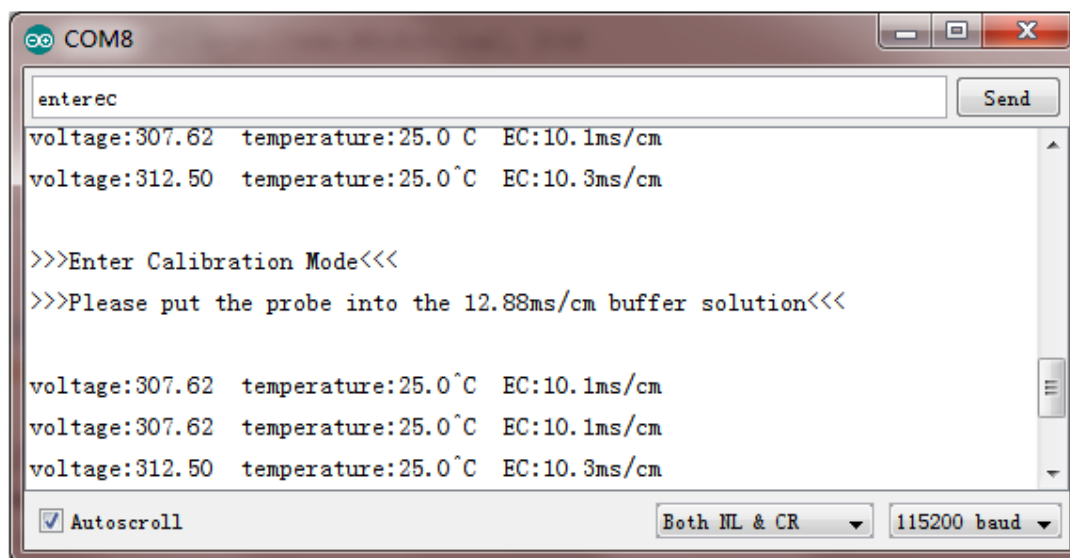
## Cálculos Teóricos para Representación de Sensor de Conductividad Eléctrica DFR0300-H

El sensor de conductividad eléctrica (EC) mide la capacidad de una solución líquida para conducir electricidad, lo cual depende de la concentración de iones disueltos. El sensor aplica una señal eléctrica entre dos electrodos y mide la corriente resultante, la cual se relaciona con la conductividad mediante un factor de celda ( $K = 10$ ). Para el sensor DFR0300-H obtener lecturas precisas, este aplica una compensación por temperatura, ya que la conductividad varía con los cambios térmicos. El valor final, expresado en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  o  $\text{mS}/\text{cm}$ , se obtiene a través de un procesado electrónico que convierte el voltaje analógico en una medición digital. (DFRobot, s.f).

No es necesario realizar cálculos matemáticos para usar este sensor, basta con usar el código suministrado por el fabricante y realizar una calibración mensual con soluciones tampón estándar de 12,88 ms/cm. En las figuras 24 y 25 se muestra parte del procedimiento de calibración, el cual se ejecuta por medio del monitor serial con los comandos ENTEREC, CALEC y EXITEC.

### Figura 24

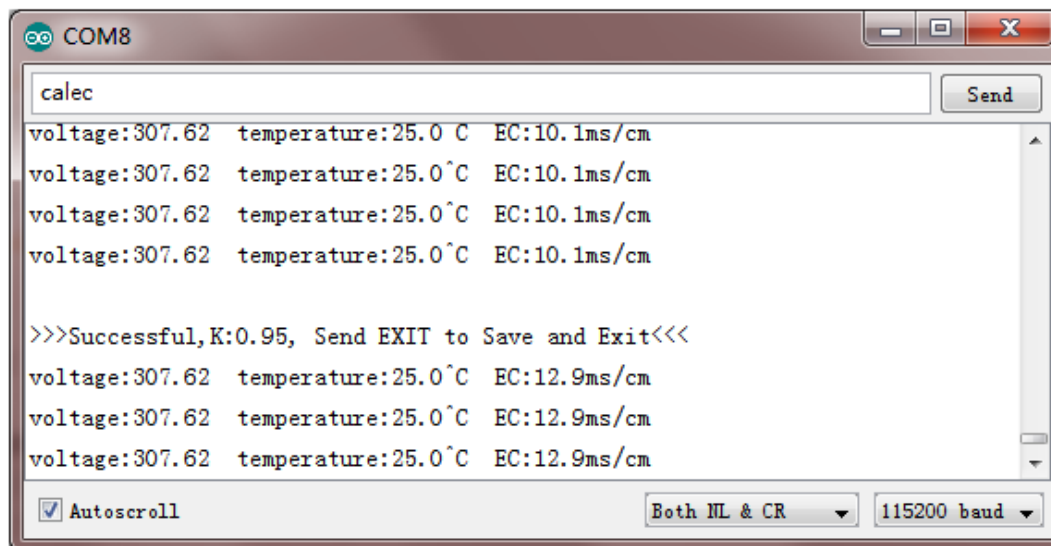
#### *Ingreso al Modo Calibración*



*Nota.* Ejemplo de ingreso al modo calibración para sensor DFR0300-H. Tomado de DFRobot.

(s.f.). *DFR0300-H*.

[https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_Analog\\_Electrical\\_Conductivity\\_Sensor\\_Meter\\_K%3D10\\_SK\\_U\\_DFR0300-H](https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_Electrical_Conductivity_Sensor_Meter_K%3D10_SK_U_DFR0300-H)

**Figura 25***Ingreso al Modo Calibración*

*Nota.* Ejemplo de proceso de calibración por monitor serial para el sensor DFR0300-H. Tomado de DFRobot. (s.f.). DFR0300-H.

[https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_Analog\\_Electrical\\_Conductivity\\_Sensor\\_Meter\\_K%3D10\\_SK\\_U\\_DFR0300-H](https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_Electrical_Conductivity_Sensor_Meter_K%3D10_SK_U_DFR0300-H)

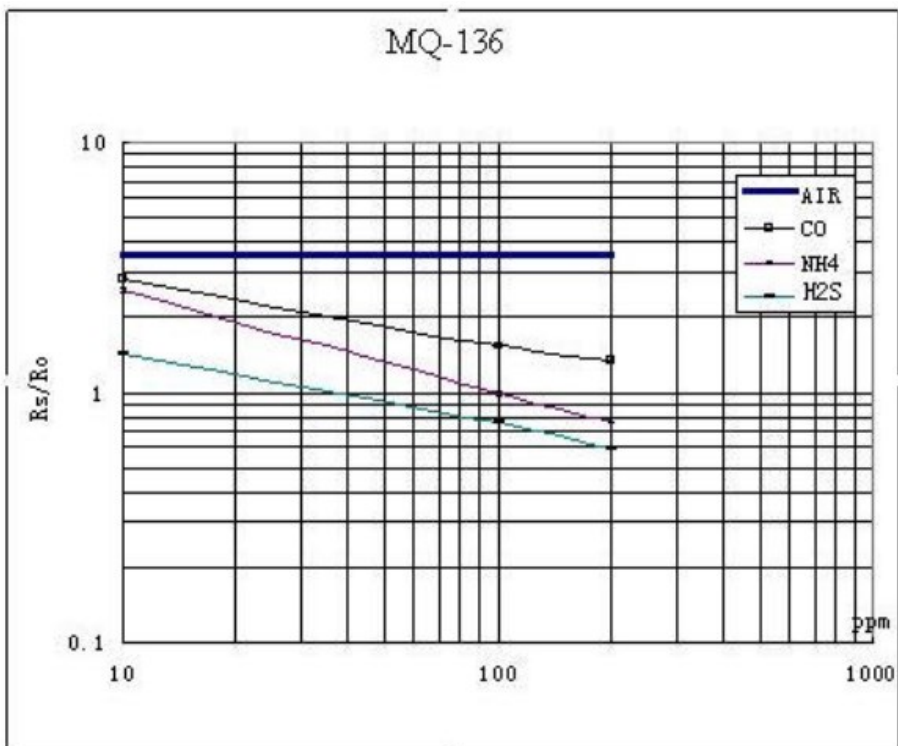
### **Cálculos Teóricos para Determinar la Concentración de Sulfuro de Hidrogeno con Sensor MQ-136**

El sensor MQ-136 no mide directamente la concentración de gas en ppm, sino que su resistencia interna  $R_s$  cambia en función de la concentración de gas y  $R_o$  es un valor fijo obtenido en la calibración en aire limpio que se usa como referencia para calcular la relación  $R_s/R_o$ .

Para convertir la relación  $R_s/R_o$  en ppm, se debe usar una ecuación logarítmica basada en la curva de respuesta del sensor como se muestra en la figura 26, donde, la respuesta del sensor para el sulfuro de hidrogeno es representado con la línea de color azulamarina.

**Figura 26**

*Característica de Sensibilidad del Sensor MQ-136*



*Nota.* Curva característica de sensibilidad o respuesta del sensor MQ-136. Tomado de Alldatasheet. (s.f). MQ-136 Datasheet (PDF) - Hanwei Electronics Group Corporation.

<https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1131997/HANWEI/MQ-136.html>

**Primer paso:** Calcular la ecuación logarítmica, ya que los sensores MQ tienen una curva de respuesta que sigue la ecuación de una recta que pasa por dos puntos:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$

Donde:

- $y$  es el valor de  $\log(Rs/R0)$
- $x$  es el  $\log(\text{ppm})$

Como se desea conocer el valor de “x”, se procede a despejar:

$$x = \frac{(y - y_1)(x_2 - x_1)}{y_2 - y_1} + x_1 \rightarrow \log x = \frac{(\log Y - \log Y_1)(\log X_2 - \log X_1)}{\log Y_2 - \log Y_1} + \log X_1$$

Se despeja usando propiedades de logaritmos:

$$\log x = \frac{(\log Y - \log Y_1) \log \frac{X_2}{X_1}}{\log \frac{Y_2}{Y_1}} + \log X_1$$

**Segundo paso:** Tomar valores de la hoja de datos y reemplazar en la ecuación

$$X_1 = 200 \text{ ppm}$$

$$Y_1 = 0.6$$

$$X_2 = 40 \text{ ppm}$$

$$Y_2 = 1$$

Se hacen los cálculos de los valores antes de reemplazar.

$$\log Y_1 = \log 0.6 = -0.221848$$

$$\log \frac{X_2}{X_1} = \log \frac{40}{200} = -0.698970$$

$$\log X_1 = \log 200 = 2.301029$$

$$\log \frac{Y_2}{Y_1} = \log \frac{1}{0.6} = 0.221848$$

$$\log x = \frac{(\log Y - (-0.221848)) * (-0.698970)}{0.221848} + 2.301029$$

$$\log x = 8.2214308 * \log Y + 4.124935$$

Realizamos la operación inversa de un logaritmo:

$$x = 10^{(8.2214308 \cdot \log Y + 4.124935)}$$

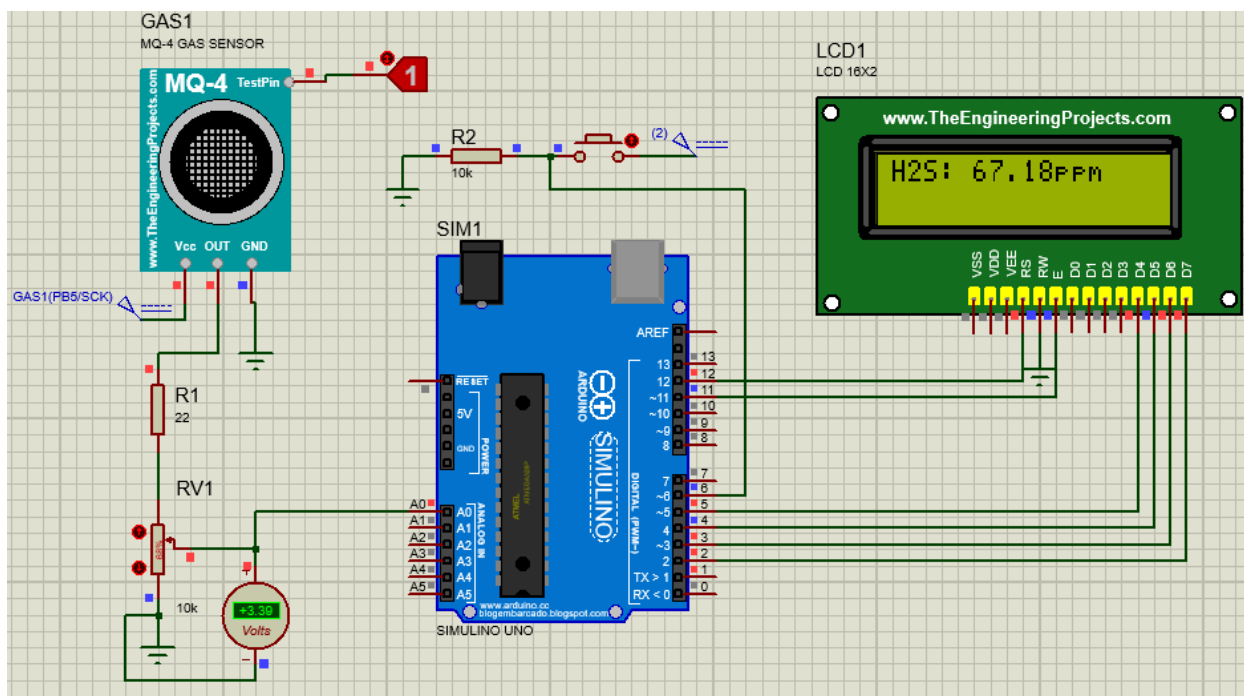
$$x = 10^{(8.2214308 \cdot \log(\frac{R_S}{R_0}) + 4.124935)}$$

De este modo se obtiene la formula final que modeliza las curvas del sensor MQ-136 para H2S. Se debe tener en cuenta que esta ecuación fue calculada con estimaciones visuales de la hoja de datos, adicionalmente, la calibración no se hace con un valor de referencia y por lo tanto los valores visualizados son estimaciones cercanas al valor real (Gerard. G, 2022). El sensor es logarítmico, por lo que la concentración aumenta drásticamente con pequeños cambios de voltaje.

**Nota:** En la simulación no se cuenta con la librería del sensor MQ-136, por lo tanto, se hace uso de un sensor MQ-4 como se proyecta en la figura 27.

**Figura 27**

*Simulación Sensor MQ-136 para Medición de H2S*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de simulación para medición de H2S con sensor MQ-136.

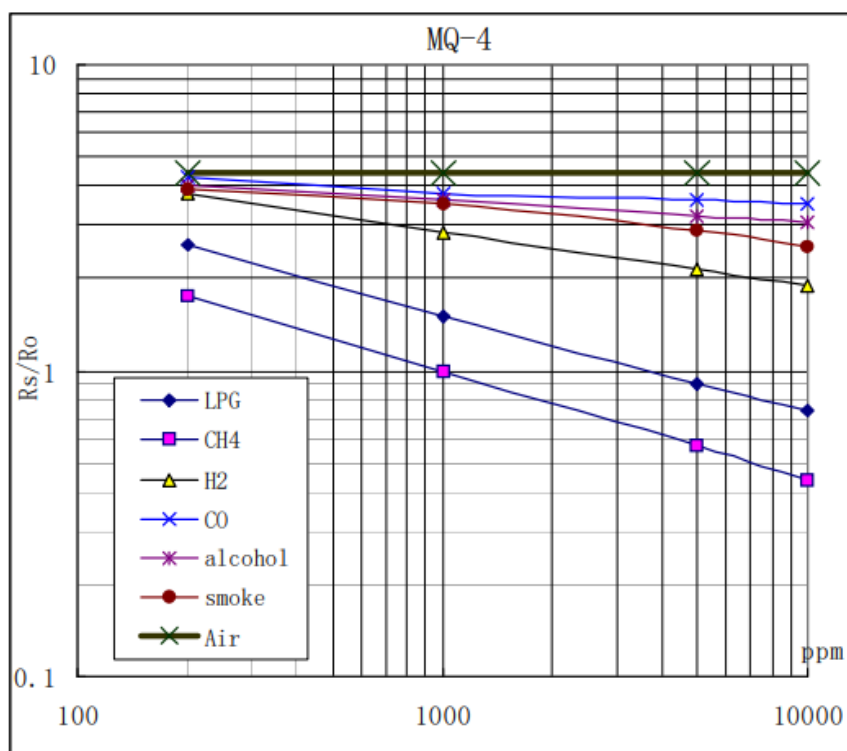
## Cálculos Teóricos para Determinar la Concentración de Metano del Sensor MQ-4

El sensor MQ-4 no mide directamente la concentración de gas en ppm, sino que su resistencia interna  $R_s$  cambia en función de la concentración de gas y  $R_o$  es un valor fijo obtenido en la calibración en aire limpio que se usa como referencia para calcular la relación  $R_s/R_o$ .

Para convertir la relación  $R_s/R_o$  en ppm, se debe usar una ecuación logarítmica basada en la curva de respuesta del sensor como se muestra en la figura 28, donde, la respuesta del sensor para el  $CH_4$  es representado con cuadrados de color lila.

**Figura 28**

*Característica de Sensibilidad del Sensor MQ-4*



*Nota.* Curva característica de sensibilidad o respuesta del sensor MQ-4. Tomado de Hanwei electronics. (s.f). Technical data mq-4 gas sensor. <https://cdn.sparkfun.com/assets/e/f/c/7/d/MQ-4.pdf>

**Primer paso:** Calcular la ecuación logarítmica, ya que los sensores MQ tienen una curva de respuesta que sigue la ecuación de una recta que pasa por dos puntos:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$

Donde:

- $y$  es el valor de  $\log(R_s/R_0)$
- $x$  es el  $\log(\text{ppm})$

Como se desea conocer el valor de “ $x$ ”, se procede a despejar:

$$x = \frac{(y - y_1)(x_2 - x_1)}{y_2 - y_1} + x_1 \rightarrow \log x = \frac{(\log Y - \log Y_1)(\log X_2 - \log X_1)}{\log Y_2 - \log Y_1} + \log X_1$$

Se despeja usando propiedades de logaritmos:

$$\log x = \frac{(\log Y - \log Y_1) \log \frac{X_2}{X_1}}{\log \frac{Y_2}{Y_1}} + \log X_1$$

**Segundo paso:** Tomar valores de la hoja de datos y reemplazar en la ecuación

$$X_1 = 10000 \text{ ppm}$$

$$Y_1 = 0.45$$

$$X_2 = 1000 \text{ ppm}$$

$$Y_2 = 1$$

Se hacen los cálculos de los valores antes de reemplazar.

$$\log Y_1 = \log 0.45 = -0.346787$$

$$\log \frac{X_2}{X_1} = \log \frac{1000}{10000} = -1$$

$$\log X_1 = \log 10000 = 4$$

$$\log \frac{Y_2}{Y_1} = \log \frac{1}{0.45} = 0.346787$$

$$\log x = \frac{(\log Y - (-0.346787)) * -1}{0.346787} + 4 \rightarrow \log x = \frac{-\log Y - 0.346787}{0.346787} + 4$$

$$\log x = \frac{-\log Y}{0.346787} - \frac{0.346787}{0.346787} + 4 \rightarrow \log x = \frac{-\log Y}{0.346787} + 3$$

Realizamos la operación inversa de un logaritmo:

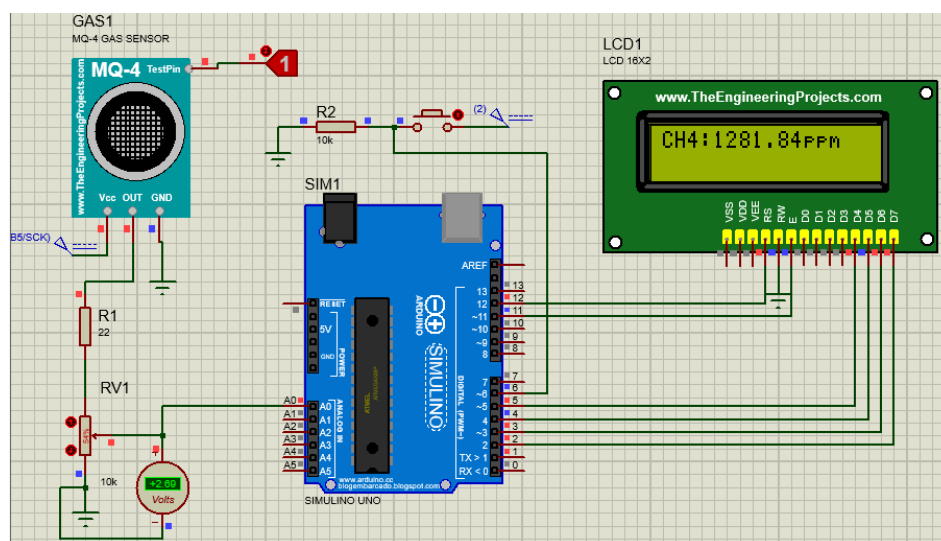
$$x = 10^{\left(\frac{-\log Y}{0.346787} + 3\right)}$$

$$x = 10^{\left(\frac{-\log\left(\frac{R_s}{R_0}\right)}{0.346787} + 3\right)}$$

De este modo se obtiene la formula final que modeliza las curvas del sensor MQ-4 para CH4. Se debe tener en cuenta que esta ecuación fue calculada con estimaciones visuales de la hoja de datos, adicionalmente, la calibración no se hace con un valor de referencia y por lo tanto, los valores visualizados son valores simulados que representan el comportamiento estimado del sensor MQ-4, según sus características eléctricas basadas en su respuesta como se muestra en la figura 29. (Gerard. G, 2022).

**Figura 29**

*Simulación Sensor MQ-4 para Medición De CH4*



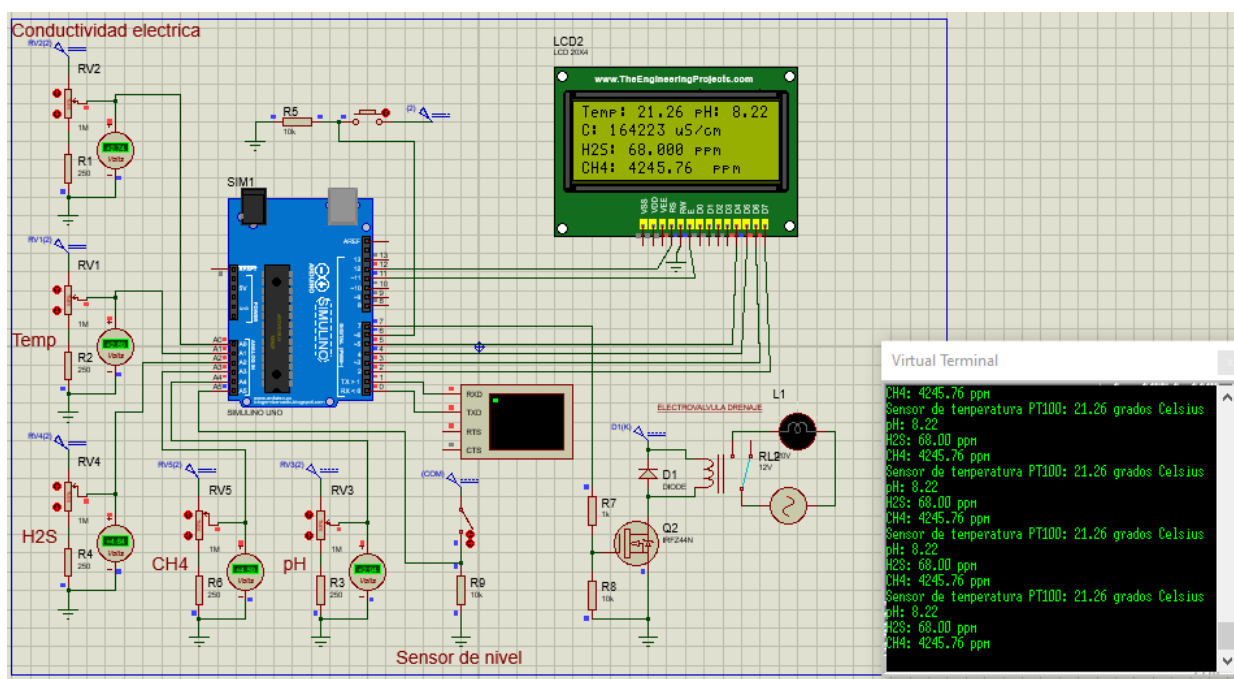
*Nota.* Elaboración propia en Proteus de simulación con sensor MQ-4 para medición de CH4.

## Integración de Sensores y Control de Nivel

Una vez se tienen acondicionadas las señales de cada uno de los sensores se proceden a integrar todos los códigos en uno solo, una vez se encuentra funcionando adecuadamente se hacen las pruebas de funcionamiento en el software de Proteus. Sin embargo, por limitaciones del software y el equipo de cómputo, cada uno de los sensores es simulado por un divisor de voltaje con potenciómetro tal y como se muestra en la figura 30.

**Figura 30**

*Simulación de Sensores y Control de Nivel*



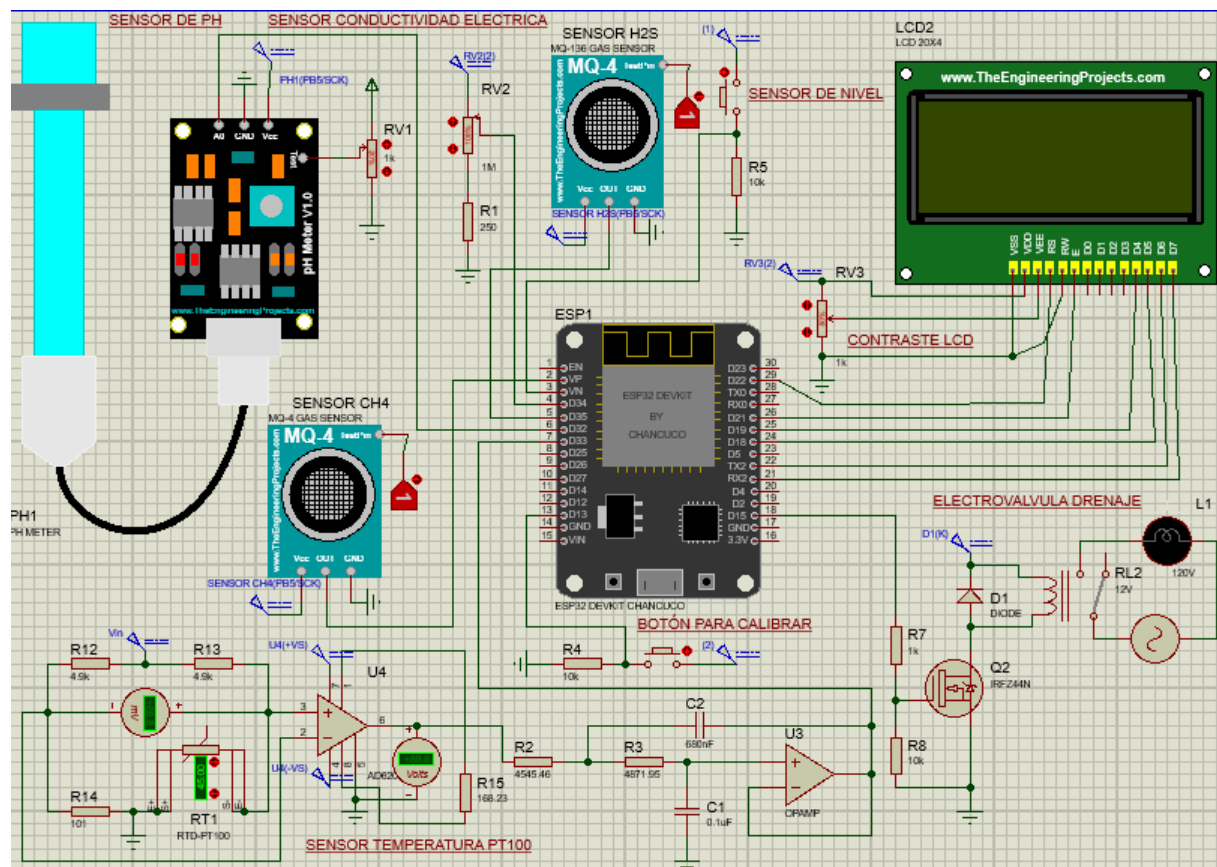
*Nota.* Elaboración propia en Proteus de simulación con sensores y control de nivel.

La figura 31 muestra el diagrama de conexiones elaborado en Proteus, que sirvió como referencia para la implementación física del circuito donde se usa el ESP32, sin embargo, este esquemático solo proporciona la imagen del circuito y sirve como guía para la aplicación real del

sistema y no tiene funcionalidad en el software de Proteus ya que el esquemático del ESP32 no es operable en el software.

**Figura 31**

*Esquema del Circuito con ESP32*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de esquemático del circuito con ESP32 para guía de conexiones.

### Ubicación de Sensores en el Biodigestor

En la figura 32 se presenta el biodigestor tipo Taiwán del CIP Dosquebradas, el cual se tomó como referencia para el desarrollo del prototipo. Esta referencia permitió analizar el diseño

físico característico de este tipo de biodigestor. En la figura 33 se muestra la ubicación estimada de los sensores y del actuador integrados en el sistema.

### Figura 32

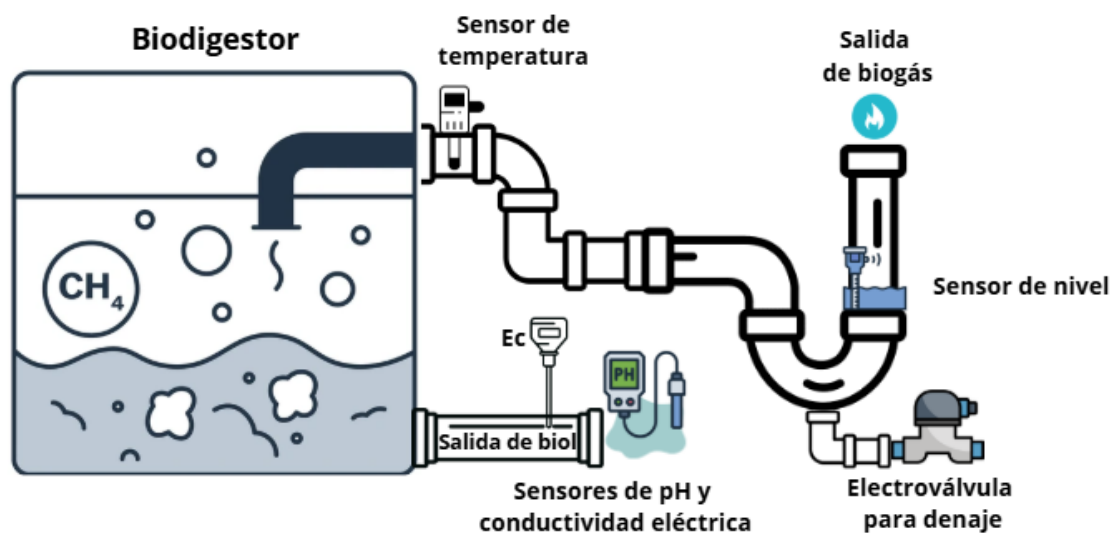
*Biodigestor Tipo Taiwán del CIP Dosquebradas*



*Nota.* Fotografía propia del biodigestor tipo Taiwán ubicado en el CIP Dosquebradas y usado como referencia.

### Figura 33

*Propuesta de Disposición de Sensores en el Biodigestor*



*Nota.* Elaboración propia en Canva de propuesta de disposición de sensores en el biodigestor.

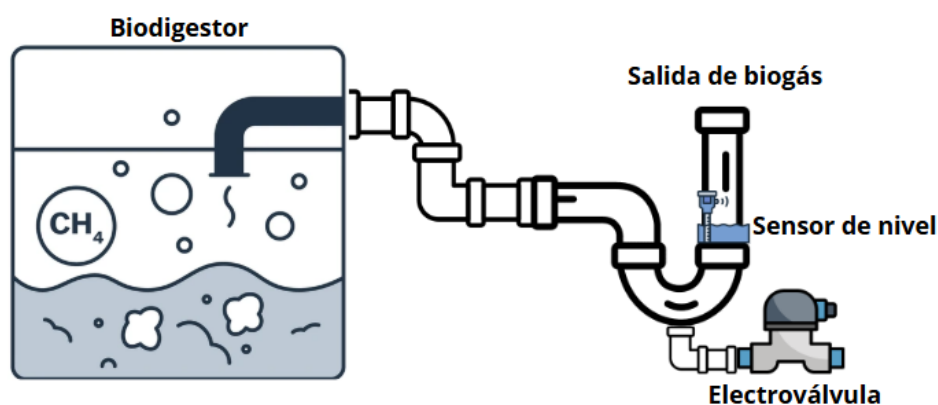
## Prototipo Físico

### Diseño de Implementación para Control de Condensación de Agua

Para el sistema de control de condensación de agua en la tubería de salida del biodigestor, se implementó una electroválvula que se activa automáticamente cuando el nivel de agua en el sifón de la tubería supera el límite máximo. Este mecanismo garantizará el flujo continuo de metano ( $\text{CH}_4$ ), evitando obstrucciones y optimizando el rendimiento del sistema como se muestra en la figura 34.

#### Figura 34

*Implementación de Electroválvula de Manera Física en el Biodigestor*



*Nota.* Elaboración propia en Canva de representación para implementar electroválvula de manera física en el biodigestor.

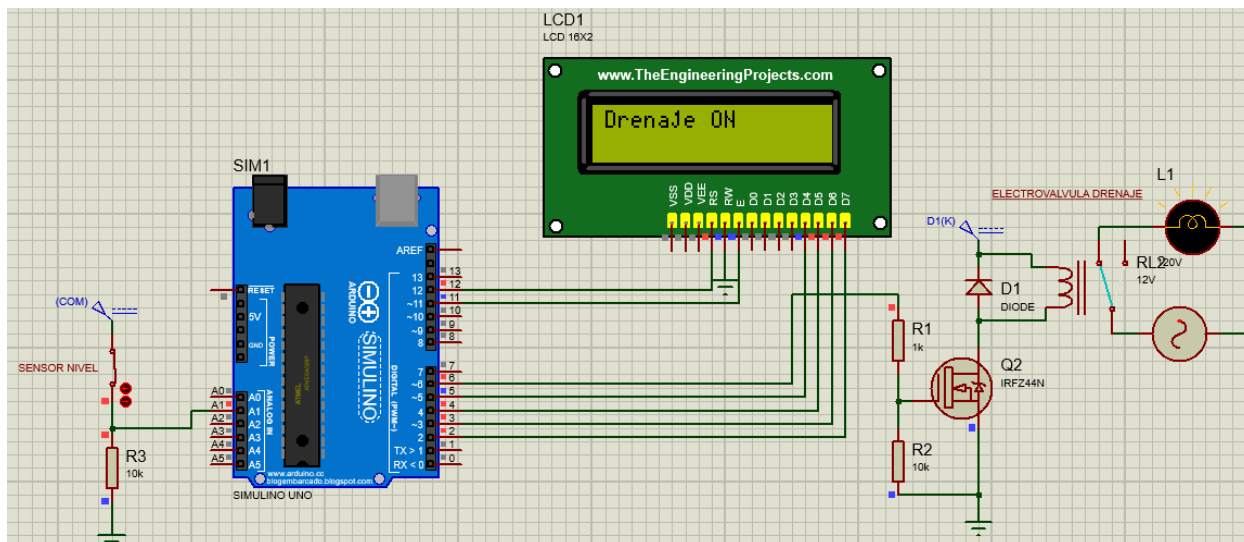
### Simulación y Funcionamiento

La activación de la electroválvula es controlada por un microcontrolador programado en el entorno de desarrollo Arduino IDE. Para validar su correcto funcionamiento, primero se realiza una simulación en la versión de prueba del software Proteus. En dicha simulación, se ha implementado un circuito de potencia que permite la activación de la electroválvula cuando el

sensor detecta un nivel de agua elevado y envía una señal de 5V al microcontrolador, tal como se ilustra en la figura 35.

**Figura 35**

*Simulación de Drenaje Activo*



*Nota.* Elaboración propia en Proteus de simulación de drenaje activo.

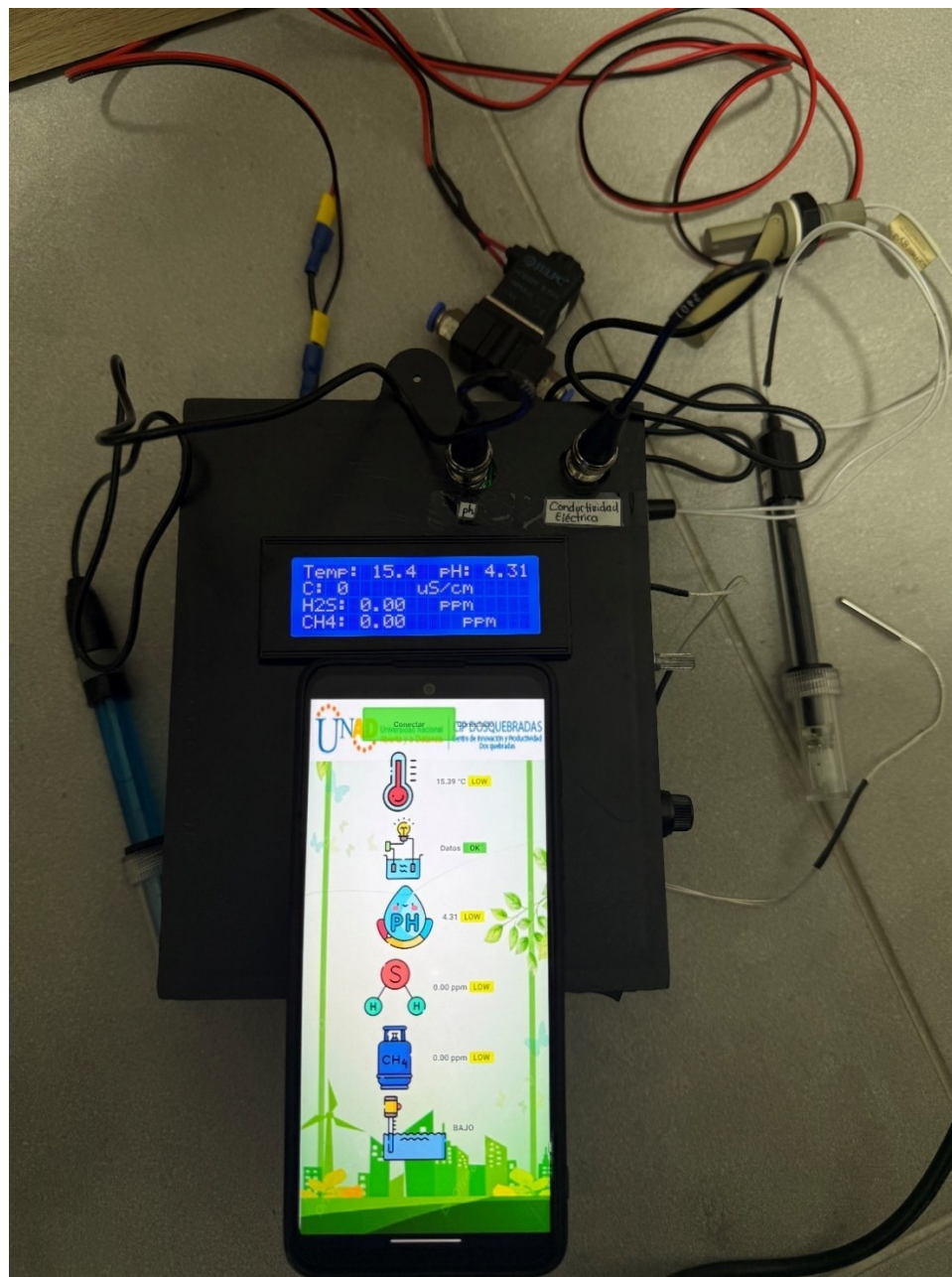
Una vez planteadas y ejecutadas las simulaciones necesarias para validar el funcionamiento del sistema, se procedió con la fabricación y montaje del prototipo físico. En esta etapa, se diseñaron las placas de circuito impreso (PCB), optimizadas para garantizar conexiones eficientes, seguras y ordenadas entre los distintos componentes del sistema.

Posteriormente, se integraron todos los sensores, el sistema de adquisición, el control del condensado de agua y la interfaz gráfica, una vez verificada la correcta conexión de todos los elementos, el sistema se ensambló dentro de una caja plástica resistente, diseñada para proteger los componentes electrónicos y facilitar su manipulación y transporte. En la figura 36 se presenta el prototipo completamente ensamblado, listo para su instalación y operación en un biodigestor

tipo Taiwán, en la figura 37, 38 y 39 se muestra de cerca el prototipo y se pueden observar las etiquetas de conexión para cada sensor o actuador.

### Figura 36

#### *Prototipo Físico Integrado*



*Nota.* Fotografía propia del prototipo físico realizando mediciones y mostrándolas en el celular por medio de la aplicación creada con APP Inventor.

**Figura 37***Vista Frontal del Prototipo Físico Integrado*

*Nota.* Fotografía propia de la vista frontal del prototipo físico terminado.

**Figura 38***Vista Lateral Derecha del Prototipo Físico Integrado*

*Nota.* Fotografía propia de la vista lateral derecha del prototipo físico terminado.

**Figura 39**

*Vista Superior del Prototipo Físico Integrado*



*Nota.* Fotografía propia de la vista superior del prototipo físico terminado.

## **Funcionamiento General del Sistema**

En este capítulo se validó el funcionamiento general del sistema mediante la comparación directa de las mediciones obtenidas para las variables de pH, conductividad eléctrica, temperatura y metano, utilizando patrones de referencia o soluciones estándar, con el fin de comparar la precisión y confiabilidad de los datos registrados por el prototipo.

Para ello se estableció como criterio de aceptación un error relativo inferior al 10%, considerando las especificaciones técnicas de los sensores utilizados y el propósito del sistema, orientado a la supervisión básica de variables en un entorno rural. En este contexto, este margen de error permite detectar desviaciones relevantes sin requerir instrumentación industrial de alta precisión, lo cual se ajusta a los objetivos de bajo costo y accesibilidad del proyecto.

### **Validación de Funcionamiento para el Ph**

En la tabla 7 se registran los datos obtenidos de pH de la leche deslactosada, la cual suele tener un pH entre 6,6 y 6,8 aproximadamente. (Hanna Instruments, s.f).

**Tabla 7***Validación de Funcionamiento de Variable pH en Leche Deslactosada*

N° Medición	Valor Patrón Teórico (pH)	Valor Medido (pH)	Error Absoluto	Error Relativo (%)	Resultado de validación
1	6,70	6,430	0,270	4,030%	Aceptable
2	6,70	6,470	0,230	3,433%	Aceptable
3	6,70	6,520	0,180	2,687%	Aceptable
4	6,70	6,660	0,040	0,597%	Aceptable
5	6,70	6,480	0,220	3,284%	Aceptable
6	6,70	6,600	0,100	1,493%	Aceptable
7	6,70	6,840	0,140	2,090%	Aceptable
8	6,70	6,750	0,050	0,746%	Aceptable
9	6,70	6,730	0,030	0,448%	Aceptable
10	6,70	6,780	0,080	1,194%	Aceptable
Promedio	6,70	6,626	0,134	2,000%	Aceptable

*Nota.* Toma de medida usando leche deslactosada como patrón teórico de referencia.

**Figura 40***Toma de Medida pH en Leche Deslactosada*

*Nota.* Fotografía propia de medida tomada para pH en leche deslactosada.

En la tabla 8 se registran los datos obtenidos de pH de la Coca Cola, la cual suele tener un pH entre 2,45 y 2,5 aproximadamente. (Merck, s.f).

**Tabla 8***Validación de Funcionamiento de la Variable pH en Coca Cola*

Nº Medición	Valor Patrón Teórico (pH)	Valor Medido (pH)	Error Absoluto	Error Relativo (%)	Resultado de validación
1	2,45	2,530	0,080	3,265%	Aceptable
2	2,45	2,500	0,050	2,041%	Aceptable
3	2,45	2,510	0,060	2,449%	Aceptable
4	2,45	2,480	0,030	1,224%	Aceptable
5	2,45	2,450	0,000	0,000%	Aceptable
6	2,45	2,490	0,040	1,633%	Aceptable
7	2,45	2,460	0,010	0,408%	Aceptable
8	2,45	2,440	0,010	0,408%	Aceptable
9	2,45	2,420	0,030	1,224%	Aceptable
10	2,45	2,470	0,020	0,816%	Aceptable
Promedio	2,45	2,475	0,033	1,347%	Aceptable

*Nota.* Toma de medida usando Coca Cola como patrón teórico de referencia.

**Figura 41***Toma de Medida pH En Coca Cola*

*Nota.* Fotografía propia de medida tomada para pH en Coca Cola.

## Validación de Funcionamiento para la Temperatura

En la Tabla 9 se presenta una comparación directa utilizando un termómetro Kex Germany modelo RT-803E, el cual cuenta con certificado de calibración emitido por un laboratorio acreditado por ONAC. Este certificado se incluye como anexo al presente documento, lo que permite validar con alto grado de confiabilidad el funcionamiento del prototipo en la medición de la variable temperatura.

**Tabla 9**

*Validación de Funcionamiento de la Variable Temperatura*

N° Medición	Valor Patrón (°C)	Valor Medido (°C)	Error Absoluto	Error Relativo (%)	Resultado de validación
1	7,40	7,500	0,100	1,351%	Aceptable
2	7,40	7,400	0,000	0,000%	Aceptable
3	7,40	7,200	0,200	2,703%	Aceptable
4	7,40	6,900	0,500	6,757%	Aceptable
5	7,40	6,700	0,700	9,459%	Aceptable
6	36,90	34,500	2,400	6,504%	Aceptable
7	36,90	36,700	0,200	0,542%	Aceptable
8	39,50	35,600	3,900	9,873%	Aceptable
9	39,70	35,800	3,900	9,824%	Aceptable
10	41,40	38,200	3,200	7,729%	Aceptable
Promedio	23,14	21,650	1,510	5,474%	Aceptable

*Nota.* Toma de medida sumergiendo ambos sensores en un recipiente con agua fría y agua tibia.

**Figura 42***Toma de Medida Temperatura*

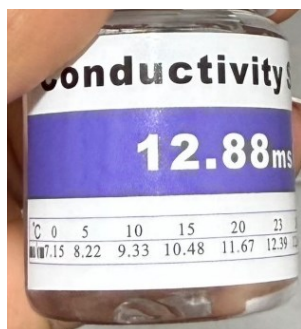
*Nota.* Fotografía propia de medida tomada para temperatura.

### **Validación de Funcionamiento para la Conductividad Eléctrica**

En la Tabla 10 se presenta la validación del funcionamiento del sensor de conductividad eléctrica, utilizando una solución buffer de referencia cuyo valor varía en función de la temperatura tal y como se muestra en la figura 43. Para ello, se correlacionan los valores especificados por la solución con la temperatura registrada, determinando así los valores de conductividad correspondientes para validar la precisión del sensor.

**Figura 43**

*Solución de Referencia Para Medir Conductividad Eléctrica*



*Nota.* Fotografía propia de la solución de referencia para calibrar de sensor conductividad eléctrica.

**Tabla 10**

*Validación de Funcionamiento de la Variable Conductividad Eléctrica*

Nº Medición	Valor Patrón (ms/cm)	Valor Medido (ms/cm)	Error Absoluto	Error Relativo (%)	Resultado de validación
1	10,46	9,434	1,026	9,809%	Aceptable
2	10,48	10,473	0,007	0,067%	Aceptable
3	10,48	9,530	0,950	9,065%	Aceptable
4	10,53	11,544	1,014	9,630%	Aceptable
5	10,27	10,277	0,007	0,068%	Aceptable
6	10,43	9,511	0,919	8,811%	Aceptable
7	10,46	9,511	0,949	9,073%	Aceptable
8	10,27	9,362	0,908	8,841%	Aceptable
9	10,23	10,277	0,047	0,459%	Aceptable
10	10,36	9,936	0,424	4,093%	Aceptable
Promedio	10,40	9,986	0,625	5,992%	Aceptable

*Nota.* Toma de medida sumergiendo el sensor de EC y el sensor de temperatura en la solución de referencia.

## Figura 44

### *Toma de Medida Conductividad Eléctrica*



*Nota.* Fotografía propia de la medida tomada con sensor de conductividad eléctrica.

## Validación de Funcionamiento para Concentración de Metano

Para la validación del funcionamiento del sensor MQ-4 no se contó con un patrón de referencia certificado. Sin embargo, estos sensores están diseñados principalmente para la detección de metano ( $\text{CH}_4$ ), aunque también presentan sensibilidad frente a otros gases combustibles como butano, propano, hidrógeno y alcoholes. Por esta razón, se utilizó un encendedor como fuente de gas para probar la respuesta del sensor. Al acercar el encendedor (sin activar la llama), el sensor detecta la presencia de butano, generando una lectura en "ppm". Es importante resaltar que esta lectura no corresponde a una concentración real de  $\text{CH}_4$ , sino a la respuesta cruzada del sensor ante el butano, como se evidencia en la figura 45.

**Figura 45**

*Toma de Medida Gas Metano*



*Nota.* Fotografía propia de la toma de medida para gas metano.

## **Metodología**

La metodología para este proyecto es una investigación aplicada, con enfoque experimental, orientada al diseño e implementación de un sistema de instrumentación electrónica para un biodigestor tipo Taiwán.

### **Tipo de Investigación**

El estudio es de tipo experimental debido a que se realizará un prototipo enfocado al control y monitoreo de un biodigestor. Se aplicará una metodología exploratoria y descriptiva para analizar las variables del sistema y evaluar el desempeño del sistema de instrumentación propuesto.

### **Fases de la Investigación**

Para el sistema de monitoreo y control de un biodigestor tipo Taiwán se emplea una metodología en diferentes fases que abarcan desde la recolección de datos hasta la implementación del prototipo. Cada fase tiene una serie de actividades específicas que permiten avanzar de manera organizada y controlada.

#### **1. Análisis de requisitos y selección de dispositivos**

La primera fase consiste en el análisis de los parámetros críticos que deben ser monitoreados dentro del biodigestor. Se lleva a cabo una revisión de literatura técnica para identificar los rangos óptimos de funcionamiento de las variables más relevantes: pH, temperatura, concentración de metano (CH<sub>4</sub>), conductividad eléctrica y sulfuro de hidrógeno. Se seleccionan los dispositivos de medición más adecuados para cada uno de estos parámetros en función de su precisión, costo y disponibilidad. Además, se evalúa el tipo de sensor que se utilizará para el control de la condensación de agua, asegurando que el sistema de drenaje automático sea eficiente.

## 2. Diseño del sistema de monitoreo y control

En esta fase se desarrolla el diseño detallado del sistema de monitoreo. Se selecciona la plataforma electrónica para la adquisición de datos, que en este caso es la tarjeta de adquisición de datos ESP32, por su capacidad para comunicarse de forma remota y gestionar múltiples sensores. También, se realiza el diseño del sistema de comunicación de los datos hacia la aplicación de visualización con la herramienta APP Inventor. La interfaz de usuario se diseñará para mostrar las variables críticas del prototipo.

## 3. Implementación de sensores y sistema de adquisición de datos

En esta tercera fase, se procede a la implementación de los sensores de pH, temperatura, metano (CH<sub>4</sub>), conductividad eléctrica y sulfuro de hidrógeno. Los sensores serán conectados a la tarjeta ESP32, y esta se encarga de la adquisición de datos. Se programa la placa para que reciba las señales de los sensores y las transmita a la aplicación de visualización.

Se integra el sistema de control de la condensación de agua, configurando el sistema de drenaje automático. El control se basa en la medición de la cantidad de agua presente en las tuberías, lo que activa o desactiva el drenaje según sea necesario.

## 4. Desarrollo de la interfaz de visualización y alarma

En esta etapa se realiza el desarrollo de la interfaz de usuario, utilizando APP Inventor para crear una plataforma accesible desde dispositivos móviles y/o computadores. La interfaz presenta los valores de las variables críticas de un biodigestor, permitiendo una visualización clara y sencilla de los parámetros más importantes.

Se implementan alertas automáticas que notifican cuando alguna de las variables no está en su rango óptimo de funcionamiento.

## 5. Pruebas y validación del sistema

Luego de que sea implementado el prototipo, se realizan pruebas de funcionamiento para validar su funcionalidad. En esta fase se simulan diferentes condiciones operativas del biodigestor para evaluar la precisión de los sensores y la capacidad de respuesta del sistema de control de condensación de agua. Se verifica la correcta visualización de las variables y la efectividad de las alarmas en caso de que los parámetros se desvíen de los rangos establecidos.

#### 6. Evaluación final del prototipo

Se realizan ajustes en el prototipo e interfaz de usuario por medio de una validación de funcionamiento por comparación directa con valores de referencia o equipos patrón, para así garantizar que el sistema funcione de manera óptima y eficiente.

#### **Caso de Estudio**

El presente trabajo tiene como caso de estudio un biodigestor tipo Taiwán, utilizado para la generación de biogás en entornos académicos y experimentales. La implementación física del sistema de instrumentación, planteada como trabajo futuro, se proyecta realizar en el biodigestor del Centro de Investigación y Producción (CIP) de Dosquebradas, seleccionado por su accesibilidad, disponibilidad de datos y relevancia para la validación de la propuesta.

## Resultados

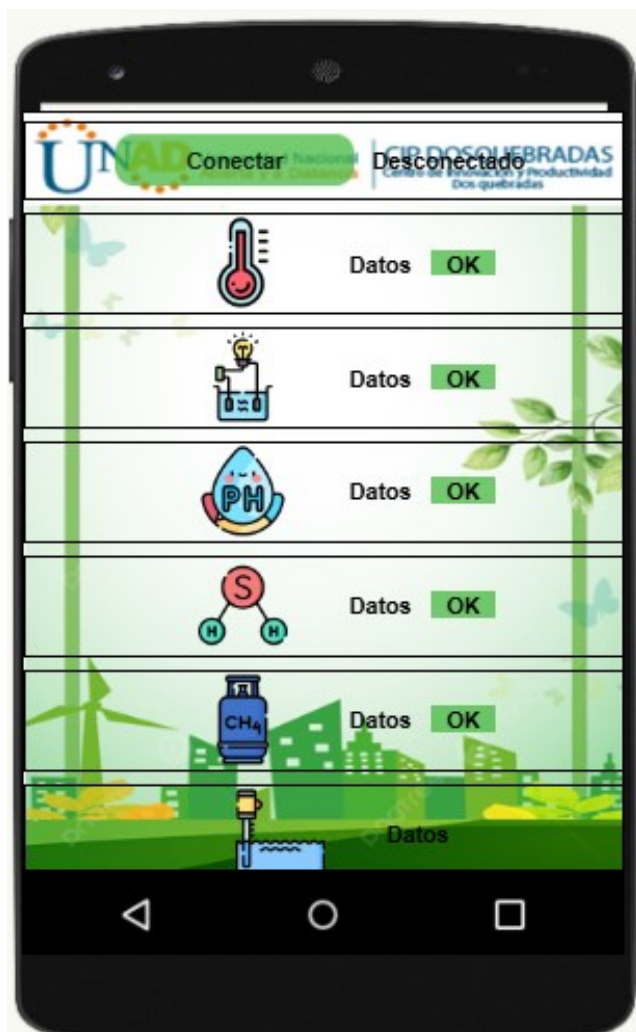
### Interfaz Gráfica

Una vez finalizada y verificada la simulación del sistema, se procede al desarrollo de la aplicación móvil. Para este proyecto se utiliza App Inventor, una plataforma de desarrollo creada por el MIT (Massachusetts Institute of Technology), enfocada en la creación de aplicaciones para dispositivos Android de manera sencilla y visual, sin requerir conocimientos avanzados de programación. Además, permite una conexión rápida y eficiente vía Wi-Fi con la tarjeta de desarrollo ESP32.

Se diseñó una interfaz gráfica intuitiva y de fácil interpretación, en la cual se muestran en tiempo real los valores obtenidos por cada uno de los sensores. Adicionalmente, la interfaz indica si alguno de los parámetros ha salido del rango óptimo de funcionamiento, tal como se observa en la figura 46.

**Figura 46**

*Interfaz Gráfica Creada con APP Inventor*



*Nota.* Elaboración propia de interfaz gráfica creada con APP inventor.

Para el uso de la aplicación, el usuario debe presionar el botón Conectar, lo cual establece la comunicación entre el dispositivo móvil y el módulo ESP32. Una vez establecida la conexión, el valor medido por el sensor se visualizará en el campo Datos. Adicionalmente, el estado del parámetro se indicará mediante un texto y un código de color:

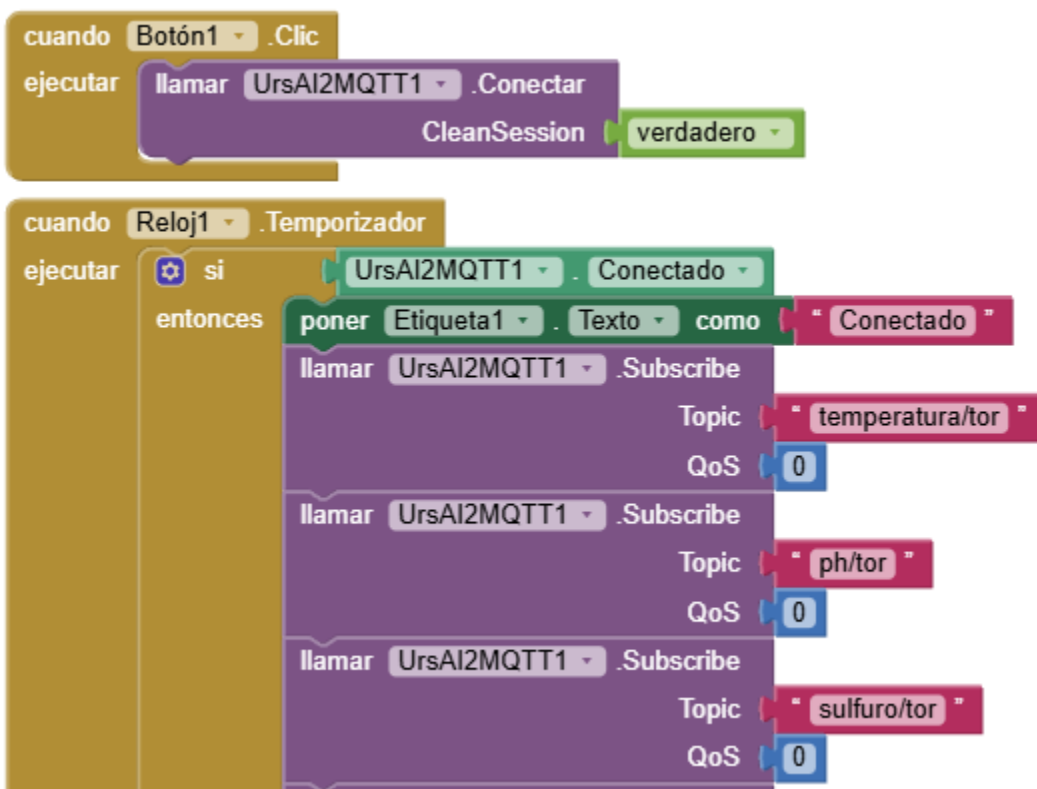
- **OK** (color verde), cuando el valor se encuentra dentro del rango óptimo de operación.
- **LOW** (color amarillo), cuando el valor está por debajo del rango establecido.
- **HIGH** (color rojo), cuando el valor excede el límite superior del rango permitido.

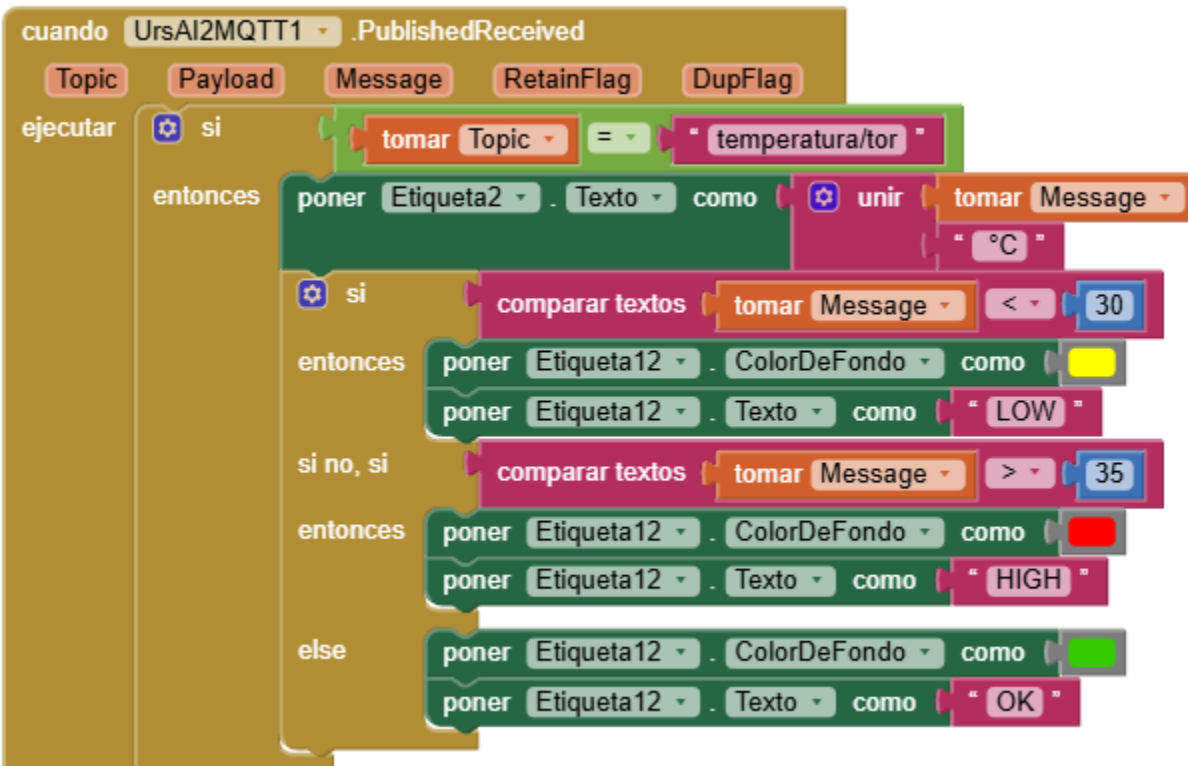
## Diagrama de Bloques de App Inventor

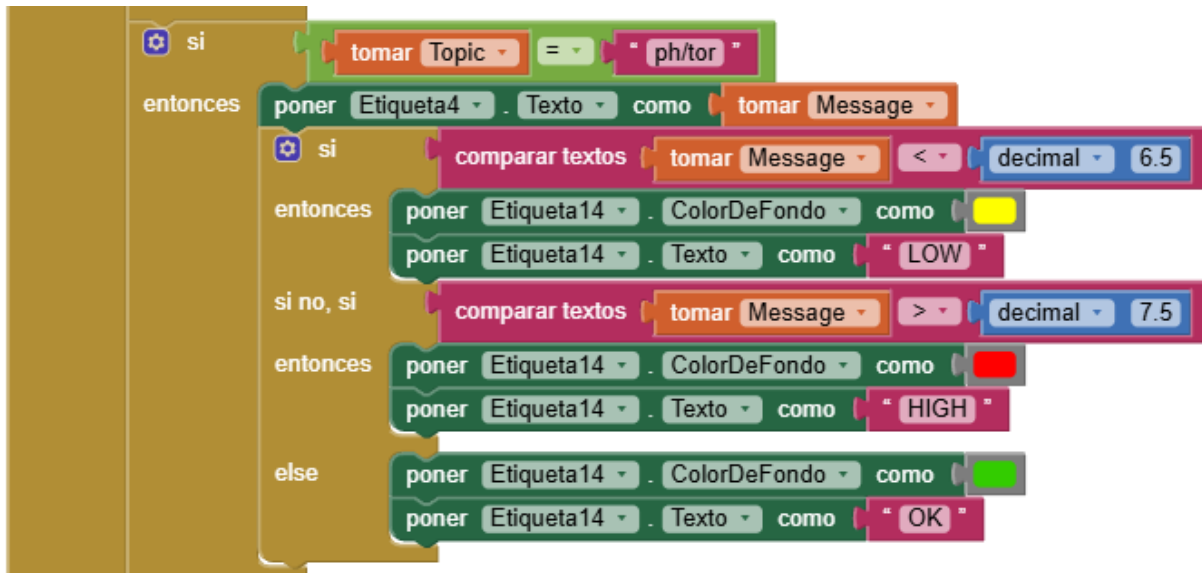
Descarga de la aplicación y código en este [enlace](#).

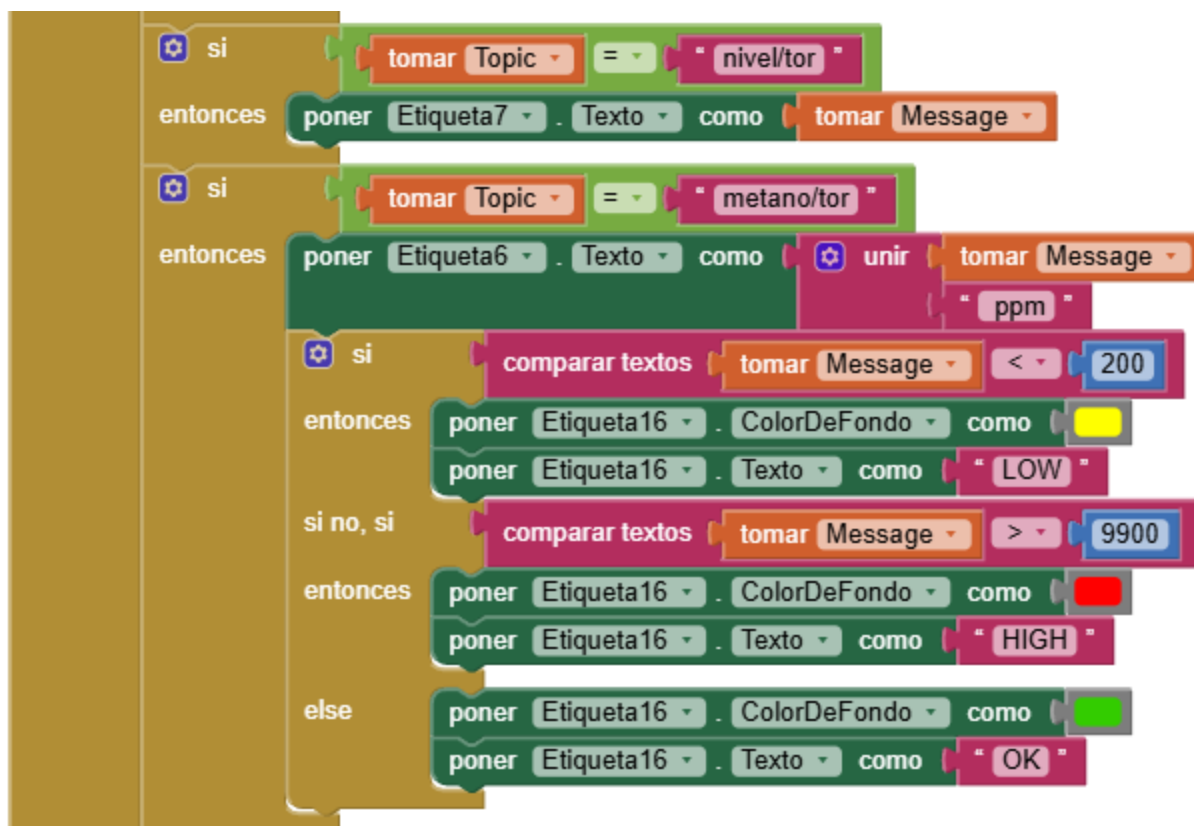
**Figura 47**

*Diagrama de Bloques Creado con APP Inventor*









*Nota.* Elaboración propia del diagrama de bloques con APP Inventor para crear interfaz gráfica.

## **Implementación Física**

Una vez realizado el ajuste del código, se validó que la simulación en el software Proteus replicara de manera precisa el comportamiento del ESP32, considerando las diferencias fundamentales con respecto al Arduino UNO utilizado en las simulaciones iniciales, tales como la arquitectura de 32 bits y el voltaje de operación de 3.3 V.

Con la simulación validada, se procedió a la implementación del protocolo de conexión inalámbrica Wi-Fi, utilizando para ello el protocolo MQTT. Este protocolo de mensajería, caracterizado por su bajo peso y alta eficiencia, resulta especialmente adecuado para aplicaciones en redes de baja velocidad o en dispositivos de recursos limitados, como sensores o microcontroladores (AWS, s.f.).

Finalmente, se verificó el correcto funcionamiento de la tarjeta de desarrollo ESP32 mediante la carga del código correspondiente y el uso de potenciómetros que simulan las señales generadas por los distintos sensores. Adicionalmente, se comprueba el funcionamiento de APP Inventor una vez instalada la APK en el celular como se observa en la figura 48.

**Figura 48**

*Implementación Física para Prueba del Código*



*Nota.* Fotografía propia de implementación física para pruebas del código elaborado.

Tras la verificación exhaustiva de la operatividad del firmware implementado, se ha realizado la instalación física de los sensores. Este proceso se fundamentó en los parámetros de

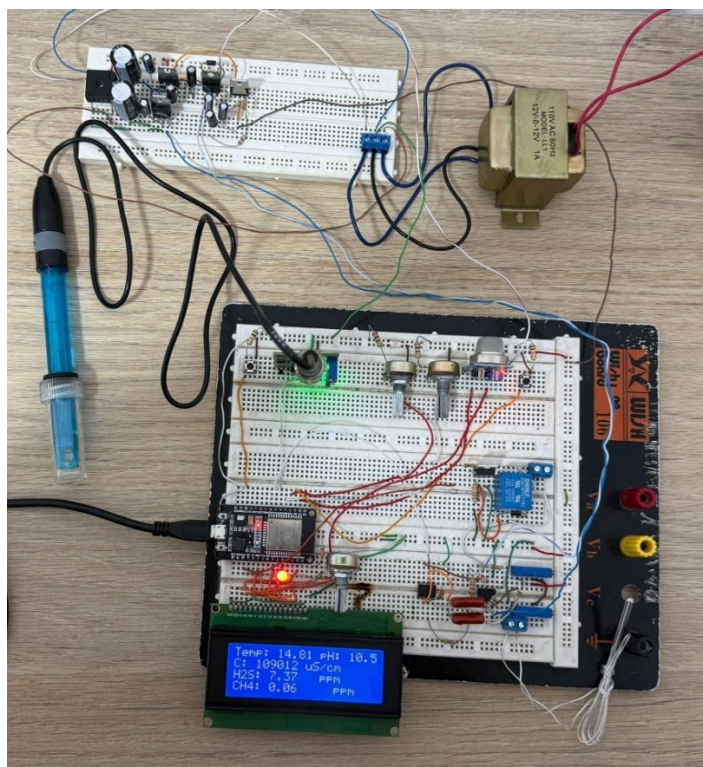
diseño y los resultados obtenidos en el Capítulo II, donde se detallan las simulaciones efectuadas en el entorno de prueba del software Proteus.

La Figura 49 ilustra el despliegue del sensor de temperatura (PT100), el sensor de pH (SEN0161) y el sensor de gas metano (MQ4). Los datos arrojados por estos dispositivos evidencian una correlación significativa con las condiciones ambientales monitoreadas, validando su correcta integración y funcionalidad.

En cuanto al sensor de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) su adquisición en el mercado local no ha sido posible. En consecuencia, tal como se aprecia en la figura 49, la emulación de su señal se mantiene mediante la utilización de un potenciómetro calibrado. Esta solución transitoria permite la continuidad de las pruebas de integración del prototipo.

### Figura 49

#### *Implementación Física del Prototipo*

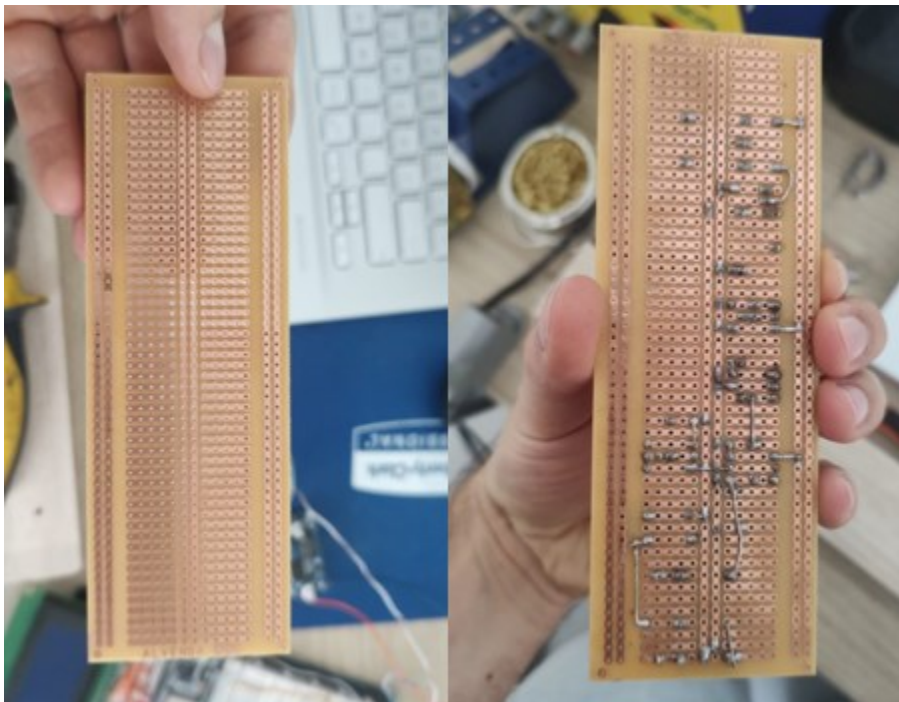


*Nota.* Fotografía propia de la implementación física del prototipo en protoboard.

Una vez validado el correcto funcionamiento de cada uno de los sensores, así como del circuito en general incluida la fuente de voltaje simétrica, se procedió con la instalación de los componentes electrónicos sobre las placas de baquelita. En la figura 50 se observa, a la izquierda, la baquelita en su estado original, y a la derecha, el resultado final tras la soldadura de los componentes con estaño.

### **Figura 50**

*Baquelita Tipo Protoboard para Creación de Circuito*

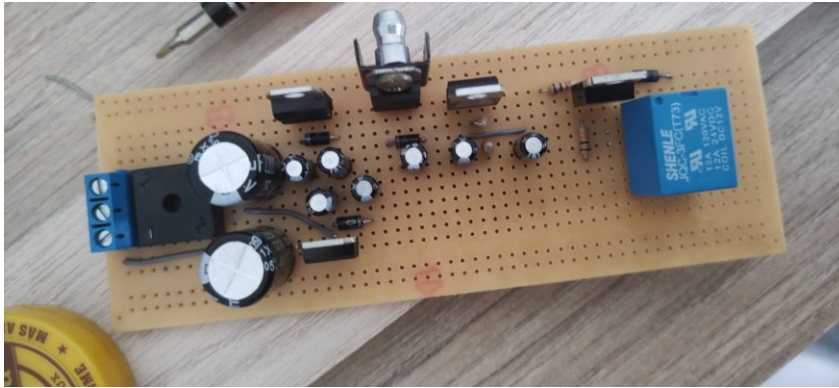


*Nota.* Fotografía de baquelita tipo protoboard usada para la creación del circuito durante proceso de soldadura de componentes.

En la figura 51 se puede apreciar el resultado tras soldar los componentes, en la figura 52 se muestran las pruebas realizadas para probar el correcto ensamble de los componentes en el circuito impreso.

**Figura 51**

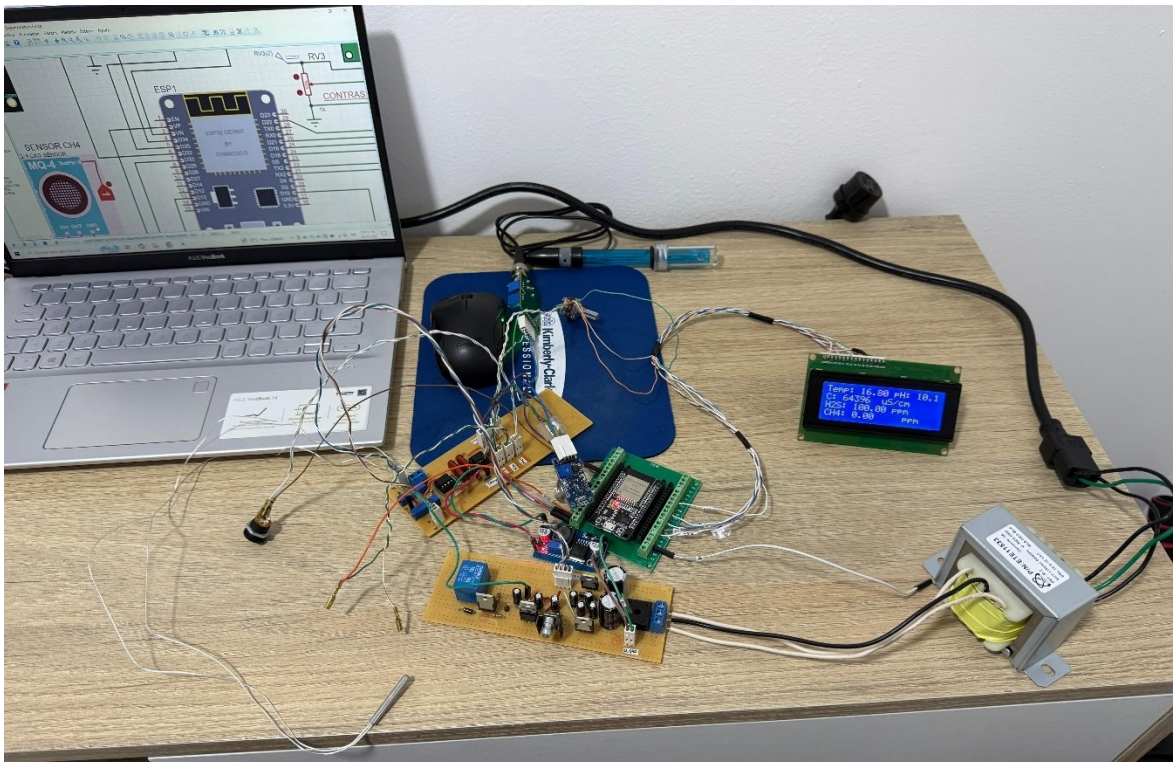
*Resultados Tras Soldadura de Componentes*



*Nota.* Fotografía propia de los resultados tras soldar componentes en baquelita.

**Figura 52**

*Prueba de Funcionamiento del Prototipo*

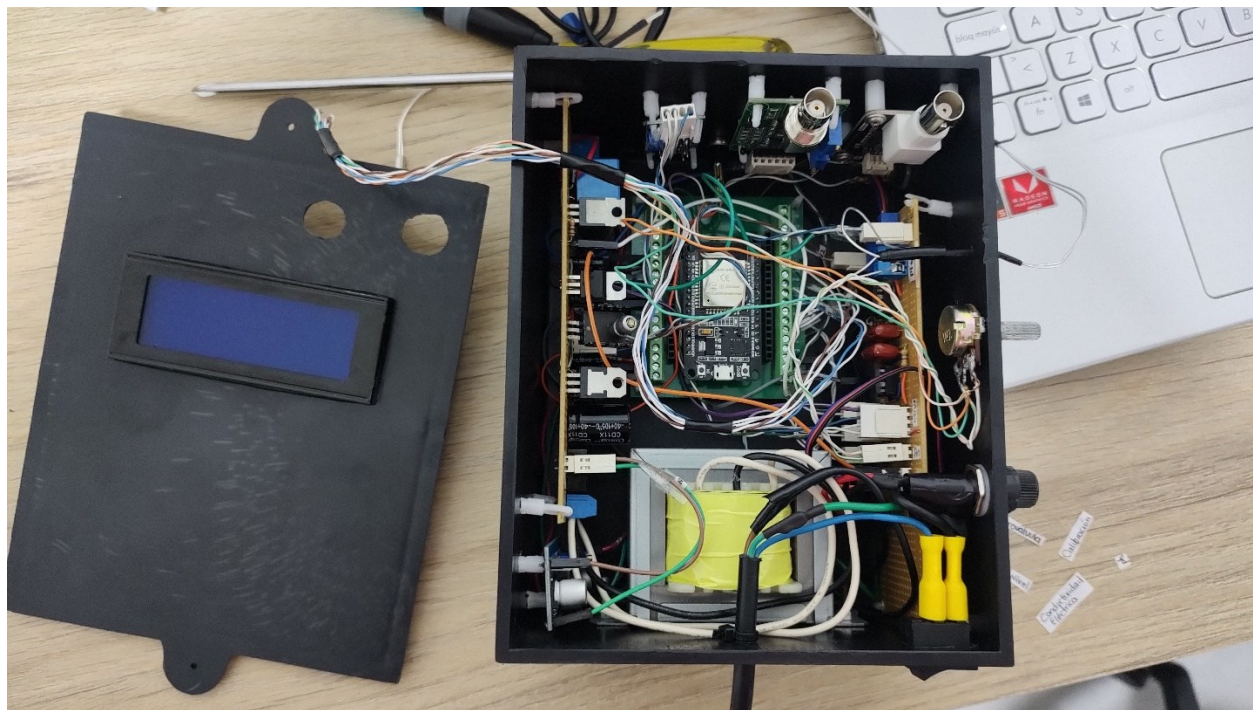


*Nota.* Fotografía propia de prueba de funcionamiento del prototipo.

El paso final en la construcción del prototipo consiste en la instalación de todos los componentes en una caja plástica con dimensiones de 18,5 cm × 15 cm × 8,5 cm, tal como se muestra en la figura 53.

### Figura 53

#### *Construcción de Prototipo*



*Nota.* Fotografía propia del ensamble al prototipo terminado.

Una vez realizada la construcción del prototipo como se muestra en la figura 53, se procede a realizar la calibración del sensor de conductividad eléctrica, en la figura 54 se puede apreciar el proceso de calibración y el valor obtenido para la solución de 12.88 ms/cm para una temperatura de 13.4 °C. Adicionalmente, se puede observar el funcionamiento del sensor de pH, el cual obtiene un valor de 7.68 para el agua del grifo.

**Figura 54**

*Calibración para Sensor de Conductividad Eléctrica*

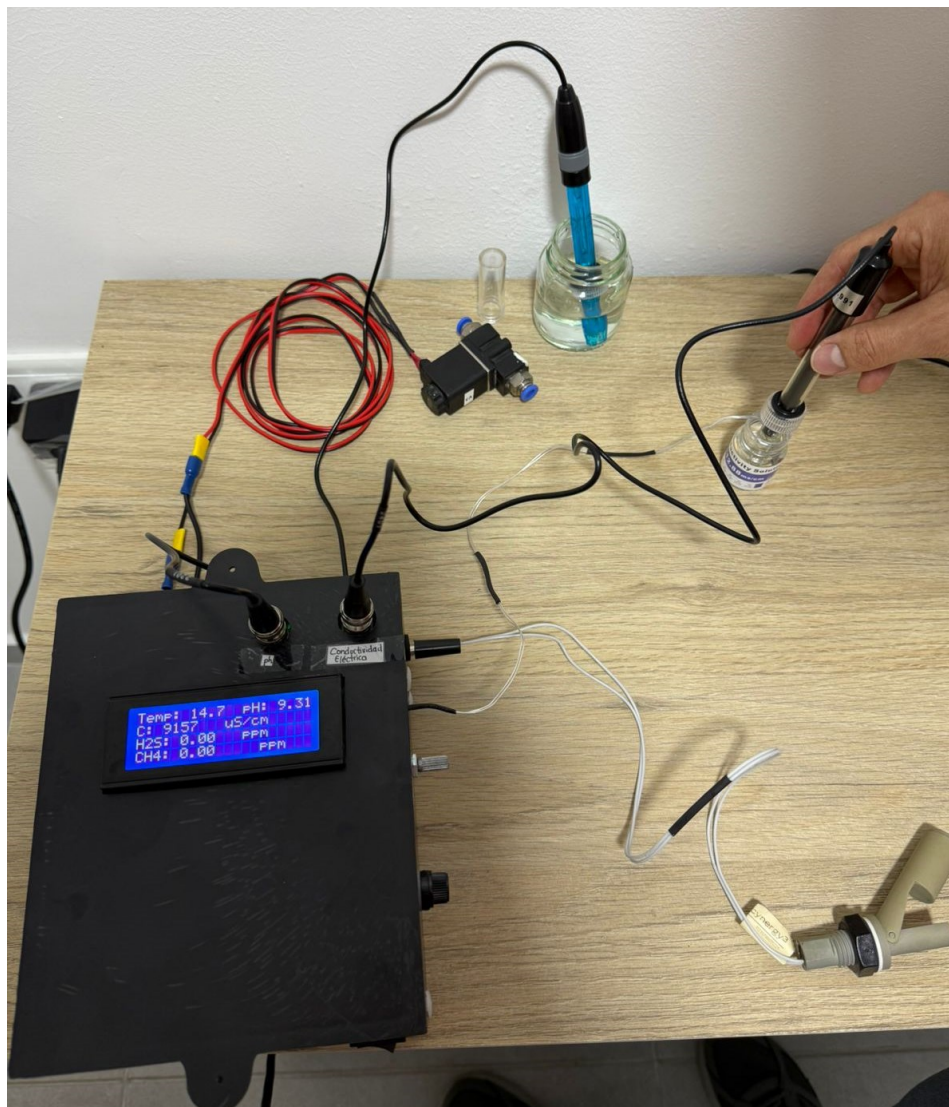


*Nota.* Fotografía propia del procedimiento de calibración para sensor de conductividad eléctrica.

Finalizado el proceso de ensamble y calibración de sensores, se obtiene un prototipo completamente funcional y listo para probar en un biodigestor tal y como se puede apreciar en la figura 55.

### Figura 55

*Prototipo Terminado*



*Nota.* Fotografía propia del prototipo terminado y funcionando correctamente.

## Conclusiones

1. El análisis comparativo de los sensores más comunes en el mercado para la medición de variables en procesos de biodigestión (pH, temperatura, conductividad eléctrica, sulfuro de hidrógeno, concentración de metano y nivel de agua) permitió seleccionar dispositivos de bajo costo, fácil adquisición y compatibilidad con sistemas de microcontroladores como Arduino y ESP32. La elección de estos sensores permitió desarrollar un prototipo funcional sin comprometer la precisión en la medición de parámetros críticos. Los sensores elegidos cumplen con los rangos de operación requeridos para el funcionamiento del biodigestor tipo Taiwán, considerando las condiciones óptimas de cada variable. Este prototipo representa un punto de partida sólido para la implementación, control y monitoreo del sistema, ajustado a las condiciones reales de operación y al presupuesto disponible.

2. Se desarrolló de manera detallada el diseño teórico y la simulación de un sistema automatizado de medición para variables críticas en biodigestores, integrando sensores con estrategias de acondicionamiento y procesamiento de señal. A partir del análisis individual de cada sensor, se implementaron algoritmos de filtrado y promediado, se diseñaron circuitos específicos para acondicionar señales analógicas, como el uso de puente Wheatstone y amplificadores de instrumentación. También, se abordó el diseño de filtros activos tipo Tschebyscheff para minimizar el ruido, y se integraron convertidores de voltaje a corriente, lo cual permite adaptar los sensores industriales que trabajan en lazo de corriente de 4–20 mA a microcontroladores como el ESP32 o Arduino. Para finalizar, se integraron todos los sensores en un único sistema, simulando su funcionamiento en Proteus y empleando divisores de voltaje para representar el comportamiento de cada variable ante las restricciones del software. Este proceso

permitió verificar la lógica de control y visualización de datos, estableciendo una base sólida para la futura implementación física del sistema.

3. Se diseñó un sistema automatizado para el drenaje del agua condensada en la tubería de salida del biodigestor, utilizando una electroválvula controlada por un microcontrolador. Este sistema permite mantener el flujo continuo de metano al evitar obstrucciones causadas por acumulación de líquido. La validación del funcionamiento electrónico se realizó mediante simulación en Proteus, confirmando que la electroválvula se activa correctamente al detectar niveles altos de agua. Esta solución contribuye significativamente a mejorar la eficiencia y operatividad del biodigestor de forma automatizada y confiable.

4. Se validó el funcionamiento general del sistema para las variables de pH, conductividad eléctrica, temperatura y concentración de metano, obteniendo valores aceptables con un nivel de confianza superior al 90 % en todas las variables, excepto en la medición de metano. En este caso, no se contó con un patrón de referencia certificado, por lo que se utilizó un encendedor como fuente de gas para verificar la respuesta del sensor ante la presencia de butano. Si bien el encendedor no contiene metano puro, el sensor MQ-4 también presenta sensibilidad al butano, permitiendo confirmar su funcionamiento básico.

## Discusión

El equipo tuvo un costo aproximado de \$650.000, convirtiéndolo en una solución de bajo costo frente a equipos industriales. La implementación del prototipo de monitoreo para biodigestores confirmó la viabilidad de emplear sensores con precios asequibles y de fácil integración con microcontroladores como el ESP32, sin comprometer la precisión en la medición de variables clave del proceso de biodigestión: pH, temperatura, conductividad eléctrica, nivel de agua, metano (CH<sub>4</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). La selección de sensores se basó en un análisis comparativo que consideró criterios de compatibilidad, rangos de operación adecuados y accesibilidad económica.

El diseño del sistema incorporó estrategias de acondicionamiento de señal, como el uso de amplificadores de instrumentación y filtros activos, lo cual permitió mejorar la precisión en la lectura de señales analógicas y facilitó la adaptación a sensores industriales, especialmente aquellos que operan en lazo de corriente (4–20 mA). La simulación en el entorno Proteus resultó fundamental para validar la lógica de funcionamiento del sistema antes de su implementación física, permitiendo detectar posibles fallos y realizar ajustes preliminares.

Aunque los resultados obtenidos fueron satisfactorios y los sensores mostraron un margen de error aceptable en condiciones de laboratorio, se identificaron oportunidades de mejora. Se recomienda, para futuras versiones del sistema, incorporar carcasas protectoras resistentes a la intemperie y optimizar la calibración dinámica de sensores sensibles al ruido eléctrico, con el fin de aumentar la confiabilidad en ambientes reales.

Aunque el sistema funciona adecuadamente y cumple con su objetivo en cada una de las variables medidas, se han presentado apagones inesperados tras varios minutos de operación continua. Este comportamiento está relacionado con el sobrecalentamiento y la baja eficiencia

del regulador LM7805 utilizado en la fuente simétrica. Dicho componente no ofrece la estabilidad requerida por el ESP32, además de alcanzar temperaturas elevadas que podrían provocar un fallo prematuro. Por lo anterior, se recomienda que en futuras versiones del sistema se implemente una configuración de fuente diferente, utilizando componentes más eficientes y adecuados para garantizar un suministro estable y confiable.

Finalmente, es importante mencionar la limitante asociada a la disponibilidad de componentes en el mercado local. En particular, no fue posible adquirir el sensor de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ); sin embargo, el sistema ha sido diseñado y configurado para permitir su integración en el futuro, sin necesidad de modificaciones estructurales significativas.

## Referencias Bibliográficas

- Aguas residuales. (2020). *La monitorización del digestor anaerobio ayuda a evitar contratiempos en el proceso y a maximizar la producción de biogás*.  
<https://www.aguasresiduales.info/revista/casos-de-exito/la-monitorizacion-del-digestor-anaerobio-ayuda-a-evitar-contratiempos-en-el-proceso-y-a-maximizar-la-produccion-de-biogas>
- Alldatasheet. (s.f). *MQ-136 Datasheet (PDF) - Hanwei Electronics Group Corporation*.  
<https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1131997/HANWEI/MQ-136.html>
- Appels, L. et al. (2008). *"Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge"*. Progress in Energy and Combustion Science, 34(6), 755–781.
- Arduino. (2024). *Sensores de pH para arduino*.  
<https://proyectosconarduino.com/sensores/sensores-de-ph-para-arduino/>
- Arian. (s.f). *Pt100, su operación, instalación y tablas*. <https://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>
- AWS. (2024). *¿Qué es IoT (Internet de las cosas)?* <https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>
- AWS.(s.f). *¿Qué es MQTT?* <https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/>
- Biogas Metano. (2024). *Tipos de biodigestores: Una comparativa de sistemas para la descomposición de materia orgánica y producción de biogás*. <https://biogasmetano-latam.com/tipos-de-biodigestores/>
- Botero, R. (s.f). *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*.  
<https://isfcolombia.uniandes.edu.co/images/documentos/5dejuliobiodigestor.pdf>

Burke, K. (2021). *El biogás, fuente de energía renovable*. <https://www.esders.es/2021/04/biogas-fuente-de-energia-ecologica-y-renovable/>

Cabrera, J. (s.f). *Filtros activos*.

<https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>

Cadmus. (s.f). *Detector multigas fijo Crowcon Xgard*. <https://cadmus.co.uk/crowcon-xgard>

Crowcon. (2011). *XgardIR*. <https://www.pce-iberica.es/manuales/manual-XGardIR.pdf>

Dena, j. et al. (2020). *Monitoreo y registro en tiempo real de parámetros de un proceso a baja escala de producción de biogás mediante un sistema mecatrónico simple*. Vol 12 (4). 413 - 424. [https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/01/4\\_23\\_monitoreo-y-registro-en-tiempo-real-de-parametros-de.pdf](https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/01/4_23_monitoreo-y-registro-en-tiempo-real-de-parametros-de.pdf)

DFRobot. (s.f.). *DFR0300-H*.

[https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_Analog\\_Electrical\\_Conductivity\\_Sensor\\_Meter\\_K%3D10\\_SKU\\_DFR0300-H](https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_Electrical_Conductivity_Sensor_Meter_K%3D10_SKU_DFR0300-H)

Didácticas electrónicas. (s.f.). *Sensor Gas Hidrógeno MQ136*.

<https://www.didacticaselectronicas.com/shop/sen-hidrogeno-sensor-gas-hidrogeno-mq136-7872#attr=>

Dräger. (2020). *Dräger Polytron 5700 IR Detección de gases y vapores inflamables*.

<https://www.draeger.com/Content/Documents/Products/polytron-5700-pi-9101688-es-es.pdf>

Dräger. (s.f.). *Dräger Polytron 8100 EC*. [https://www.draeger.com/es\\_csa/Products/Draeger-Polytron-8100](https://www.draeger.com/es_csa/Products/Draeger-Polytron-8100)

Electrónica Embajadores. (s.f.). *MH-Z16 - Sensor CO2*.

<https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/SSGACO2/sensores/sensores-de-gas/mh-z16-sensor-co2-conectar-y-listo/>

Electronicadiy. (s.f.). *Sensor analógico de PH SEN0161*.

<https://www.electronicadiy.com/products/sensor-de-ph-analogico-sen0161>

Electronilab. (s.f.). *Sensor Horizontal de Nivel de Agua Plástico – Flotador Interruptor*.

<https://electronilab.co/tienda/sensor-horizontal-de-nivel-de-agua-plastico-flotador-interruptor/?srsltid=AfmBOoq58ieFORfW04rWAT115vmNapj9ArtYKtr45WHkRIn0Io-tj9-T>

Endress + Hauser EH. (s.f.). *Condumax CLS21D*.

<https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/sensor-conductividad-durable?t.tabId=product-overview>

Endress + Hauser. (s.f.). *Medición de nivel*. [https://www.co.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-nivel?wt\\_mc=paid-search.google.ad-google-ads-](https://www.co.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-nivel?wt_mc=paid-search.google.ad-google-ads-nivel.othr.searchnivelads.co.admedia_144593721260_636751302642&gad_source=1&gclid=Cj0KCCQjwsoe5BhDiARIsAOXVoUuZuK-3YVWEZlXr6w9kGVeyafvzREfY7tr_3_9BtpiCF6geQFU2lSsaAgvsEALw_wcB)

[nive](https://www.co.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-nivel?wt_mc=paid-search.google.ad-google-ads-nivel.othr.searchnivelads.co.admedia_144593721260_636751302642&gad_source=1&gclid=Cj0KCCQjwsoe5BhDiARIsAOXVoUuZuK-3YVWEZlXr6w9kGVeyafvzREfY7tr_3_9BtpiCF6geQFU2lSsaAgvsEALw_wcB)

Estrada et al. (2017). *Instrumentación electrónica de un sistema de generación de biogás*.

<https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/viewFile/896/769>

Estrada, L. (2017). *Instrumentación electrónica de un sistema de generación de Biogás*. Vol 39

(125). 127 - 141.

<https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/896>

FAO. (2024). *Biol y biocidas*. <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1709720/>

- Farnel. (2025). *KQXL-18G-18*. <https://es.farnell.com/omega/kqxl-18g-18/termopar-tipo-k-457-2mm-1150-c/dp/3815623?srsItd=AfmBOoqcYdLViMDNLv6qyFE-DQWBkp5sEM3y9U0jDqNSsfBvO3t7uU1v>
- Ferretronica. (s.f). *Sensor Horizontal de Nivel de Agua Tipo Flotador*.  
<https://ferretronica.com/products/sensor-horizontal-de-nivel-de-agua-tipo-flotador>
- Genia. (s.f). *Biogás y biodigestores: Tipos, ventajas y beneficios*.  
<https://geniabioenergy.com/biogas-y-biodigestores-tipos-ventajas-y-beneficios/>
- Gerard, G. (2022). *Arduino y Platformio: Como hacer un detector de gas natural con sensor MQ-4*. [https://www.youtube.com/watch?v=ngmPmO4\\_pmg](https://www.youtube.com/watch?v=ngmPmO4_pmg)
- Gobierno de Argentina. (s.f.). *Biodigestores: los residuos como generadores de energía*.  
<https://www.argentina.gob.ar/interior/ambiente/accion/biodigestores>
- Gobierno de Chile. (2011). *Manual de biogás*. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Gobierno de Chile. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*.  
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a5f80abc-8063-4e19-b871-e954f1db5bf6/content>
- Gómez et al. (2021). *Desarrollo de un sistema de monitoreo para las variables de temperatura, presión y pH en un biodigestor anaeróbico*.  
<https://portal.amelica.org/ameli/journal/814/8144200011/html/>
- Hach. (s.f.). *Sensor digital de pH/ORP de combinación DPC2K1A GLI de 3/4 de pulgada*.  
<https://co.hach.com/sensor-digital-de-ph-orp-de-combinacion-dpc2k1a-gli-de-3-4-de-pulgada-estilo-de-sensor-insercion-material-del-cuerpo-pvdf-tipo-de-electrodo-vidrio-de-uso-general-compensacion-de-temperatura-rtd-pt-1000-ohm/product?id=53559890117>

Hamilton. (s.f.). *Conducell 4UxF 4-Pole Conductivity Sensors*.

<https://www.hamiltoncompany.com/process-analytics/sensors/conductivity/4-pole-conductivity-sensors/conducell-4uxf-4-pole-conductivity-sensors>

Hanna Instruments. (s.f). *¿Qué es el pH?* <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>

Hanna Instruments. (s.f). *Control del pH en la leche*.

<https://www.hannainst.es/blog/1759/control-del-pH-en-la-leche#:~:text=Uno%20de%20los%20par%C3%A1metros%20que,encuentran%20entre%206.6%20y%206.8.>

Hanwei electronics. (s.f). *Technical data mq-4 gas sensor*.

<https://cdn.sparkfun.com/assets/e/f/c/7/d/MQ-4.pdf>

Herrero, J. (2019). *Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación*.

[https://img1.wsimg.com/blobby/go/8b0f1fce-2a3d-48b2-aa50-8ce1a2fc2bf6/downloads/Libro\\_Manual%20de%20Dise%C3%B1o%20e%20Instalaci%C3%B3n%20de%20Biodig.pdf?ver=1740410430360](https://img1.wsimg.com/blobby/go/8b0f1fce-2a3d-48b2-aa50-8ce1a2fc2bf6/downloads/Libro_Manual%20de%20Dise%C3%B1o%20e%20Instalaci%C3%B3n%20de%20Biodig.pdf?ver=1740410430360)

Honeywell. (s.f). *IR-F9 Manning AirScan*.

<https://automation.honeywell.com/mx/es/products/sensing-solutions/gas-and-flame-detection/fixed-gas-and-flame-detection/fixed-gas-detectors/ir-f9-manning-airscan>

IC-Components. (s.f). *Guía del sensor de gas MQ4: principios operativos, configuración de pines y calibración*. [https://www.ic-components.es/blog/mq4-gas-sensor-guide-](https://www.ic-components.es/blog/mq4-gas-sensor-guide-operational-principles,pin-configuration,and-calibration.jsp#5.%20Working%20Principle%20of%20the%20MQ-4%20Gas%20Sensor)

[operational-principles,pin-configuration,and-calibration.jsp#5.%20Working%20Principle%20of%20the%20MQ-4%20Gas%20Sensor](https://www.ic-components.es/blog/mq4-gas-sensor-guide-operational-principles,pin-configuration,and-calibration.jsp#5.%20Working%20Principle%20of%20the%20MQ-4%20Gas%20Sensor)

- Maher. (s.f.). *Electrodo de pH*. <https://www.maherelectronica.com/sensores-agricolas-agua/electrodo-de-ph/>
- Merck. (s.f.). pH en refrescos. <https://www.sigmaaldrich.com/CO/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ph-in-soft-drinks>
- Minambiente. (2020). *Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia*.  
[https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Guia\\_Bioga%CC%81s\\_ajustada\\_1.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Guia_Bioga%CC%81s_ajustada_1.pdf)
- Moviltronics. (s.f.). *Sensor de gas MQ136*. <https://moviltronics.com/tienda/sensor-mq136/>
- MSA. (s.f.). *Detector de un solo gas Altair Pro*. <https://co.msasafety.com/Detectores-Port%C3%A1tiles/Uno-o-Dos-Gas/Detector-de-un-solo-gas-ALTAIR-Pro/p/000080000200001512?locale=es>
- Naylamp mechatronics. (2023). *Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22*.  
<https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>
- Ordoñez, O. (2022). *Digestión anaerobia a bajas temperaturas*.  
<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/4c3ebf01-11eb-40ee-b130-f027ffc15342/content>
- pH center. (s.f.). *CS675 - Conductivity Sensor, High Temp & Pressure Stainless Steel Contacting*. [https://phcenter.eu/es/online-sensors/2619-sonda-redox-de-repuesto-para-referencia-microdos-00043210.html?srsId=AfmBOoqaCKQRkOj48V5O36ztqWrmEPn5A\\_o626vY\\_5RZSn6GsQmylKPQ](https://phcenter.eu/es/online-sensors/2619-sonda-redox-de-repuesto-para-referencia-microdos-00043210.html?srsId=AfmBOoqaCKQRkOj48V5O36ztqWrmEPn5A_o626vY_5RZSn6GsQmylKPQ)

Sánchez et al. (2016). *Evaluación inicial de parámetros de campo en un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales.*

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-34752016000100018#:~:text=Conductividad%20El%C3%A9ctrica%20\(C.E.%20%C2%B5S/cm\)&text=El%20paso%20del%20influyente%20a,tratada%20destinada%20a%20rieg%20agr%C3%ADcola.](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752016000100018#:~:text=Conductividad%20El%C3%A9ctrica%20(C.E.%20%C2%B5S/cm)&text=El%20paso%20del%20influyente%20a,tratada%20destinada%20a%20rieg%20agr%C3%ADcola.)

Sensit. (s.f.). *SENSIT® HXG-2D*. [https://gasleaksensors.com/es/products/sensit\\_hxg-2d/](https://gasleaksensors.com/es/products/sensit_hxg-2d/)

Servicios manufactureros. (s.f.). *Realidad, Impacto y Oportunidades de los Biocombustibles en Guatemala.*

<https://www.oas.org/dsd/Energy/Documents/SimposioG/3%20Panel%20I%20Biogas.pdf>

Siemens. (2025). *FT-TP/100 | BPZ:FT-TP/100.*

<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/Product/?mlfb=BPZ%3aFT-TP%2f100>

Soto y Reyes. (2024). *Diseño y simulación de un biodigestor mediante PLC y pantalla HMI.*

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29176/1/UPS-GT005837.pdf>

Tech. (2022). *Milwaukee medidor de pH digital pH600.*

<https://techindustries.co/producto/milwaukee-medidor-de-ph-digital-ph600/>

TME. (s.f.). *SCP-PTC/B APAR*. [https://www.tme.eu/es/details/scp-ptc\\_b/sensores-de-temperatura-termistores-ptc/apar/](https://www.tme.eu/es/details/scp-ptc_b/sensores-de-temperatura-termistores-ptc/apar/)

Torres et al. (2020). *Adsorción de sulfuro de hidrógeno del biogás mediante virutas de hierro pretratadas para reuso energético.*

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382020000100018&lng=es&tlng=es.](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000100018&lng=es&tlng=es.)

Unit Electronics. (s.f). *PH-4502C Sensor de PH Líquido con electrodo E201-BNC.*

[https://uelectronics.com/producto/sensor-de-ph-liquido/?srsltid=AfmBOoqK005prXNID\\_HDVy8Ambppdmj2NMHHCViiAPurguFzKJp0r65p](https://uelectronics.com/producto/sensor-de-ph-liquido/?srsltid=AfmBOoqK005prXNID_HDVy8Ambppdmj2NMHHCViiAPurguFzKJp0r65p)

Vaisala. (s.f.). *Sonda multigas MGP261 para medir la humedad, el dióxido de carbono y el*

*metano.* <https://www.vaisala.com/es/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/mgp261>

Winson. (2015). *Hydrogen Sulfide Gas Sensor (Model : MQ136)*

[https://cdn.sparkfun.com/assets/d/e/3/8/6/MQ136\\_\\_Ver1.4\\_\\_-\\_Manual.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/d/e/3/8/6/MQ136__Ver1.4__-_Manual.pdf)

Zamu electrónica. (s.f). *PT100 Sensor de temperatura RTD 2 hilos.*

<https://www.zamux.co/sensor-de-temperatura-rtd-pt100>

## Apéndices

### Apéndice A

#### *Código del Programa*

```
// Biodigestor UNAD - Proyecto de grado Daniel Duque
// Sensores: pH, Temperatura, Conductividad eléctrica, H2S, MQ4

#include <LiquidCrystal.h> // Librería para manejar la pantalla LCD
#include <EEPROM.h> // Librería para memoria EEPROM
#include <WiFi.h> // Permite conectar el ESP32 a WiFi
#include <AsyncMqttClient.h> // Cliente MQTT asíncrono
#include "DFRobot_EC10.h" // Para usar sensor de conductividad electrica

//Configuración red WIFI
const char* ssid = "Laura Sofia"; // Nombre de tu red WiFi
const char* password = "1007831126"; // Contraseña de tu red WiFi

// Configuración de la pantalla LCD (pines RS, E, D4, D5, D6, D7)
LiquidCrystal lcd(22, 21, 19, 18, 17, 16);

// Definición de pines de los sensores y constantes
#define PH_SENSOR_PIN 32 // Pin analógico del sensor de pH
#define TEMP_SENSOR_PIN 33 // Pin analógico del sensor de temperatura
#define CONDUCTIVIDAD_PIN 34 // Pin analógico del sensor de conductividad
eléctrica
#define H2S_SENSOR_PIN 35 // Pin analógico del sensor de H2S
#define CH4_SENSOR_PIN 36 // Pin analógico del sensor de MQ4
#define NIVEL_SENSOR_PIN 39 // Pin analógico del sensor de nivel

//Configuración del broker MQTT
const char* mqttServer = "broker.emqx.io"; // Dirección del broker público
const int mqttPort = 1883; // Puerto estándar de MQTT

//Temas MQTT a publicar
const char* topic_temp = "temperatura/tor";
const char* topic_ph = "ph/tor";
const char* topic_h2s = "sulfuro/tor";
const char* topic_nivel = "nivel/tor";
const char* topic_ch4 = "metano/tor";
const char* topic_conduct = "conduct/tor";

AsyncMqttClient mqttClient; // Cliente para conectarse al broker MQTT
```

```

//Conexión a red WIFI
void setupWifi() {
    WiFi.begin(ssid, password);          // Inicia conexión a red WiFi
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { // Espera hasta estar conectado
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nConectado al WiFi"); // Confirmación
}

//Eventos MQTT
void onMqttConnect(bool sessionPresent) {
    Serial.println("Conectado al broker MQTT"); // Mensaje cuando se conecta
}

void onMqttDisconnect(AsyncMqttClientDisconnectReason reason) {
    Serial.println("Desconectado... Reintentando");
    delay(5000);          // Espera un momento antes de reconectar
    mqttClient.connect(); // Intenta reconectar
}

float sensorValue = 0;
int actuador = 15; //Definir pin donde esta conectada la electroválvula
const uint8_t calibrateR0Button = 13;
const uint8_t Vc = 3.3;
const uint8_t r01Address = 0x00;
const uint8_t r02Address = 0x04;
const float RsRoH2S = 3.7;
const float RsRoMQ4 = 4.3;
const int airMeasurements = 500;
float r01;
float r02;
float ecVoltage, ecValue, temperatura = 25.0;
DFRobot_EC10 ec;

// Variables globales para almacenar valores de los sensores
float corriente = 1, conductividad = 1, pot = 1;
int phBuffer[10]; // Array para almacenar lecturas del sensor de pH

// Función para convertir valor analógico a voltaje en H2S
float value2Voltage1(int value1) { return (float)value1 * Vc / 4095; }

// Función para calcular la concentración de H2S en ppm
double getGasPpm1() {

```

```

float v1Sensor = value2Voltage1(analogRead(H2S_SENSOR_PIN));
float rs1 = 1000 * ((Vc / v1Sensor) - 1);
float ratio1 = rs1 / r01;
double ppm1 = (ratio1 > 0) ? pow(10, (8.2214308 * log10(ratio1) + 4.124935))
: 0;
return constrain(ppm1, 0, 100); // Limita ppm entre 0 y 100
}

// Función para convertir valor analógico a voltaje en CH4
float value2Voltage2(int value2) { return (float)value2 * Vc / 4095; }

// Función para calcular la concentración de CH4 en ppm
double getGasPpm2() {
float v2Sensor = value2Voltage2(analogRead(CH4_SENSOR_PIN));
float rs2 = 1000 * ((Vc / v2Sensor) - 1);
float ratio2 = rs2 / r02;
double ppm2 = (ratio2 > 0) ? pow(10, (-log10(ratio2) / 0.346787 + 3)) : 0;
return constrain(ppm2, 0, 10000); // Limita ppm entre 0 y 10000
}

// Función para calibrar R0 y almacenarlo en EEPROM
void calibrateR0() {
lcd.clear(); lcd.print("Calibrando..."); Serial.print("Calibrando...\n");
delay(3000);
float avgReading = 0;
for (int x = 0; x < airMeasurements; x++) avgReading +=
analogRead(H2S_SENSOR_PIN);
avgReading = avgReading / airMeasurements * Vc / 4095;
r01 = (1000 * ((Vc / avgReading) - 1)) / RsRoH2S;
EEPROM.put(r01Address, r01);
r02 = (1000 * ((Vc / avgReading) - 1)) / RsRoMQ4;
EEPROM.put(r02Address, r02);
lcd.clear(); lcd.print("Calibracion OK"); Serial.print("Calibracion OK\n");
delay(2000);
}

void setup() {
Serial.begin(115200); // Iniciar comunicación serial
Serial.println("Ready"); // Mensaje de inicio en el Monitor Serial

pinMode(PH_SENSOR_PIN, INPUT);
pinMode(TEMP_SENSOR_PIN, INPUT);
pinMode(CONDUCTIVIDAD_PIN, INPUT);
pinMode(H2S_SENSOR_PIN, INPUT);
pinMode(CH4_SENSOR_PIN, INPUT);

```

```

pinMode(NIVEL_SENSOR_PIN, INPUT_PULLUP);
pinMode(calibrateR0Button, INPUT);
pinMode(actuador, OUTPUT);

lcd.begin(20, 4); // Inicializar la pantalla LCD con dimensiones 20x4
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Biodigestor UNAD"); // Mostrar mensaje inicial
delay(2000);
lcd.clear();

EEPROM.begin(32); // Necesario para usar EEPROM en ESP32
ec.begin();
EEPROM.get(r01Address, r01); // Leer el valor de R01 guardado
EEPROM.get(r02Address, r02); // Leer el valor de R02 guardado

setupWifi(); // Conecta a WiFi

mqttClient.onConnect(onMqttConnect); // Configura eventos
mqttClient.onDisconnect(onMqttDisconnect);
mqttClient.setServer(mqttServer, mqttPort); // Define el servidor MQTT
mqttClient.connect(); // Conéctate al broker
}

void loop() {
  medirTemperatura();
  medirConductividad();
  medirPH();
  medirH2S();
  medirCH4();
  medirNivel();

  if (digitalRead(calibrateR0Button)) {
    calibrateR0();
  }

  delay(800);
}

// Función para medir el nivel
void medirNivel() {
  int estado = digitalRead(NIVEL_SENSOR_PIN);
  const char* estadoStr = ""; // Variable para guardar estado en texto

  if (estado == HIGH) {
    digitalWrite(actuador, HIGH); // Encender LED
  }
}

```

```

Serial.println("Drenaje ON");
estadoStr = "ALTO";           // El nivel es alto (tanque lleno)
delay(8000);                  // Esperar 8 segundos
digitalWrite(actuador, LOW);  // Apagar LED
Serial.println("Drenaje OFF");
} else {
digitalWrite(actuador, LOW);  // Asegurarse que el LED está apagado
estadoStr = "BAJO";          // El nivel es bajo
}

mqttClient.publish(topic_nivel, 0, false, estadoStr);
}

// Función para medir H2S
void medirH2S() {
double ppm1 = getGasPpm1();

Serial.print("H2S: "); Serial.print(ppm1); Serial.println(" ppm");
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("H2S: ");
lcd.setCursor(5, 2); lcd.print("          "); // Primero limpia el espacio
(10 espacios por ejemplo)
lcd.setCursor(5, 2); lcd.print(ppm1, 2); // Especifica 2 decimales
directamente
lcd.setCursor(12, 2); lcd.print("ppm");

char msg[10];
dtostrf(ppm1, 1, 2, msg);
mqttClient.publish(topic_h2s, 0, false, msg);
}

// Función para medir CH4
void medirCH4() {
double ppm2 = getGasPpm2();

Serial.print("CH4: "); Serial.print(ppm2); Serial.println(" ppm");
lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("CH4: ");
lcd.setCursor(5, 3); lcd.print("          "); // Primero limpia el espacio
(10 espacios por ejemplo)
lcd.setCursor(5, 3); lcd.print(ppm2, 2); // Especifica 2 decimales
directamente
lcd.setCursor(14, 3); lcd.print("ppm");

char msg[10];
dtostrf(ppm2, 1, 2, msg);
mqttClient.publish(topic_ch4, 0, false, msg);
}

```

```

}

void medirTemperatura() {
    float sensorValue = analogRead(TEMP_SENSOR_PIN); // Leer valor del sensor de
temperatura
    sensorValue = map(sensorValue, 204, 4095, 0, 4500) / 100.0; // Convertir
lectura a grados Celsius
    temperatura = sensorValue;

    // Mostrar temperatura en la pantalla LCD y monitor serial
    Serial.print("Sensor de temperatura PT100: "); Serial.print(sensorValue);
Serial.println(" grados Celsius\n");
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Temp: ");
    lcd.setCursor(6, 0); lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(6, 0); lcd.print(sensorValue, 1);

    char msg[10];
    dtostrf(sensorValue, 1, 2, msg);
    mqttClient.publish(topic_temp, 0, false, msg);
}

void medirConductividad() {

    static unsigned long timepoint = millis();
    if (millis() - timepoint > 1000U) { // Cada 1 segundo
        timepoint = millis();

        ecVoltage = analogRead(CONDUCTIVIDAD_PIN) / 4095.0 * 3300.0; // Convertir a
mV
        Serial.print("Voltage: ");
        Serial.print(ecVoltage);
        ecValue = ec.readEC(ecVoltage, temperatura);

        conductividad = ecValue * 1000.0; // Convertir a µS/cm
        lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("C:      uS/cm"); // Mostrar "C:" para
conductividad
        lcd.setCursor(3, 1); lcd.print(" "); lcd.setCursor(3, 1);
        lcd.print(conductividad, 0);

        Serial.print(" Temp: ");
        Serial.print(temperatura, 1);
        Serial.print(" °C | EC: ");
        Serial.print(ecValue, 2);
    }
}

```

```

    Serial.println(" ms/cm");
}
ec.calibration(ecVoltage, temperatura); // Para calibrar por monitor serial
}

void medirPH() {
    for (int i = 0; i < 10; i++) {
        pBuffer[i] = analogRead(PH_SENSOR_PIN);
        delay(10);
    }
    quickSort(pBuffer, 0, 9);

    float avgValue = 0;
    for (int i = 2; i < 8; i++) avgValue += pBuffer[i];
    avgValue /= 6.0;

    float voltage = (avgValue * 3.3) / 4095.0;

    // Fórmula calibrada con datos reales (regresión cuadrática)
    float pHValue = 7.252 * voltage * voltage - 45.637 * voltage + 74.208;

    // Limitar al rango físico
    pHValue = constrain(pHValue, 0.0, 14.0);

    Serial.print("pH: "); Serial.println(pHValue, 2);
    lcd.setCursor(12, 0); lcd.print("pH: "); lcd.setCursor(16, 0);
    lcd.print(pHValue, 2);

    char msg[10];
    dtostrf(pHValue, 1, 2, msg);
    mqttClient.publish(topic_ph, 0, false, msg);
}

// Función para ordenar un array con QuickSort
void quickSort(int arr[], int low, int high) {
    if (low < high) {
        int pivotIndex = partition(arr, low, high);
        quickSort(arr, low, pivotIndex - 1);
        quickSort(arr, pivotIndex + 1, high);
    }
}

// Función auxiliar para dividir el array en QuickSort
int partition(int arr[], int low, int high) {
    int pivot = arr[high];

```

```
int i = low - 1;
for (int j = low; j < high; j++) {
    if (arr[j] < pivot) {
        i++;
        swap(arr[i], arr[j]);
    }
}
swap(arr[i + 1], arr[high]);
return (i + 1);
}

// Función auxiliar para intercambiar dos valores en QuickSort
void swap(int &a, int &b) {
    int temp = a;
    a = b;
    b = temp;
}
```

## Apéndice B

### Certificado de Calibración Termómetro RT-803E

 	<b>FORMATO</b>  <b>CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE CONTACTO</b>	<b>Código : GIN-FR-171</b>
		<b>Versión: 02</b>

**CERTIFICADO NÚMERO:** 286417  
*Certificate Number*

**INSTITUCIÓN**  
*Customer* : CAJA DE COMPENSACIÓN FAMILIAR DE CALDAS - CONFA SEDE VERSALLES

**INFORMACIÓN DEL CONTACTO**  
*Contact Information* : DANIELA VALENCIA SOTO  
(606) 874-86-80

**DIRECCIÓN**  
*Address* : CARRERA 25 # 50-25, MANIZALES

**INSTRUMENTO**  
*Instrument* : TERMÓMETRO DIGITAL

**FABRICANTE**  
*Manufacturer* : KEX GERMANY

**SERIE**  
*Series* : S.I.

**MODELO**  
*Model* : RT-803E

**CÓDIGO IDENTIFICACIÓN**  
*Identification Code* : AF21421

**CÓDIGO DE ACTIVO**  
*Active code* : AF21421

**FECHA DE CALIBRACIÓN**  
*Date of Calibration* : 2024-11-29

**FECHA DE RECEPCIÓN**  
*Date of Reception* : 2024-11-27

**NÚMERO DE PÁGINAS INCLUYENDO ANEXOS**  
*Number of pages including annexes* : CUATRO (04)

#### INFORMACIÓN DE LA CALIBRACIÓN

**DIVISIÓN DE ESCALA** : 0,1 °C  
**RESOLUCIÓN** : 0,1 °C  
**INTERVALO DE CALIBRACIÓN** : (2,50 a 8,60) °C  
**SITIO DE CALIBRACIÓN** : LABORATORIO MEBI METROLOGÍA BIOMÉDICA S.A.  
**ÁREA SOLICITANTE** : MEDICINA GENERAL

#### MÉTODO DE CALIBRACIÓN

El método usado para la calibración es el de comparación por un patrón de referencia según instructivo interno GIN-IN-069, que se basa en documento normativo Thermometers, contact, direct reading. Calibration (NT VVS 103)1994

#### CONDICIONES AMBIENTALES

Se registraron las condiciones ambientales al inicio y fin de las pruebas, estas se refieren al sitio, y momento de la calibración. Se consignan en la siguiente tabla.

 	FORMATO  <b>CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE CONTACTO</b>	Código: GIN-FR-171
		Versión: 02

CERTIFICADO NÚMERO: **286417**  
*Certificate Number*

	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%hr)
<b>MÍNIMA</b>	22,49 ± 0,29	55,2 ± 2
<b>MÁXIMA</b>	22,79 ± 0,29	57,2 ± 2

**INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN**

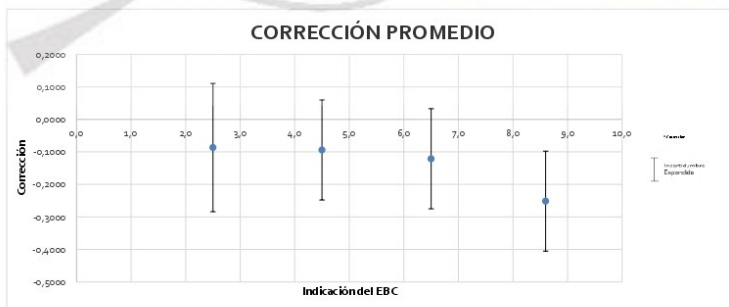
La incertidumbre expandida de la medición reportada se establece como la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura "k" y una probabilidad de cobertura aproximada al 95% y no menor a este valor. Para su estimación, se tuvieron en cuenta las fuentes de incertidumbre que aporta el equipo patrón, el equipo bajo prueba y el medio de calibración, de acuerdo con el documento normativo utilizado.

**RESULTADOS DE LA MEDICIÓN**

Los valores de la tabla se expresan en °C

VALOR PROMEDIO EQUIPO BAJO PRUEBA	VALOR EQUIPO PATRÓN CORREGIDO	CORRECCIÓN A LA INDICACIÓN	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA	k	DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD
2,50	2,4134	-0,09	±0,20	2,0	No aplica
4,50	4,4060	-0,09	±0,15	2,0	No aplica
6,50	6,3789	-0,12	±0,15	2,0	No aplica
8,60	8,3485	-0,25	±0,15	2,0	No aplica

Corrección Máxima: -0,25 °C



**OBSERVACIONES DE LA CALIBRACIÓN**

Se deja el equipo en buenas condiciones de funcionalidad.  
 Versión original (Certificado sin correcciones)

**DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD**

El cliente no solicitó declaración de conformidad.

 	<b>FORMATO</b>  <b>CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE CONTACTO</b>	<b>Código: GIN-FR-171</b>
		<b>Versión: 02</b>

**CERTIFICADO NÚMERO: 286417**  
*Certificate Number*

#### DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

Cuando el cliente no proporcione información sobre los puntos de calibración para el equipo bajo prueba de acuerdo con lo solicitado en la cotización del servicio, el laboratorio elegirá los que considera convenientes según el procedimiento de calibración.  
 La información de la institución solicitante y los datos del Equipo Bajo Prueba son suministrados por el cliente. Mebi Metrología Biomédica S.A. no se hace responsable de los mismos.

#### TRAZABILIDAD

MEBI Metrología Biomédica S.A. asegura la trazabilidad de las mediciones al Sistema Internacional de Unidades (SI) a través de laboratorios acreditados nacionales o internacionales, de acuerdo con lo establecido en ISO/IEC 17025:2017.

Identificación del Patrón de Calibración	Certificado de Calibración	Laboratorio Certificador	Fecha de Calibración
P-01-08 Termómetro digital con RTD Pt100	TLM-T-2790 Y TLM-T-2791	TESLA LABORATORIO DE METROLOGÍA	2024-09-17
P-06-12 Baño líquido de temperatura controlada	TE-0698-24	METROCAL LTDA.	2024-08-29
P-06-399 Termohigrómetro Digital	268261	MEBI METROLOGÍA BIOMÉDICA S.A.	2024-03-12



#### OBSERVACIONES ADICIONALES

- El solicitante es responsable de la calibración de sus equipos a intervalos adecuados.
- Este certificado corresponde al equipo descrito en la página 1.
- Para el valor del equipo patrón y el valor del equipo bajo prueba, aplica el siguiente factor de conversión:  

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$
 Donde, T es el valor de temperatura en las respectivas unidades.
- El valor promedio equipo bajo prueba corresponde a un promedio de 2 mediciones de la lectura de este.
- El valor promedio equipo patrón corresponde a un promedio de 3 mediciones de la lectura de este, más la corrección a la indicación obtenida de su certificado de calibración por medio de una interpolación por mínimos cuadrados.
- Los datos reportados tendrán la misma cantidad de cifras que la resolución del equipo que le corresponde, los promedios tendrán una más.
- Los valores de los instrumentos auxiliares incluyen la corrección del certificado de calibración.
- Al valor indicado por el equipo de prueba se le debe sumar la corrección a la indicación para obtener la temperatura verdadera  

$$\text{Temperatura corregida} = \text{Indicación} + \text{Corrección a la indicación}$$
- La incertidumbre expandida reportada en las tablas de resultados, se calcula mediante la siguiente expresión:  

$$\text{Incertidumbre Expandida} = (\text{Incertidumbre Combinada}) * (\text{Factor de Cobertura } k)$$
- Los certificados de calibración sin firma no tienen validez.
- Cuando es posible, la etiqueta de calibración es adherida al equipo bajo prueba calibrado.
- Los certificados de calibración deben publicarse sin enmiendas. Extractos o enmiendas requieren la autorización de MEBI Metrología Biomédica S.A.

  <p>50/IEC 17025:2017 15-LAC-002</p>	FORMATO  <b>CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS DE CONTACTO</b>	Código: GIN-FR-171
		Versión: 02

CERTIFICADO NÚMERO: **286417**  
*Certificate Number*

**Elaboró**  
*Make by*

*Angie Garay*

ANGIE CAROLINA GARAY MIRANDA  
 Metróloga

**Revisó**  
*Reviewed*

*Cindy Osorio*

CINDY JULIETH OSORIO ABELLO  
 Ingeniera Biomédica

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No podrá ser reproducido parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente autorización por escrito del Laboratorio de METROLOGIA BIOMEDICA S.A.

Los resultados obtenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El Laboratorio de METROLOGIA BIOMEDICA S.A. no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos calibrados.

Fecha de Expedición: **2024-11-29**  
*Date of issue*

**FIN DEL CERTIFICADO**