



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y**  
**AUTOMATIZACIÓN**

**DISEÑO Y SIMULACION DE UN BIODIGESTOR MEDIANTE PLC Y  
PANTALLA HMI**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Electrónico

**AUTORES:** Kevin Rolando Soto Valencia  
Juan Francisco Reyes Villón

**TUTOR:** Ing. Víctor David Larco Torres Msc.

Guayaquil – Ecuador

2024

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Kevin Rolando Soto Valencia con documento de identificación N° 0923255467 y Juan Francisco Reyes Villón con documento de identificación N° 0952484053; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 02 de septiembre del 2024

Atentamente,

Kevin Rolando Soto Valencia

C.I: 0923255467

Juan Francisco Reyes Villón

C.I: 0952484053

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Kevin Rolando Soto Valencia con documento de identificación N° 0923255467 y Juan Francisco Reyes Villón con documento de identificación N° 0952484053, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “DISEÑO Y SIMULACION DE UN BIODIGESTOR MEDIANTE PLC Y PANTALLA HMI”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros electrónicos , en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 02 de septiembre del 2024

Atentamente,



---

Kevin Rolando Soto Valencia

C.I: 0923255467



---

Juan Francisco Reyes Villón

C.I: 0952484053

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ing. Víctor David Larco Torres, Msc con documento de identificación N° 0923270136, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "DISEÑO Y SIMULACION DE UN BIODIGESTOR MEDIANTE PLC Y PANTALLA HMI", realizado por Kevin Rolando Soto Valencia con documento de identificación N° 0923255467 y Juan Francisco Reyes Villón con documento de identificación N° 0952484053, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 02 de septiembre del 2024

Atentamente,



Ing. Víctor David Larco Torres, Msc

C.I: 0923270136

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarme la fortaleza, sabiduría y la perseverancia necesaria para llevar a cabo esta tesis. Su presencia constante en mi vida me ha guiado y sostenido en los momentos más desafiantes de este proceso.

A mi familia, especialmente a mi madre, Lcda. María Ángela Valencia, por su amor incondicional, su apoyo incansable y por creer siempre en mí. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y dedicación, y por estar a mi lado en cada paso de este camino, por su infinito amor y paciencia. Gracias por tus palabras de aliento y por estar siempre dispuesta a escucharme y apoyarme. Tu fuerza y resiliencia me han enseñado a no rendirme nunca, y tu fe en mi me ha dado la confianza para seguir adelante.

A mi abuela, Anicia Sabrina Rodríguez, por su amor y apoyo incondicional. Sus historias, sabiduría y enseñanzas han sido una fuente de inspiración y motivación a lo largo de mi vida.

A mis amigos, por su amistad, apoyo y por brindarme momentos de alegría y desconexión necesarios para mantener el equilibrio durante este intenso periodo. Gracias por escucharme, aconsejarme y estar siempre dispuestos a ofrecer su ayuda.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Sin su amor y apoyo, la realización de esta tesis no habría sido posible.

## **DEDICATORIA**

Dedico con todo orgullo esta tesis a mi madre, por su amor incondicional, su apoyo incansable y su fe inquebrantable en mí. Su guía y sacrificios han sido la base de todos mis logros.

A mi abuela, por su sabiduría, su cariño y por enseñarme el valor de la perseverancia. Tu amor y apoyo han sido una luz en mi vida.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por proporcionarme las herramientas y el entorno necesario para alcanzar mis metas académicas y personales. A todos los profesores y administrativos, gracias por su dedicación y compromiso con nuestra formación.

Finalmente, dedico este trabajo a Dios, por darme la fuerza y la sabiduría para completar esta etapa de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero agradecer a mi querido padre quien, aunque físicamente ausente, continúa enseñándome sus enseñanzas día tras día. Este logro está dedicado a ti, porque es a través de tu amor y devoción que he aprendido a nunca rendirme.

Mi corazón todavía llora por tu ausencia, pero sé que estás orgulloso de mí por dónde estás. Te extraño mucho y esta dedicatoria es mi pequeña forma de decirte que nunca te olvidaré.

A mi madre, mi heroína de la colcha larga que me ha guiado en cada paso de mi vida con su fuerza, sabiduría y amor incondicional. Gracias por ser mi luz en tiempos oscuros y creer siempre en mí. Este logro es una victoria para ambos.

## **DEDICATORIA**

Dedico con todo orgullo esta tesis a mi familia, cuyo inquebrantable apoyo y aliento han sido mi guía a lo largo de este viaje. Su fe en mis sueños me ha inspirado a alcanzar las estrellas y por ello les estaré eternamente agradecido.

A mis mentores y amigos, gracias por su invaluable guía y por desafiarme a pensar críticamente. Sus ideas han dado forma a mi comprensión y han alimentado mi pasión por el conocimiento.

Por último, a todos aquellos que luchan por la excelencia en la educación, que sigan inspirándonos unos a otros.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. Planteamiento del Problema .....</b>	<b>2</b>
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Innovación.....	2
1.2.1. Importancia .....	2
1.2.2. Alcance .....	3
1.3. Justificación .....	4
1.4. Delimitación.....	5
1.4.1. Delimitación Temporal .....	5
1.4.2. Delimitación Espacial .....	5
1.4.3. Delimitación Académica.....	5
1.5. Objetivos .....	5
1.5.1. Objetivo General .....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	6
<b>2. Marco teórico referencial .....</b>	<b>7</b>
2.1. Biodigestor .....	7
2.1.1. Definición .....	7
2.1.2. Biodigestión .....	7
2.1.2.1 Fase de Hidrólisis.....	8
<b>Figura 1. Reacción de hidrólisis genérica.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.1.2.2 Fase de acidogénesis-acetogénesis. ....	8
<b>Figura 2. Reacción de acidogénesis-acetogénesis. ....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.1.2.3 Fase de Metanogénesis .....	9
<b>Figura 3. Reacción de total de la reacción anaeróbica.....</b>	<b>9</b>

2.2.	Tipos de biodigestor.....	10
<b>Tabla 1. Clasificación de los Biodigestores .....</b>		<b>10</b>
2.2.1	Biodigestores – Carga Soportada.....	10
2.2.2	Biodigestores – Intensidad de mezclado.....	10
2.2.3	Biodigestores – Manejo del sustrato .....	11
2.2.4	Biodigestores – Manejo bioquímico .....	11
2.3	Parámetros ambientales y operacionales de la fermentación anaeróbica. ....	11
2.3.1	Condiciones de temperatura.....	11
<b>Figura 4. Producción de biogás y tiempo de retención para diferentes temperaturas de operación .....</b>		<b>12</b>
2.3.2	Condiciones del valor de acides (pH) .....	13
<b>Figura 5. Índices de pH de productos alimenticios y químicos en una temperatura de 25°C. ....</b>		<b>13</b>
2.4	El Biogás.....	14
2.4.1	Definición .....	14
2.4.2	Composición y características del biogás .....	14
2.4.3	Componentes Principales del Biogás.....	15
<b>Tabla 2. Composición Química representado en porcentajes del Biogás. ....</b>		<b>16</b>
2.4.4	Usos del Biogás.....	16
2.5	Control y Automatización .....	17
<b>Figura 6. Componentes de un sistema de control.....</b>		<b>18</b>
2.5.1	Importancia y Aplicaciones .....	18
2.5.2	Redes de Comunicaciones Industriales.....	18
2.5.3	Pirámide de Automatización.....	19
<b>Figura 7. Pirámide de automatización. ....</b>		<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6	Redes AS-Interface.....	20

<b>Figura 8. Red AS-Interface.</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
2.7 TIA Portal.....	21
2.8 PLC SIM Advanced.....	21
<b>Figura 9. Panel de control de PLCSIM advanced.</b> .....	¡Error! Marcador no definido.
2.9 Programación PLC .....	22
<b>Figura 10. Inicio de TIA PORTAL V18.</b> .....	<b>23</b>
2.10 Protocolos de Comunicación .....	24
2.11 Sistemas SCADA.....	26
<b>Figura 11. Representación de un sistema scada.</b> .....	<b>26</b>
2.12 Pantalla HMI.....	27
<b>Figura 12. Pantalla HMI</b> .....	<b>27</b>
<b>3. Marco metodológico</b> .....	<b>28</b>
2.13 Diseño del sistema del biodigestor .....	28
2.13.1 Diagrama de bloques del proceso .....	28
<b>Figura 13. Diagrama de bloques.</b> .....	<b>28</b>
2.14 Programación del PLC.....	28
2.14.1 Diagrama de conexiones del proyecto. ....	29
2.14.1.1 Paso 1: Configuración PLC SIM advance y Pantalla HMI.....	29
<b>Figura 14. Configuración PLC con la Pantalla HMI</b> .....	<b>30</b>
2.14.1.2 Paso 2: Configurar propiedades del controlador .....	30
<b>Figura 15. Configuración de propiedades del PLC</b> .....	<b>30</b>
<b>Figura 16. Configuración de propiedades del HMI.</b> .....	<b>31</b>
2.15 Programación del PLC.....	31
2.15.1.1 HMI: Llenado del reactor .....	32
<b>Figura 17. Pantalla HMI al momento de iniciar el proceso.</b> .....	<b>32</b>
2.15.1.2 Programación PLC: Inicio del sistema. ....	32

<b>Figura 18. Programación INICIO - MODO AUTOMATICO.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 19. Alimentadores del reactor principal. ....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 20. Secuencia de Llenado .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 21. Agitador y Agitación.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 22. Controlador de Temperatura. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 23. Configuración del bloque PID de temperatura.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 24. Finalización del Proceso Automático. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 25. Programación INICIO - MANUAL .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 26. Controlador del pH.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 27. Arranque por entradas digitales externas. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 28. Lectura del valor de Temperatura. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 29. Tiempo de estabilización de Temperatura.. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 30. Desconexión de Modo Manual.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 31. Tabla de dirección del PLC. ....</b>	<b>46</b>
2.16    HMI.....	47
2.16.1    Pantalla principal .....	47
<b>Figura 32. Pantalla principal.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 33. Pantalla Secundaria.....</b>	<b>48</b>
2.16.2    Tabla de direccionamiento HMI .....	48
<b>Figura 34. Tabla de dirección HMI .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 35. Pantalla HMI – Grafica de Temperatura y pH. ....</b>	<b>50</b>
3.1.    RESULTADOS.....	51
3.1.1.    Análisis de Resultados .....	51
3.1.1.1.    Inicio del proceso modo automático .....	51
<b>Figura 36. HMI de inicio del proceso. ....</b>	<b>51</b>
2.16.2.1    Análisis variable de temperatura .....	52

<b>Gráfico 1. Gráfica de la variable de temperatura. ....</b>	<b>52</b>
2.16.2.2 Análisis de la variable pH. ....	53
<b>Gráfico 2. Gráfica de la variable de pH. ....</b>	<b>53</b>
2.17 Modos Manual.....	54
<b>Figura 37. Simulación termocupa tipo K.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 38. Gráfica de la temperatura con el termocupa tipo K. ....</b>	<b>55</b>
2.17.1.1 Análisis de la variable de temperatura. ....	55
<b>Gráfico 3. Variable de temperatura. ....</b>	<b>56</b>
2.17.1.2 Análisis de la variable pH. ....	57
<b>Gráfico 4. Gráfico de la variable del pH. ....</b>	<b>57</b>
<b>3 Conclusiones .....</b>	<b>58</b>
<b>4 Recomendaciones .....</b>	<b>60</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>61</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Hidrólisis genérica.</i> .....	8
Figura 2 <i>Reacción de acidogénesis-acetogénesis.</i> .....	9
Figura 3 <i>Reacción de total de la reacción anaeróbica.</i> .....	9
Figura 4 <i>Producción de biogás y tiempo de retención para diferentes temperaturas de operación</i> .....	12
Figura 5 <i>Índices de pH de productos alimenticios y químicos en una temperatura de 25°C.</i> .....	13
Figura 6 <i>Componentes de un sistema de control.</i> .....	18
Figura 7 <i>Pirámide de automatización</i> .....	19
Figura 8 <i>Red AS-Interface.</i> .....	20
Figura 9 <i>Panel de control de PLC SIM advanced.</i> .....	22
Figura 10 <i>Inicio de TIA PORTAL V18.</i> .....	23
Figura 11 <i>Representación de un sistema scada.</i> .....	26
Figura 12 <i>Pantalla HMI</i> .....	27
Figura 13 <i>Diagrama de bloques.</i> .....	28
Figura 14 <i>Configuración PLC con la Pantalla HMI</i> .....	30
Figura 15 <i>Configuración de propiedades del PLC.</i> .....	30
Figura 16. <i>Configuración de propiedades del HMI.</i> .....	31
Figura 17 <i>Pantalla HMI al momento de iniciar el proceso.</i> .....	32
Figura 18 <i>Programación INICIO - MODO AUTOMATICO.</i> .....	32
Figura 19 <i>Alimentadores del reactor principal.</i> .....	33
Figura 20. <i>Secuencia de Llenado</i> .....	35
Figura 21 <i>Agitador y Agitación.</i> .....	36
Figura 22. <i>Controlador de Temperatura.</i> .....	37
Figura 23 <i>Configuración del bloque PID de temperatura.</i> .....	38
Figura 24 <i>Finalización del Proceso Automático.</i> .....	39
Figura 25 <i>Programación INICIO - MANUAL</i> .....	40
Figura 26 <i>Controlador del pH</i> .....	41
Figura 27 <i>Arranque por entradas digitales externas.</i> .....	42
Figura 28 <i>Lectura del valor de Temperatura.</i> .....	43
Figura 29 <i>Tiempo de estabilización de Temperatura.</i> .....	44

Figura 30 <i>Desconexión de Modo Manual</i> .....	45
Figura 31 <i>Tabla de dirección del PLC</i> .....	46
Figura 32 <i>Pantalla principal del HMI</i> .....	47
Figura 33 <i>Pantalla Secundaria</i> .....	48
Figura 34 <i>Tabla de dirección HMI</i> .....	49
Figura 35 <i>Pantalla HMI – Grafica de Temperatura y pH</i> .....	50
Figura 36 <i>HMI de inicio del proceso</i> .....	51
Figura 37. <i>Simulación termocupla tipo K</i> .....	54
Figura 38 <i>Grafica de la temperatura con la termocupla tipo K</i> .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los Biodigestores .....	10
Tabla 2. Composición Química representado en porcentajes del Biogás. ....	16

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráfica de la variable de temperatura. ....	52
Gráfico 2. Gráfica de la variable de pH. ....	53
Gráfico 3. Variable de temperatura. ....	56
Gráfico 4. Gráfico de la variable del pH. ....	57

## RESUMEN

Este proyecto se centra en el diseño y simulación del proceso de un biodigestor mediante la combinación de un Controlador Lógico Programable (PLC) y una Interfaz de Usuario Human-Máquina (HMI). El objetivo principal es alcanzar una automatización y supervisión eficaces de las variables durante el proceso de fermentación anaeróbica, garantizando la precisión, calidad y eficiencia operativa, al mismo tiempo que se evitan acciones innecesarias en la maquinaria.

Este trabajo proporciona a los estudiantes una herramienta de aprendizaje práctico. Se implementa en un PLC para controlar las operaciones, una HMI que facilita la interacción con los operadores, un módulo sensor de temperatura que permite ajustar el valor manualmente, un módulo sensor de pH para mantener el valor dentro de un rango óptimo y una Plataforma IoT para la recopilación y análisis de datos en tiempo real.

El marco metodológico detalla los elementos y características que se consideran para la creación del proyecto, como la instrumentación electrónica, la programación en TIA Portal, el diseño de la pantalla HMI y su aplicación en un Raspberry Pi 4. El uso constante de este sistema de control y monitoreo en tiempo real garantiza la optimización del rendimiento y la prolongación de la vida útil de los equipos, lo que reduce el desgaste. La capacidad de observar de inmediato el proceso en cada fase permite una respuesta temprana a los posibles problemas, lo que aumenta la eficiencia y reduce los tiempos de inactividad.

La adquisición y el análisis de datos en tiempo real se facilitan con la integración de la Plataforma IoT, que aloja el sistema de fermentación anaeróbica en la nube. El monitoreo y el control del proceso desde lugares lejanos, así como la pronta detección de errores o desviaciones, son posibles gracias a esta convergencia con la nube. Además, al optimizar la eficiencia global del proceso, brinda una base para llevar a cabo mejoras continuas basadas en el análisis de los datos recopilados.

**Palabras clave:** Controlador Lógico Programable (PLC), fermentación anaeróbica, Plataforma IoT, Interfaz de Usuario Human-Máquina (HMI), automatización, eficiencia, monitoreo en tiempo real.

## ABSTRACT

This project focuses on the design and simulation of the process of a biodigester by combining a Programmable Logic Controller (PLC) and a Human-Machine User Interface (HMI). The main objective is to effective variable automation and monitoring during the anaerobic fermentation process, ensuring accuracy, quality and operational efficiency, while avoiding unnecessary machinery actions.

This work provides students with a practical learning tool. It is implemented in a PLC to control operations, an HMI that facilitates interaction with operators, a temperature sensor module that allows you to adjust the value manually, a pH sensor modulus to keep the value within an optimal range, and an IoT Platform for real-time data collection and analysis.

The methodological framework details the elements and features that are considered for the creation of the project, such as electronic instrumentation, programming in TIA Portal, the design of the HMI screen and its application in a Raspberry Pi 4. The constant use of this real-time control and monitoring system ensures optimized performance and extended service life of the equipment, reducing wear and tear. The ability to immediately observe the process in each phase enables an early response to potential problems, increasing efficiency and reducing downtime.

Real-time data acquisition and analysis is facilitated by the integration of the IoT Platform, which hosts the anaerobic fermentation system in the cloud. Process monitoring and control from remote locations, as well as rapid detection of errors or deviations, are possible thanks to this convergence with the cloud. In addition, by optimizing overall process efficiency, it provides a basis for continuous improvements based on the analysis of the collected data.

**Keywords:** Programmable Logic Controller (PLC), anaerobic fermentation, IoT platform, Human-Machine User Interface (HMI), automation, efficiency, real-time monitoring.

## **Introducción**

Este proyecto se centra en el diseño y simulación del proceso de un biodigestor mediante la combinación de un Controlador Lógico Programable (PLC) y una Interfaz de Usuario Human-Máquina (HMI), cuyo objetivo principal es alcanzar una automatización y supervisión eficaces de las variables durante el proceso de fermentación anaeróbica, garantizando la precisión, calidad y eficiencia operativa.

El proyecto se enfoca en los estudiantes de la carrera de Ingeniería en electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, por la cual se utilizará un sistema que se compone de un PLC que actúa como el dispositivo principal del proceso, coordinando y controlando los diferentes elementos involucrados. Se utilizan sensores para detectar variables clave, como la temperatura del biodigestor al activar la fermentación anaeróbica y el pH del sistema de agitación al mezclar los sustratos con el material biológico presente en el biodigestor. Además, se emplean actuadores para ejecutar acciones, como el inicio del proceso y el control de las variables.

La pantalla HMI actúa como una interfaz intuitiva para que los operadores interactúen con el sistema, permitiéndoles observar la información en tiempo real y realizar modificaciones cuando sea necesario. Además, proporciona una representación gráfica detallada del proceso, mostrando datos relevantes y alarmas.

Las variables se transmitirán a una plataforma IoT, la cual permitirá el monitoreo y control de datos en la nube, así como la recepción de notificaciones en caso de condiciones anormales o problemas en el proceso. También se podrán realizar análisis y optimizaciones basadas en los datos recopilados, lo que ayudará a mejorar la eficiencia y la toma de decisiones.

## **1. Planteamiento del Problema**

### **1.1. Antecedentes**

En la actualidad, la sostenibilidad y la gestión adecuada de los desechos son temas cruciales en el ámbito educativo. Las instituciones educacionales tienen la responsabilidad de preparar a los estudiantes no solo en conocimientos teóricos, sino también en prácticas técnicas que promuevan el cuidado del medio ambiente. Sin embargo, la falta de programas y prácticas técnicas enfocados en la reutilización de desechos orgánicos puede tener consecuencias negativas tanto para el entorno educativo como para la comunidad en general. A pesar de contar con programas académicos que abordan temas de sostenibilidad y medio ambiente, la implementación práctica de estos conocimientos es insuficiente. Por tal ha llevado a proponer, diseñar y simular una práctica que fomente reutilización de sustratos orgánicos.

En este proyecto se busca simular el proceso de un biodigestor mediante la automatización de una de las etapas del proceso utilizando un PLC. El análisis se centra en la etapa de fermentación anaeróbica. En esta etapa, se utilizan el mayor número de sensores y actuadores. La automatización de esta etapa permitiría un mayor control del proceso y un monitoreo en tiempo real del estado del proceso.

### **1.2. Innovación**

#### **1.2.1. Importancia**

El diseño y simulación de un biodigestor utilizando un PLC (Controlador Lógico Programable) y una pantalla HMI (Interfaz Hombre-Máquina) representa un avance significativo en la integración de tecnologías modernas para la gestión sostenible de residuos orgánicos. Esta importancia se puede desglosar en varios aspectos clave que resaltan el valor y la relevancia de esta iniciativa.

El uso de un PLC en el diseño de un biodigestor permite una automatización precisa y eficiente del proceso de fermentación anaeróbica, crucial para la descomposición de la materia orgánica. Según García (2020), la automatización de estos procesos mediante PLC asegura un

control exacto de las variables operativas, como la temperatura y el pH, mejorando así la eficiencia y estabilidad del biodigestor.

La implementación de una pantalla HMI proporciona a los operadores una herramienta intuitiva para interactuar con el sistema. Esto permite el monitoreo en tiempo real de las condiciones del biodigestor y facilita la realización de ajustes necesarios. Zhang (2019) señalan que una HMI bien diseñada mejora significativamente la capacidad de los operadores para gestionar el sistema, reduciendo el tiempo de respuesta ante cualquier eventualidad y mejorando la seguridad operativa.

El desarrollo de biodigestores automatizados contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante la gestión eficiente de residuos orgánicos. La producción de biogás como fuente de energía renovable y el uso del digestato como fertilizante son ejemplos de cómo estos sistemas pueden cerrar el ciclo de los nutrientes y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Según López (2021), los biodigestores automatizados representan una solución viable y ecológica para la gestión de residuos, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero.

### **1.2.2. Alcance**

El proyecto de tesis "Diseño y Simulación de un Biodigestor mediante PLC y Pantalla HMI" está dirigido a estudiantes universitarios, especialmente aquellos enfocados en carreras de ingeniería, ciencias ambientales y biotecnología. El propósito principal de este proyecto es proporcionar a los estudiantes una comprensión práctica y teórica sobre el uso de tecnologías avanzadas para la gestión sostenible de residuos orgánicos.

### **1.3. Justificación**

El proyecto está dirigido a estudiantes universitarios de ingeniería, ciencias ambientales y biotecnología, proporcionando una valiosa oportunidad de aprendizaje práctico. Los estudiantes adquirirán habilidades en programación y uso de PLCs y HMIs, tecnologías ampliamente utilizadas en la industria de la automatización. Además, aprenderán sobre los procesos biológicos subyacentes a la fermentación anaeróbica y su aplicación en la producción de energía renovable. Este enfoque interdisciplinario no solo enriquece la formación académica de los estudiantes, sino que también los prepara para enfrentar desafíos reales en su futura carrera profesional.

La implementación de PLCs y HMIs en el diseño y simulación de biodigestores representa un avance significativo en la tecnología de gestión de residuos. Los PLCs permiten una automatización eficiente y confiable del proceso de fermentación anaeróbica, mientras que las HMIs facilitan la interacción intuitiva entre los operadores y el sistema. Esta integración tecnológica no solo optimiza el rendimiento de los biodigestores, sino que también permite una respuesta rápida y eficaz ante cualquier problema operativo. La capacidad de monitorear y ajustar las condiciones del proceso en tiempo real mejora la estabilidad y eficiencia del biodigestor, lo que se traduce en una mayor producción de biogás y un mejor manejo de los residuos orgánicos.

Este proyecto promueve la sostenibilidad a través de la aplicación de tecnologías avanzadas en la gestión de residuos orgánicos. Al educar a los estudiantes en estas prácticas, se fomenta una cultura de sostenibilidad y responsabilidad ambiental que puede extenderse a sus futuras profesiones y comunidades. La capacidad de diseñar y simular biodigestores automatizados contribuye a la creación de soluciones sostenibles que pueden ser implementadas a gran escala, beneficiando tanto al medio ambiente como a la sociedad, por lo que su importancia y relevancia trasciende el ámbito universitario.

Finalmente, se proporciona una guía práctica de desarrollo del proyecto que detalla la metodología, los recursos y las herramientas tecnológicas requeridas. El objetivo de esta guía es que los estudiantes puedan aplicar lo que han aprendido para construir un sistema automatizado de control de procesos industriales. Se requiere una licencia de software de programación de PLC y los equipos y herramientas necesarios para la simulación y prueba del sistema. Además, se dispone de los recursos humanos necesarios para llevar a cabo el proyecto

de manera exitosa, ya que cuenta con el apoyo de profesores y personal técnico especializado en el área.

## **1.4. Delimitación**

### **1.4.1. Delimitación Temporal**

El proyecto técnico se efectúa en un tiempo de seis meses a partir de la fecha de aprobación por los miembros de Consejo de la Carrera de Ingeniería Electrónica.

### **1.4.2. Delimitación Espacial**

El proyecto técnico se realiza en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, para ser específicos en el área del laboratorio de automatización 1 ubicada en el campus centenario.

### **1.4.3. Delimitación Académica**

Para este proyecto se toma como referencia lo aprendido en las materias de Automatización tanto I como II, Redes de computadoras II.

## **1.5. Objetivos**

A continuación, se presenta los objetivos tanto general del trabajo de titulación como los objetivos específicos que se determinaron para la presente investigación; parte fundamental para el desarrollo y experimentación de este.

### **1.5.1. Objetivo General**

Diseñar y simular el proceso de un biodigestor, mediante tecnologías como, Controlador lógico Programable (PLC) y Pantalla Interfaz Hombre – Máquina (HMI).

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Desarrollar el software del PLC para implementar algoritmos que permitan regular el proceso de manera óptima.
- Diseñar la interfaz gráfica de la HMI, teniendo en cuenta los requerimientos de usabilidad.
- Simular y Evaluar el funcionamiento del proceso en un módulo del laboratorio de Automatización Industrial, utilizando herramientas de simulación de PLC y HMI.

## **2. Marco teórico referencial**

### **2.1. Biodigestor**

#### **2.1.1. Definición**

Un biodigestor es un sistema diseñado para llevar a cabo la biodigestión, un proceso biológico mediante el cual la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) y un residuo líquido y sólido conocido como digestato. Este proceso es fundamental para la gestión sostenible de residuos orgánicos y la producción de energía renovable (Achinas, 2020).

Un digestor de desechos orgánicos, también conocido como biodigestor, está diseñado de forma sencilla, es un contenedor cerrado, hermético e impermeable conocido como reactor, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar excrementos de animales, humanos y desechos vegetales (no se incluyen los cítricos porque se acidifican) en una dilución de agua para que se produzca el gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno y fósforo. (Gholami, 2021)

Además, el sistema puede incluir un dispositivo para captar y almacenar biogás, una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor y cámaras de hidrogenación y postratamiento (filtro, piedras, algas, secado, etc.) a la salida del reactor. (García, 2020)

#### **2.1.2. Biodigestión**

La biodigestión es una serie de reacciones bioquímicas realizadas por una comunidad de microorganismos en ausencia de oxígeno, donde se transforma la materia orgánica en biogás y digestato Weiland (s.f.). Este proceso se utiliza para el tratamiento de residuos orgánicos y la generación de energía limpia, optimizando el uso de recursos naturales y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. El fenómeno de biodigestión ocurre según López (2021) cuando un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos en los desechos fecales actúa sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal. Estos microorganismos producen una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH<sub>4</sub>) que se conoce como biogás y es extremadamente eficiente si se utiliza como combustible. El proceso produce desechos con una alta concentración de nutrientes y materia orgánica (perfectos como fertilizantes) que se pueden

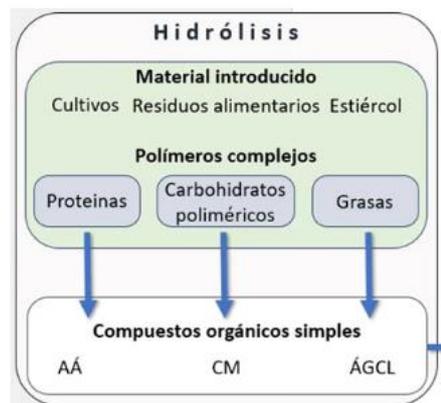
usar frescos, ya que el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas (Waste Management, 2021).

La biodigestión anaeróbica en un biodigestor se desarrolla en varias fases, cada una llevada a cabo por diferentes grupos de microorganismos:

### 2.1.2.1 Fase de Hidrólisis

Las macromoléculas orgánicas, como carbohidratos, proteínas y lípidos, se descomponen en moléculas más simples (monómeros) mediante la acción de enzimas hidrolíticas. Las bacterias hidrolíticas que participan en esta etapa liberan enzimas que descomponen el material por medios bioquímicos (Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022). La siguiente reacción se muestra en la figura 1.

**Figura 1**  
*Hidrólisis genérica.*

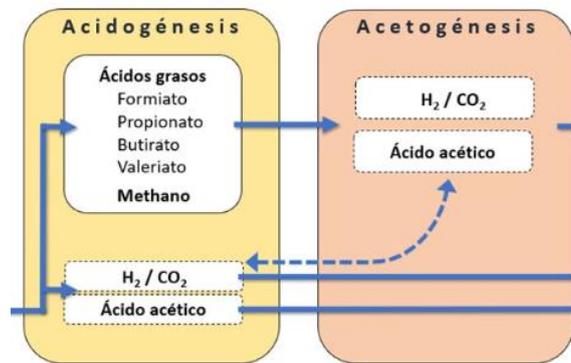


**Nota.** Reacción de hidrólisis genérica (phytobiotics, 2023).

### 2.1.2.2 Fase de acidogénesis-acetogénesis.

Los monómeros resultantes de la hidrólisis son convertidos en ácidos grasos volátiles, alcoholes, dióxido de carbono y otros productos intermedios por bacterias acidogénicas. Los productos de la acidogénesis son transformados en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por bacterias acetogénicas (Waste Management, 2021).

**Figura 2**  
*Reacción de acidogénesis-acetogénesis.*

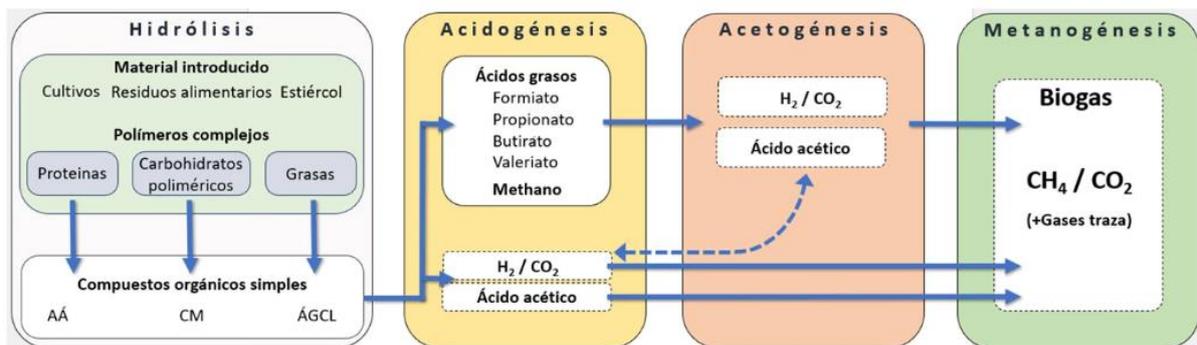


**Nota.** Reacción de acidogénesis-acetogénesis (phytobiotics, 2023).

### 2.1.2.3 Fase de Metanogénesis

Los metanógenos convierten el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano y agua, completando el proceso de producción de biogás (Journal of Cleaner Production, 2023).

**Figura 3**  
*Reacción de total de la reacción anaeróbica.*



**Nota.** Cuatro etapas de la digestión anaeróbica (phytobiotics, 2023).

## 2.2. Tipos de biodigestor

A continuación, se detalla una lista breve de biodigestores desde los más sencillos hasta la última generación de reactores de alta eficiencia, complejidad y costo; se clasificará los biodigestores de acuerdo con la carga soportada y el manejo del sustrato – bioquímicos (ITDG, s.f.).

**Tabla 1**

*Clasificación de los Biodigestores.*

<b>Clasificación</b>	<b>Tipo de Biodigestor</b>
<b>Carga soportada</b>	- Sistema batch o discontinuo - Sistema continuo o semicontinuo
<b>Intensidad de mezclado</b>	- Mezcla completa - Mezcla parcial o nula
<b>Manejo del sustrato</b>	- Contacto anaeróbico - U.A.S.B (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
<b>Manejo bioquímico</b>	- Una etapa - Dos etapas

**Nota.** Ficha técnica biodigestores (ITDG, s.f.).

### 2.2.1 Biodigestores – Carga Soportada

- **Sistema batch o discontinuo:** La cámara del reactor de este tipo de biodigestores está completamente cargada y vaciada. Se cree que se pueden usar en laboratorios y en el proceso de tratamiento de materias vegetales (Journal of Cleaner Production, 2023).
- **Sistema continuo o semicontinuo:** En este tipo de reactor el volumen que ingresa se desplaza en una cantidad unísona que se evacua por la salida. De este modo el volumen del sustrato de la cámara del digestato se mantiene constante (ITDG, s.f.).

### 2.2.2 Biodigestores – Intensidad de mezclado

- **Mezcla completa:** En estos reactores se busca que el sustrato en fermentación este dentro de la cámara y a su vez se esté mezclando de manera constante, diariamente (Waste Management, 2021).
- **Mezcla parcial o nula:** Estos reactores son conocidos por ser pequeños se utilizan en zonas rurales cuyos métodos de agitación son muy rudimentarios

(agitadores de forma manual o la campana gasométrica está en constante rotación) (Gholami, 2021).

### **2.2.3 Biodigestores – Manejo del sustrato**

- **Contacto anaeróbico:** En este reactor se busca retener la mayor cantidad de bacterias activas dentro de la cámara del digestato a fin de que se logre disminuir los tiempos de retención y consecuentemente producir la misma cantidad de biomasa (Gholami, 2021).
- **U.A.S.B (Upflow Anaerobic Sludge Blanket):** Según el significado de sus siglas es un digestor anaeróbico de flujo ascendente contiene en su interior separadores y mamparas ubicadas estratégicamente para que las vinazas se alimenten a través de un falso fondo por donde el flujo se distribuirá uniformemente (Gholami, 2021).

### **2.2.4 Biodigestores – Manejo bioquímico**

- **Una etapa:** Se categorizan a todos los reactores que realizan la digestión anaeróbica en una sola cámara donde las bacterias estarán sometidas a las mismas condiciones (Gholami, 2021).
- **Dos etapas:** Se categorizan a todos los reactores que tengan dos cámaras de digestión anaeróbica, donde la primera cámara realizara la fase de acidogénesis y en la segunda cámara se realizara la fase de acetogénesis y metanogénesis (Gholami, 2021).

## **2.3 Parámetros ambientales y operacionales de la fermentación anaeróbica.**

Para garantizar el óptimo funcionamiento de un biodigestor y maximizar la producción de biogás, es esencial controlar y mantener ciertos parámetros ambientales y operacionales. A continuación, se detallan estos parámetros:

### **2.3.1 Condiciones de temperatura**

La temperatura es una de las variables más cruciales para la biodegradación y la producción de biogás. La digestión anaeróbica ocurre en una amplia gama de temperaturas, que van desde los 15°C hasta los 60°C. Sin embargo, dependiendo del tipo de bacterias que se

adaptan y desarrollan, se deben mantener a temperaturas de 30°C a 60°C para que más bacterias formadoras de metano funcionen de manera óptima (Innovation, 2022).

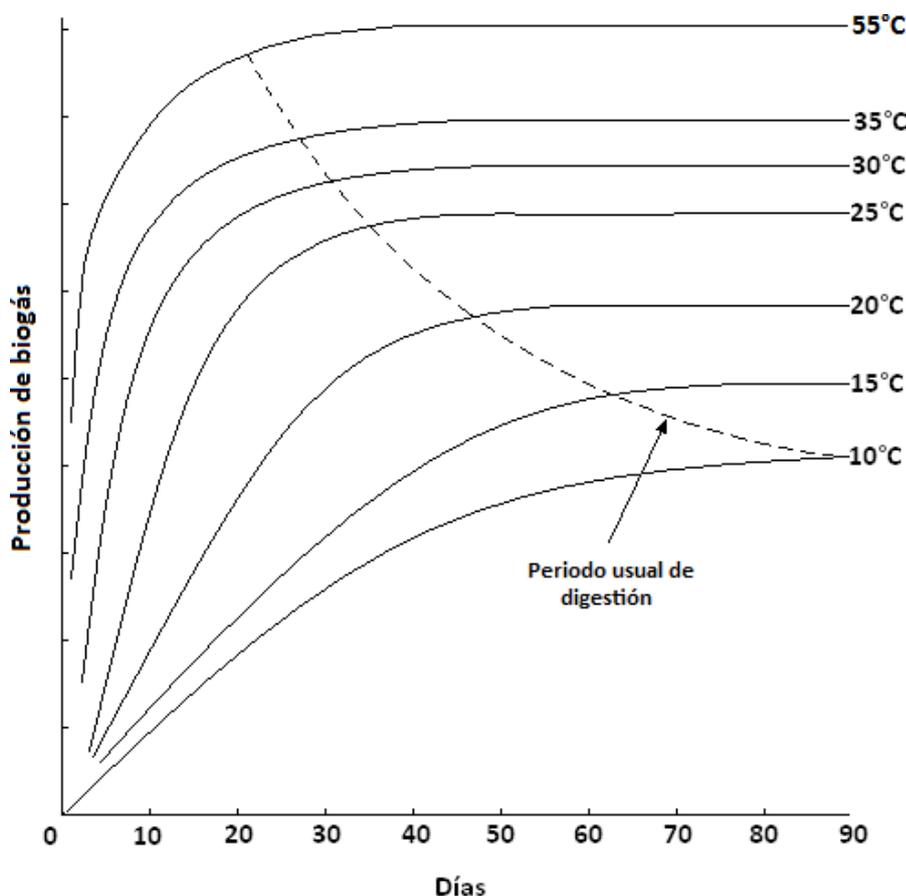
Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen tres rangos de temperatura:

- **Psicrofilico (10-20°C):** Se encuentra activo entre los 10°C y 20°C de temperatura
- **Mesofílica (30-40°C):** Este rango de temperatura es adecuado para la mayoría de los biodigestores y permite una actividad microbiana eficiente.
- **Termofílica (50-60°C):** A temperaturas más altas, la tasa de producción de biogás aumenta, pero requiere un control más preciso y consume más energía.

La temperatura aumenta la actividad biológica y, por lo tanto, la producción de gas. Al mismo tiempo, es importante tener en cuenta que, al no generar calor en el proceso, la temperatura deberá ser alcanzada y mantenida por energía externa (ResearchGate web., s.f.).

#### Figura 4

*Producción de biogás y tiempo de retención para diferentes temperaturas de operación*



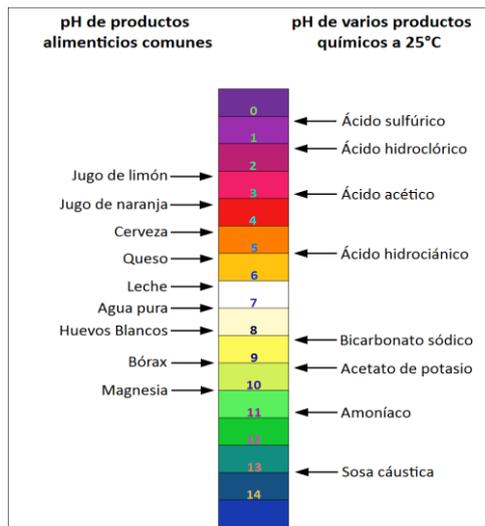
**Nota.** Periodo usual de digestión (ResearchGate web., s.f.).

### 2.3.2 Condiciones del valor de ácidos (pH)

Los organismos que intervienen en cada fase son diversos, y debe establecerse un equilibrio entre la producción de ácidos y su regresión para que ambos tipos de organismos puedan coexistir dentro del biodigestor y encuentren las oportunidades ambientales para su desarrollo (Holm-Nielsen, 2019). El pH de los lodos en digestión indica que la fermentación está siendo realizada en condiciones adecuadas porque, si los organismos productores de metano son inhibidos o destruidos, los ácidos producidos no se degradan y el pH dentro del digestor disminuirá gradualmente (Zhang, 2019). Los microorganismos que producen metano no pueden sobrevivir por debajo del 6.2 pH.

El valor de funcionamiento típico de una planta de biogás es de 7 a 8. El ácido comienza a actuar cuando la planta de biogás comienza a funcionar, reduciendo el pH por debajo de 7. Luego, las bacterias metanogénicas comienzan a utilizar estos ácidos, lo que hace que el pH aumente a neutro. El mismo proceso se utiliza para controlar el nivel de pH en una planta de biogás. Las bacterias producen dióxido de carbono en agua y producen iones de bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$ , lo que hace que la solución sea ligeramente alcalina. La concentración de dióxido de carbono y la concentración de ácidos de la carga inicial determinan la cantidad de bicarbonato presente en la solución (Solé ., s.f.).

**Figura 5**  
*Índices de pH de productos alimenticios y químicos en una temperatura de 25°C.*



**Nota.** Índices de pH de productos alimenticios y químicos en una temperatura de 25°C. (Solé ., s.f.).

## 2.4 El Biogás

### 2.4.1 Definición

El biogás es un gas combustible que se genera a través de la digestión anaeróbica de materia orgánica por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. Este proceso produce una mezcla principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), con pequeñas cantidades de otros gases como sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vapor de agua y trazas de compuestos orgánicos volátiles (Gholami, 2021).

El biogás se considera una fuente de energía renovable y sostenible porque aprovecha los residuos orgánicos, tales como estiércol, residuos agrícolas, residuos sólidos urbanos y aguas residuales, para producir energía y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además de su uso directo como combustible para cocinar y generar calefacción, el biogás puede ser purificado para eliminar impurezas y emplearse como biometano en la generación de electricidad, como combustible para vehículos o inyectarse en la red de gas natural (Achinas, 2020)

### 2.4.2 Composición y características del biogás

El biogás es una mezcla de gases producida por la descomposición anaeróbica de materia orgánica. Su composición principal incluye metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), acompañados de pequeñas cantidades de otros gases como nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), y vapor de agua (Wellinger, 2020).

La tabla a continuación mostrará algunas de las características generales del biogás, donde se destacará las más importantes (Holm-Nielsen, 2019):

- **Inflamabilidad:** La alta proporción de metano hace que el biogás sea altamente inflamable y una excelente fuente de energía.
- **Densidad Energética:** La densidad energética del biogás depende de su contenido de metano, generalmente variando entre 20-25 MJ/m<sup>3</sup>.
- **Impurezas:** La presencia de  $\text{H}_2\text{S}$  y vapor de agua requiere que el biogás sea purificado antes de ser utilizado, especialmente para aplicaciones que requieren alta calidad de gas, como la inyección en la red de gas natural o su uso en vehículos.

- **Uso Directo:** Sin purificación, el biogás puede ser utilizado directamente para la generación de electricidad, calefacción, o como combustible en motores adaptados.
- **Impacto Ambiental:** La producción y uso de biogás contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, ofreciendo una alternativa sostenible a los combustibles fósiles (Appels, Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, 2021)

### 2.4.3 Componentes Principales del Biogás

El biogás es una mezcla de gases producida por la descomposición anaeróbica de materia orgánica. Los componentes principales del biogás incluyen:

- **Metano (CH<sub>4</sub>):** El metano es el componente principal del biogás, representando aproximadamente entre el 50% y el 75% de su composición. Es el principal contribuyente a la capacidad energética del biogás (Appels, Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, 2021)
- **Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>):** El dióxido de carbono constituye entre el 25% y el 50% del biogás. Aunque no contribuye a la capacidad energética del biogás, su presencia es significativa en la composición global (Weiland, s.f.).
- **Nitrógeno (N<sub>2</sub>):** El nitrógeno puede estar presente en cantidades variables, generalmente entre 0% y 10%. No tiene un papel significativo en la combustibilidad del biogás, pero puede influir en la calidad del biogás para ciertas aplicaciones (Weiland, s.f.).
- **Hidrógeno (H<sub>2</sub>):** El hidrógeno se encuentra en pequeñas cantidades, típicamente entre 0% y 1%. Aunque su contribución energética es menor, es un componente importante en la caracterización completa del biogás (Weiland, s.f.).
- **Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S):** El sulfuro de hidrógeno puede variar de 0% a 3%. Es un componente corrosivo y tóxico que debe ser eliminado o reducido antes del uso del biogás en aplicaciones sensibles, como en motores o inyección en la red de gas natural (Weiland, s.f.).
- **Vapor de Agua:** El vapor de agua está presente en el biogás en cantidades que varían según las condiciones de operación y temperatura. La eliminación del

vapor de agua es necesaria para evitar la corrosión y otros problemas en los equipos que utilizan biogás (Weiland, s.f.).

**Tabla 2**

*Composición Química representado en porcentajes del Biogás.*

<i>Composición Típica del Biogás</i>	<i>Porcentaje químico del Biogás</i>
<i>Metano (CH<sub>4</sub>)</i>	50-75%
<i>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</i>	25-50%
<i>Nitrógeno (N<sub>2</sub>)</i>	0-10%
<i>Hidrógeno (H<sub>2</sub>)</i>	0-1%
<i>Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)</i>	0-3%
<i>Vapor de agua</i>	0-10%

**Nota.** Porcentaje químico de la composición típica del biogás (Organization of American States, s.f.).

#### **2.4.4 Usos del Biogás**

El biogás, debido a su composición rica en metano, tiene diversos usos que contribuyen a la sostenibilidad energética y la gestión de residuos (Renewable Energy, 2022). A continuación, se detallan los principales usos del biogás:

- **Generación de Electricidad y Calor:** El biogás se utiliza en motores de cogeneración (CHP, por sus siglas en inglés) para producir simultáneamente electricidad y calor. Este proceso maximiza la eficiencia energética del biogás al aprovechar tanto la energía eléctrica como la térmica (Weiland, s.f.).  
Las plantas de cogeneración pueden abastecer de electricidad a la red y utilizar el calor generado para calefacción local o procesos industriales (Holm-Nielsen, 2019)
- **Combustible para Vehículos:** El biogás puede ser purificado y convertido en biometano, eliminando impurezas como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y vapor de agua. El biometano puede usarse como un sustituto del gas natural en vehículos, reduciendo las emisiones de carbono y dependencia de combustibles fósiles (Ryckebosch, 2019)

- **Inyección en la Red de Gas Natural:** Una vez purificado, el biometano puede ser inyectado en la red de gas natural, proporcionando una fuente de energía renovable compatible con la infraestructura existente de gas natural (Persson, s.f.).
- **Producción de Hidrógeno:** El biogás puede ser reformado para producir hidrógeno, que es un combustible limpio y tiene aplicaciones en celdas de combustible y procesos industriales (Weiland, s.f.).

## 2.5 Control y Automatización

El control y la automatización se refieren al uso de sistemas tecnológicos para operar y gestionar procesos de manera eficiente y precisa sin intervención humana directa. Estos sistemas son fundamentales en diversos sectores industriales, incluyendo la manufactura, la energía, y la gestión de procesos químicos y biológicos (Frontiers in Microbiology, 2022).

El control es el proceso de regular variables de un sistema para que mantengan un comportamiento deseado mediante el uso de retroalimentación. Los sistemas de control utilizan sensores para monitorear el estado de un proceso, controladores para tomar decisiones basadas en esa información, y actuadores para implementar esas decisiones y corregir desviaciones (Dorf). Los sistemas de control pueden ser de lazo abierto o cerrado, siendo los sistemas de lazo cerrado (control de retroalimentación) los más comunes en aplicaciones industriales debido a su capacidad de manejar variaciones y perturbaciones en el proceso (Ogata, s.f.).

La automatización implica el uso de tecnología para ejecutar tareas sin intervención humana, mejorando la eficiencia y reduciendo errores. Incluye el uso de controladores lógicos programables (PLC), sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos), e interfaces hombre-máquina (HMI) que permiten a los operadores monitorear y controlar procesos complejos de manera intuitiva y remota (Bonilla, Tavison, Morales, Guajardo, & Laines, 2022). La automatización puede abarcar desde la operación de una única máquina hasta la gestión completa de una planta industrial.

**Figura 6**

*Componentes de un sistema de control.*



**Nota.** Representación de un sistema de control.

### **2.5.1 Importancia y Aplicaciones**

El control y la automatización son esenciales para la modernización y la competitividad de la industria. Mejoran la precisión, la eficiencia, la seguridad y la calidad de los procesos productivos, permitiendo una mayor consistencia y reducción de costos operativos. En la producción de biogás, por ejemplo, la automatización y el control de parámetros como la temperatura, el pH, y el tiempo de retención pueden optimizar la producción y la calidad del biogás (Wellinger, 2020)

### **2.5.2 Redes de Comunicaciones Industriales**

Las redes de comunicaciones industriales son sistemas especializados diseñados para permitir la transmisión de datos y la comunicación entre dispositivos y sistemas dentro de entornos industriales. Estas redes son esenciales para el control, monitoreo y automatización de procesos industriales, proporcionando una infraestructura robusta, confiable y segura que soporta las operaciones críticas de manufactura y producción (Dorf, s.f.).

- **Controladores Lógicos Programables (PLC):** Dispositivos electrónicos utilizados para automatizar procesos industriales mediante la toma de decisiones en función de las entradas recibidas de sensores y la activación de salidas (Dorf, s.f.).
- **Redes de Campo (Fieldbus):** Protocolos de comunicación que conectan sensores, actuadores y controladores en un entorno industrial. Ejemplos incluyen PROFIBUS, Modbus, y CAN bus. Estas redes permiten la comunicación eficiente y determinista entre dispositivos en tiempo real (Dorf, s.f.).
- **Ethernet Industrial:** Adaptaciones del protocolo Ethernet estándar para entornos industriales, ofreciendo mayor resistencia a interferencias electromagnéticas, temperaturas extremas y vibraciones. Ejemplos incluyen Ethernet/IP, PROFINET y EtherCAT (Dorf, s.f.).

- **Sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos):** Sistemas que proporcionan una interfaz para la supervisión y control de procesos industriales a través de una red. SCADA recoge datos en tiempo real de sensores y dispositivos y permite la supervisión remota (Dorf, s.f.).

### 2.5.3 Pirámide de Automatización

La pirámide de automatización es un modelo conceptual que ilustra la jerarquía de los sistemas de control y gestión en un entorno industrial. Este modelo se utiliza para organizar y comprender las diferentes capas de tecnología y sus respectivas funciones dentro de un sistema de producción automatizado (Gutiérrez Agüero, 2023). Los niveles de la pirámide son los siguientes:

**Figura 7**  
*Pirámide de automatización*



**Nota.** Representación de un sistema de automatización (ITDG, s.f.).

- **Nivel 0 Dispositivos de Campo:** Comprende los dispositivos básicos que interactúan directamente con el proceso físico, como sensores y actuadores. Estos dispositivos capturan datos de procesos y ejecutan acciones físicas basadas en las señales de control. (Sensores de temperatura, interruptores de límite, válvulas, motores.) (ITDG, s.f.).
- **Nivel 1 Controladores Lógicos Programables (PLC):** Incluye los controladores que reciben datos de los dispositivos de campo y ejecutan

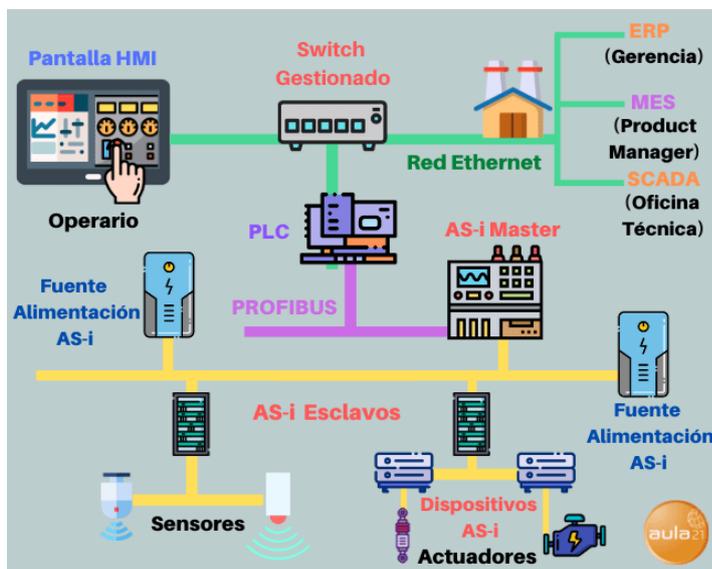
programas de control para gestionar los procesos industriales. Su función es realizar el control secuencial y lógico de maquinaria y procesos (ITDG, s.f.).

- **Nivel 2 Control de Supervisión:** Esta capa está compuesta por sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y HMI (Interfaz Hombre-Máquina), que proporcionan una interfaz para supervisar y controlar los procesos industriales. Su función es monitorear en tiempo real, adquisición de datos, alarmas y control manual (ITDG, s.f.).
- **Nivel 3 Control de Producción y Gestión:** Comprende los sistemas MES (Manufacturing Execution Systems) que gestionan y optimizan las operaciones de producción en tiempo real, planifica la producción, gestión de inventarios, seguimiento de órdenes y mantenimiento. Incluye los sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) que integran y gestionan todas las facetas de una empresa, desde la producción hasta las finanzas y los recursos humanos (ITDG, s.f.).

## 2.6 Redes AS-Interface

AS-Interface (Actuator Sensor Interface) es una red de comunicación industrial de nivel de campo diseñada para la conexión eficiente y económica de sensores y actuadores en entornos automatizados. Esta tecnología estandarizada permite la integración simple y flexible de dispositivos de campo en sistemas de automatización complejos, facilitando la comunicación y el control de equipos en tiempo real (Kester, 2021).

**Figura 8**  
*Red AS-Interface.*



**Nota.** Representación de un proceso de Red AS-Interface (Web Aula 21, s.f.).

## **2.7 TIA Portal**

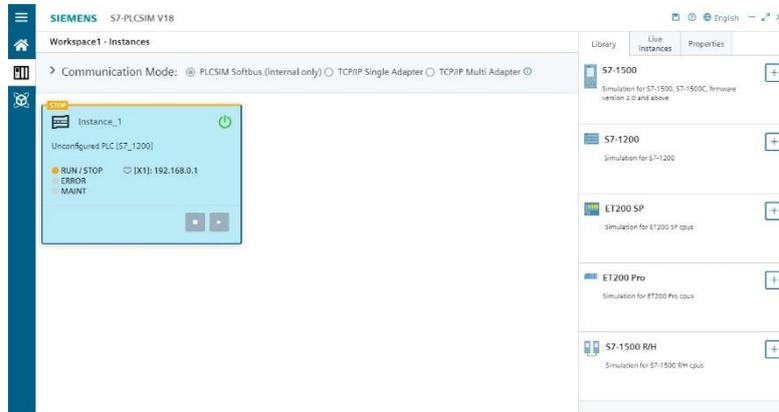
El proyecto se desarrolló en la plataforma de TIA Portal V18 de Siemens para la simulación del sistema de monitoreo y control. Esta herramienta de ingeniería permite desarrollar la programación del controlador PLC S7 1200, la configuración de paneles HMI, así como el establecimiento de comunicación con el analizador de red. Además, permite la conexión a través de su servidor web y, de manera integrada, con el Sistema SCADA. (Obregón Gutiérrez & Moreno Balladares, 2022).

Es un entorno de ingeniería integral desarrollado por Siemens para la configuración, programación, simulación y mantenimiento de sistemas de automatización industrial. Este software proporciona una plataforma unificada para el desarrollo de soluciones de automatización, facilitando la integración de controladores lógicos programables (PLC), interfaces hombre-máquina (HMI), redes de comunicación y sistemas de accionamiento (Obregón Gutiérrez & Moreno Balladares, 2022).

## **2.8 PLC SIM Advanced**

PLC SIM Advanced es un software de simulación desarrollado por Siemens que permite la emulación avanzada de controladores lógicos programables (PLC) en un entorno virtual. Este software está diseñado para facilitar el desarrollo, la prueba y la validación de programas de automatización sin necesidad de hardware físico, ofreciendo una plataforma eficiente y flexible para ingenieros y desarrolladores (Profibus & Profinet International, 2021).

**Figura 9**  
*Panel de control de PLC SIM advanced.*

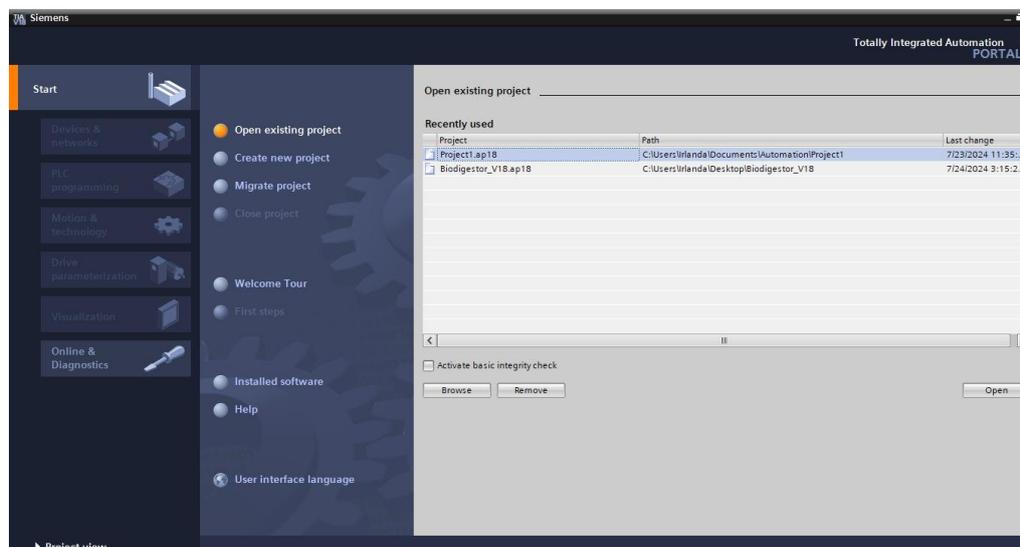


**Nota.** Generando la estación de trabajo simulado - virtual.

## 2.9 Programación PLC

La programación de controladores lógicos programables (PLC) es el proceso de diseñar, escribir y probar secuencias de instrucciones lógicas que son ejecutadas por un PLC para controlar procesos industriales y maquinaria automatizada. Estos dispositivos son fundamentales en la automatización industrial, ya que permiten el control preciso y flexible de sistemas complejos mediante la lógica programada (Profibus & Profinet International, 2021).

**Figura 10**  
*Inicio de TIA PORTAL V18.*



**Nota.** Iniciando la programación en tia portal.

- **Lenguajes de Programación Estandarizados:** La programación de PLC se realiza utilizando lenguajes de programación estandarizados según la norma IEC 61131-3, que incluyen Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Structured Text (ST), Instruction List (IL), y Sequential Function Chart (SFC) (Profibus & Profinet International, 2021).
- **Ladder Diagram (LD):** Es un lenguaje gráfico que representa las operaciones lógicas en forma de diagramas de escalera, similar a los esquemas de relés eléctricos. Es el lenguaje más comúnmente utilizado debido a su facilidad de uso y comprensión visual (Profibus & Profinet International, 2021).
- **Function Block Diagram (FBD):** Este lenguaje gráfico utiliza bloques funcionales predefinidos para representar las operaciones lógicas y aritméticas. Es adecuado para aplicaciones complejas que requieren operaciones matemáticas y lógicas avanzadas (Profibus & Profinet International, 2021).
- **Structured Text (ST):** Es un lenguaje textual de alto nivel similar a Pascal, que permite la programación de algoritmos complejos y operaciones matemáticas detalladas (Profibus & Profinet International, 2021).
- **Instruction List (IL):** Es un lenguaje textual de bajo nivel que utiliza códigos de operación y operandos para realizar operaciones lógicas y aritméticas. Es similar al lenguaje ensamblador (Profibus & Profinet International, 2021).

- **Sequential Function Chart (SFC):** Es un lenguaje gráfico utilizado para representar procesos secuenciales complejos mediante diagramas de flujo que dividen el programa en pasos y transiciones (Profibus & Profinet International, 2021).

## 2.10 Protocolos de Comunicación

- **PROFINET:** Es un protocolo de comunicación industrial basado en Ethernet que permite la integración de dispositivos de automatización y control en una red industrial. Desarrollado por la organización PROFIBUS & PROFINET International (PI), PROFINET está diseñado para proporcionar una comunicación en tiempo real, alta disponibilidad y flexibilidad en la automatización de procesos y manufactura (Profibus & Profinet International, 2021)..

Utiliza la infraestructura de Ethernet para la transmisión de datos, lo que proporciona altas velocidades de comunicación y una amplia compatibilidad con las redes industriales modernas. (Profibus & Profinet International, 2021)

El protocolo soporta diferentes perfiles de tiempo real, incluyendo PROFINET RT (Real-Time) y PROFINET IRT (Isochronous Real-Time), que permiten la comunicación precisa y coordinada de procesos industriales críticos.

- **Modbus:** Es un protocolo de comunicación serial utilizado en redes de automatización industrial para facilitar la comunicación entre dispositivos, como controladores lógicos programables (PLC), sensores y actuadores. Desarrollado originalmente por Modicon en 1979, Modbus se ha convertido en un estándar abierto ampliamente adoptado en la industria para la comunicación de datos en sistemas de control y monitoreo. (Modbus Organization., 2019)
- Organiza los datos en registros y coils (bobinas), permitiendo el acceso a datos en diferentes formatos, como bits, enteros y flotantes. Cada dispositivo en una red Modbus tiene una dirección única que permite la comunicación entre el maestro y los esclavos. El dispositivo maestro inicia las solicitudes de datos y los dispositivos esclavos responden a estas solicitudes (Modbus Organization., 2019).

Modbus es ampliamente utilizado en aplicaciones de control y monitoreo industrial, incluyendo sistemas de automatización de fábricas, plantas de procesamiento y sistemas de energía (Modbus Organization., 2019).

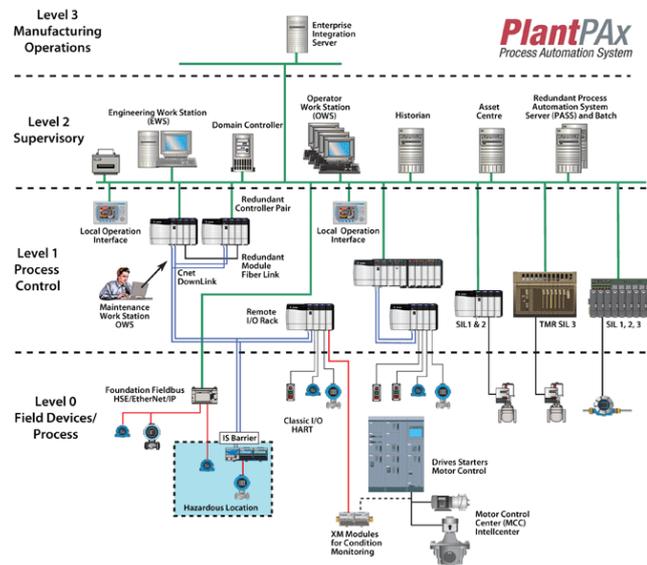
- **Ethernet/IP:** es un protocolo de comunicación industrial basado en Ethernet que facilita la integración y la comunicación entre dispositivos de automatización y sistemas de control en una red de datos. Desarrollado por ODVA (Open DeviceNet Vendors Association), Ethernet/IP se utiliza ampliamente en entornos industriales para proporcionar una comunicación en tiempo real, fiable y flexible. Utiliza la infraestructura de Ethernet para la transmisión de datos, aprovechando la alta velocidad y la capacidad de ancho de banda de las redes Ethernet estándar (ODVA., 2021).

Opera sobre el modelo de referencia TCP/IP y utiliza el protocolo de capa de aplicación Common Industrial Protocol (CIP) para la comunicación entre dispositivos (ODVA., 2021).

## 2.11 Sistemas SCADA

Un Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) es un tipo de sistema de control industrial utilizado para supervisar, controlar y recopilar datos en tiempo real de procesos industriales y de infraestructura. SCADA permite la gestión centralizada de operaciones en diversas industrias, como manufactura, energía, agua y tratamiento de residuos, proporcionando una visión integral y detallada del estado y el rendimiento de los sistemas controlados. (Kester, 2021)

**Figura 11**  
*Representación de un sistema scada.*



**Nota.** Diseño de un sistema Scada (microchipotle, s.f.).

## 2.12 Pantalla HMI

Una Pantalla HMI (Human-Machine Interface) es un dispositivo o software que permite a los operadores interactuar con sistemas de control industrial y procesos automatizados. Actúa como el punto de contacto entre el usuario y el sistema de control, proporcionando una interfaz gráfica que muestra datos en tiempo real, permite el control y la configuración de los sistemas, y facilita la supervisión y la toma de decisiones (Journal of Environmental Management, 2021).

Las pantallas HMI presentan una interfaz gráfica que incluye elementos visuales como gráficos, diagramas, y tableros de control que representan el estado y las variables de los sistemas industriales. Estas interfaces facilitan la comprensión y el manejo de los procesos.

Permiten la interacción en tiempo real con los sistemas de control, permitiendo a los usuarios ingresar comandos, ajustar parámetros y monitorear el estado de los procesos desde la misma interfaz mejorando la eficiencia operativa al proporcionar herramientas para el control directo y la supervisión continua (López Flores, 2019).

**Figura 12**  
*Pantalla HMI*



Nota. Diseño de la pantalla principal del HMI.

### 3. Marco metodológico

Al momento de desarrollar el proyecto se toma en cuenta una metodología estructurada y detallada. Se describirá a continuación la metodología empleada:

#### 2.13 Diseño del sistema del biodigestor

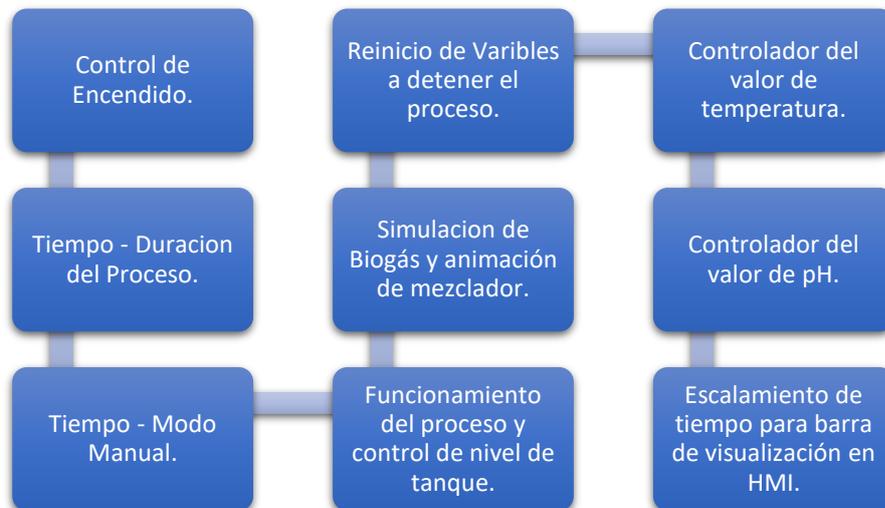
Al inicio de esta etapa, se realizó un análisis de los requisitos y procesos necesarios para el correcto funcionamiento de un biodigestor. En primer lugar, se establecerán los bloques con sus respectivos funcionamientos conforme al emplear el sistema, teniendo en cuenta aspectos como el llenado, digestión anaeróbica y liberación del biogás.

##### 2.13.1 Diagrama de bloques del proceso

Para realizar una secuencia se analizó y realizó un diagrama de bloques del proceso total que lleva a cabo un biodigestor para luego poder plasmarla en la programación del PLC en el software de TIA PORTAL.

#### Figura 13

*Diagrama de bloques.*



**Nota.** Diagrama de bloque sobre el funcionamiento del proceso anaeróbico.

#### 2.14 Programación del PLC

Con el uso del software TIA PORTAL, se crearán los programas y bloques de función esenciales para gestionar los sensores, actuadores y otros elementos del sistema. Se definirán las condiciones, alarmas y protocolos de comunicación necesarios para asegurar un control exacto del proceso de fermentación anaeróbica.

### **2.14.1 Diagrama de conexiones del proyecto.**

En esta práctica se realizan los ajustes iniciales para establecer la comunicación entre el software de programación TIA PORTAL y la Pantalla HMI.

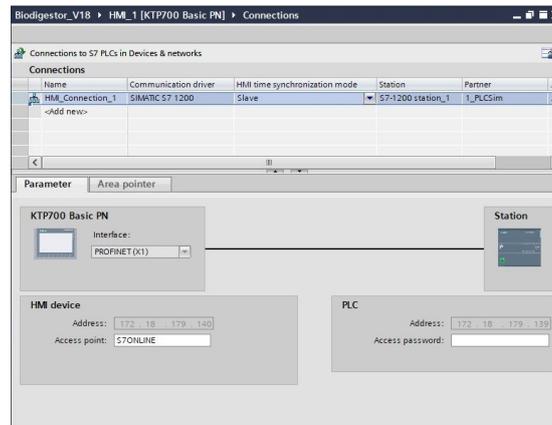
#### **2.14.1.1 Paso 1: Configuración PLC SIM advance y Pantalla HMI**

La comunicación entre un PLC (Controlador Lógico Programable) y una pantalla HMI (Interfaz Hombre-Máquina) es esencial para el control y la supervisión de sistemas automatizados. A continuación, se detallan los componentes y pasos necesarios que se llevó a cabo para poder establecer esta comunicación:

- **Selección del PLC y la HMI:** Se aseguró de que el PLC y la HMI sean compatibles en términos de marca, modelo y capacidades de comunicación. (Siemens S7-1200 PLC y Siemens KTP700 HMI)
- **Protocolo de Comunicación:** Se seleccionó un protocolo de comunicación compatible con ambos dispositivos. Los protocolos comunes incluyen Modbus, Profibus, Profinet, Ethernet/IP, y otros específicos de los fabricantes.
- **Configuración del PLC:** Se asignó y configuro las variables en el PLC que serán monitoreadas y controladas a través de la HMI.
- **Configuración de la HMI:** Se diseñó la interfaz gráfica en el software de la HMI (por ejemplo, WinCC para HMI de Siemens) para mostrar las variables y permitir la interacción del operador. Se vinculó las variables de la HMI con las variables correspondientes en el PLC.

Configuro las alarmas y notificaciones que se mostrarán en la HMI basadas en las condiciones del PLC.

**Figura 14**  
*Configuración PLC con la Pantalla HMI*

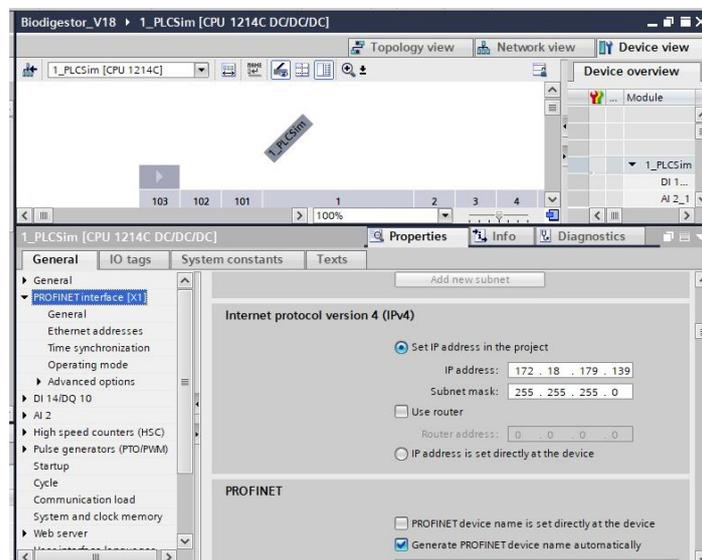


**Nota.** Configurando los bloques Slave - Master.

### 2.14.1.2 Paso 2: Configurar propiedades del controlador

Para poder enlazar el programa con la instancia virtual del plc se debe configurar con el mismo direccionamiento.

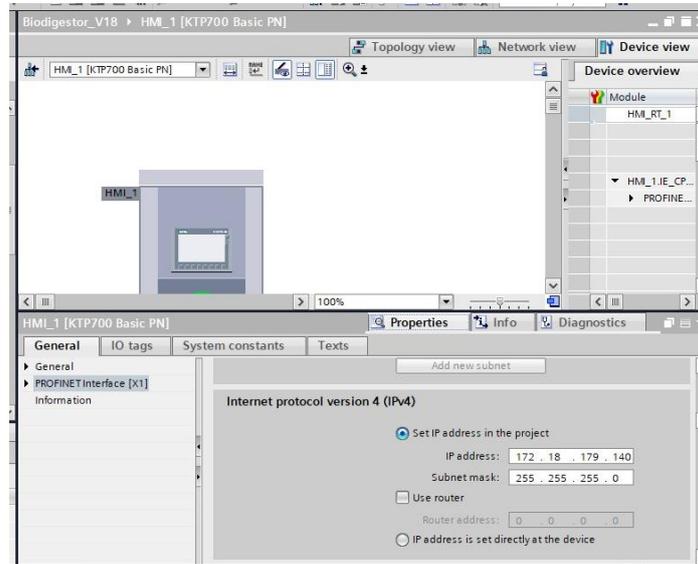
**Figura 15**  
*Configuración de propiedades del PLC.*



**Nota.** Configurando la IP del programa para la comunicación con el PLC.

De igual forma se debe configurar el mismo direccionamiento en el HMI.

**Figura 16.**  
*Configuración de propiedades del HMI.*



**Nota.** Configuración del direccionamiento en el HMI.

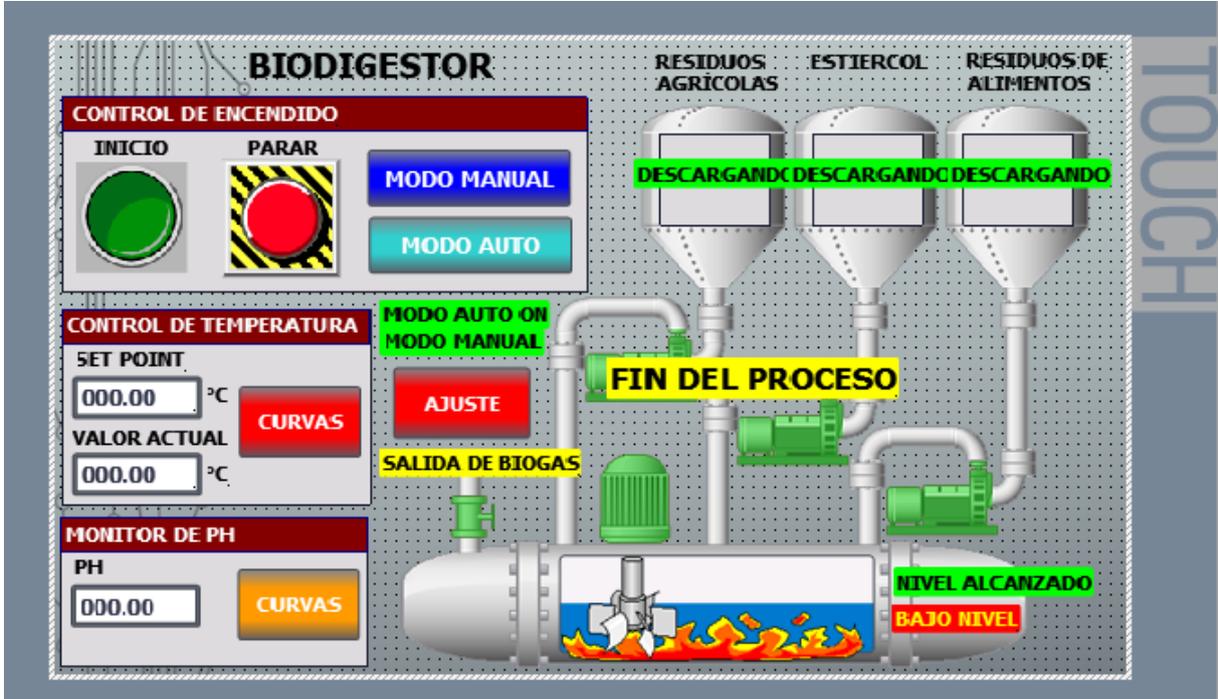
## 2.15 Programación del PLC

En la siguiente práctica se muestra el inicio del proceso de llenado del reactor tanto del HMI como la programación en escalera del sistema.

### 2.15.1.1 HMI: Llenado del reactor

**Figura 17**

*Pantalla HMI al momento de iniciar el proceso.*



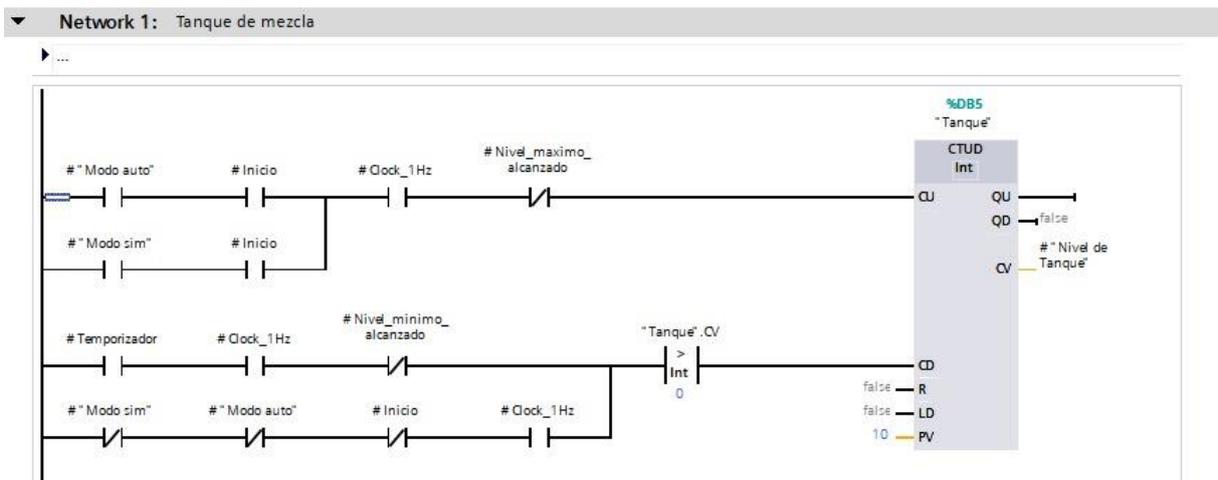
Nota. Pantalla principal del HMI incluyendo realizados en la programación.

### 2.15.1.2 Programación PLC: Inicio del sistema.

Segmento que permite la activación y ejecución primaria del sistema del biodigester.

**Figura 18**

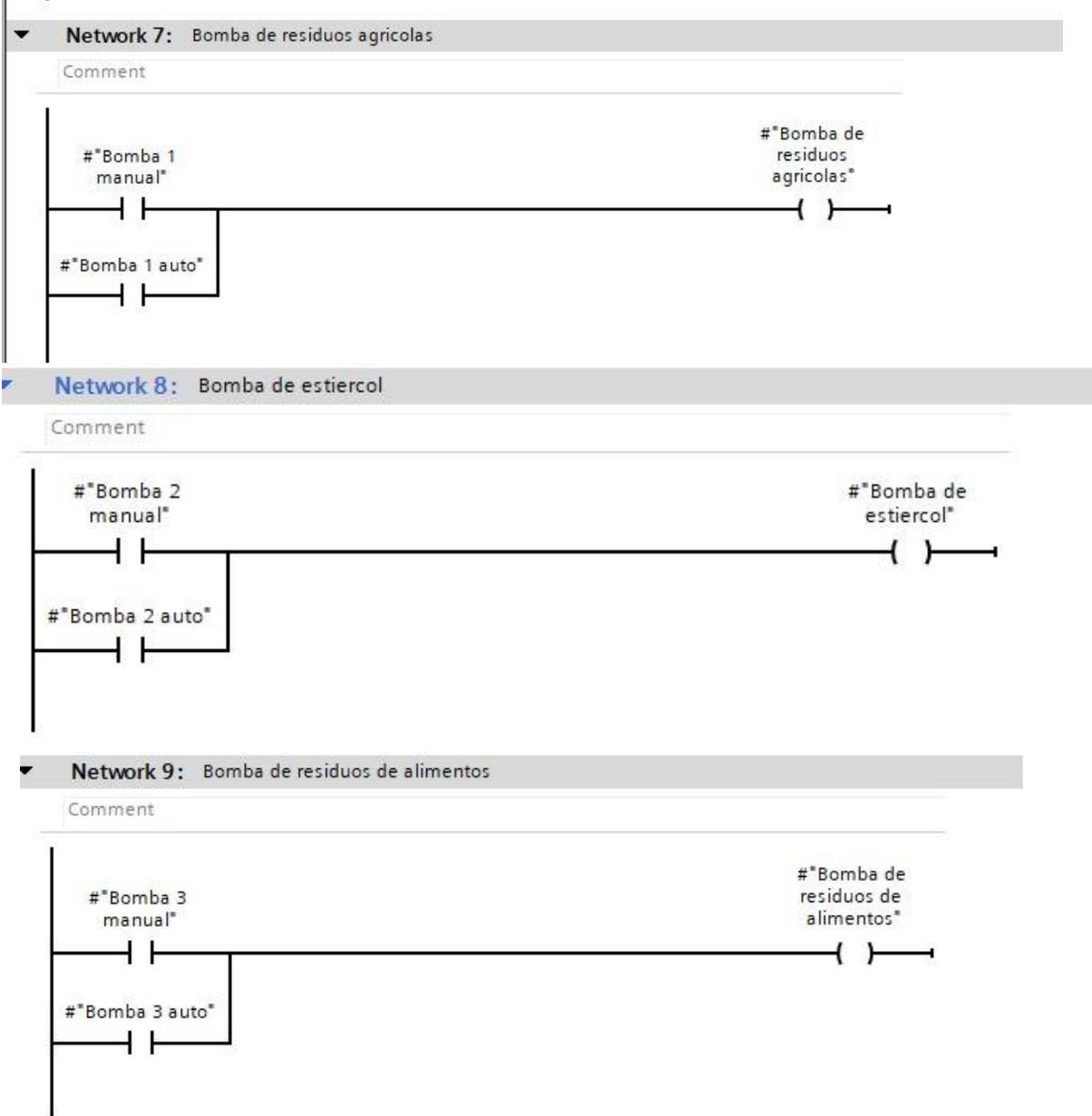
*Programación INICIO - MODO AUTOMATICO.*

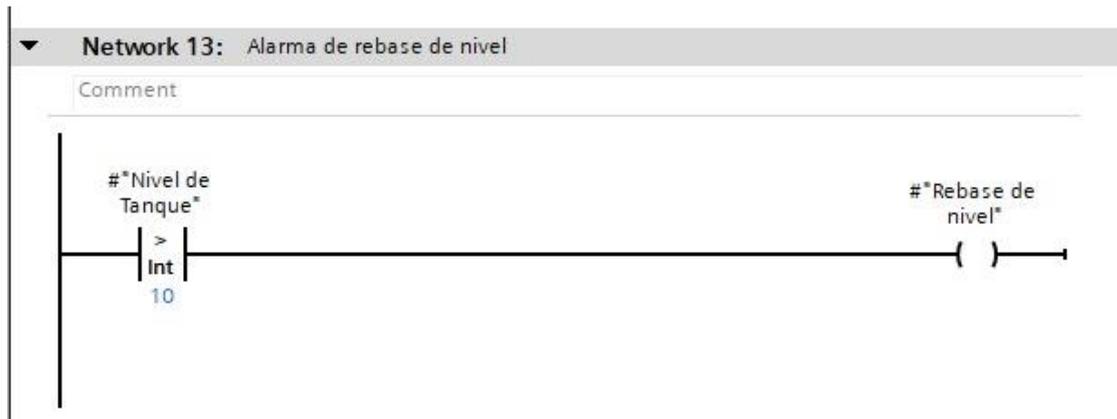


Nota. Implementación de la secuencia de arranque.

Para el desarrollo, se implementó una secuencia de llenado del reactor de forma automática y manual donde se utilizó bloques PID, los cuales controlan la secuencia de cada parte de la etapa de llenado tal y como aparece en la figura 18.

**Figura 19**  
*Alimentadores del reactor principal.*

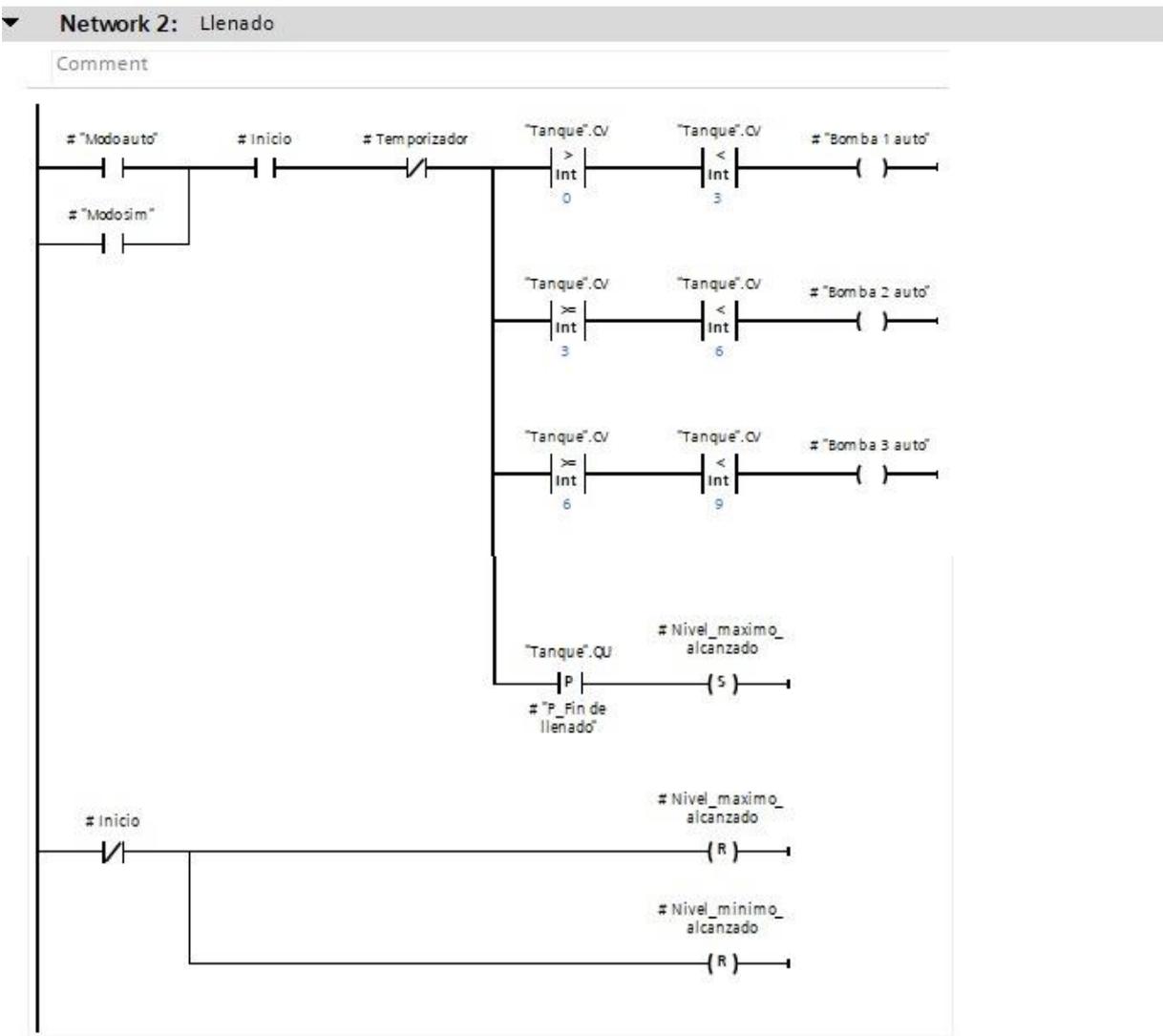




Nota. Configuración del proceso del llenado y nivel del tanque principal.

En esta etapa del proceso se configuro un llenado automático desde los 3 tanques externos en un intervalo de tiempo respetando el almacenamiento del biodigestor principal, si este llegase a sobrepasar el nivel de almacenado se descargará de forma automática como protocolo de seguridad.

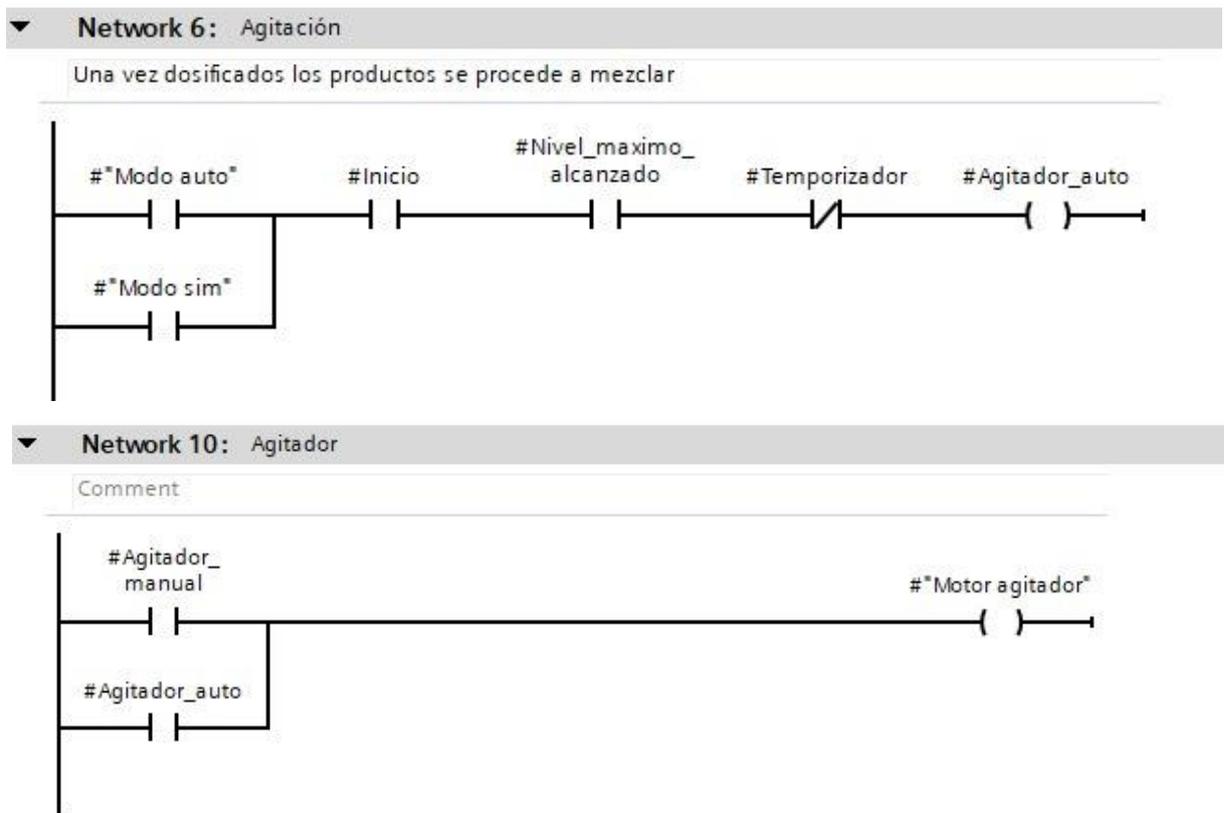
**Figura 20.**  
*Secuencia de Llenado*



Nota. Llenado del tanque del biodigestor.

Para el desarrollo de cada etapa del proceso tanto de forma manual como de forma automática, el llenado se consideró un intervalo de tiempo según lo proporcione el operador, esta se envía directamente la variable y se convierte en milisegundos. Una vez convertido a milisegundos el proceso continuo.

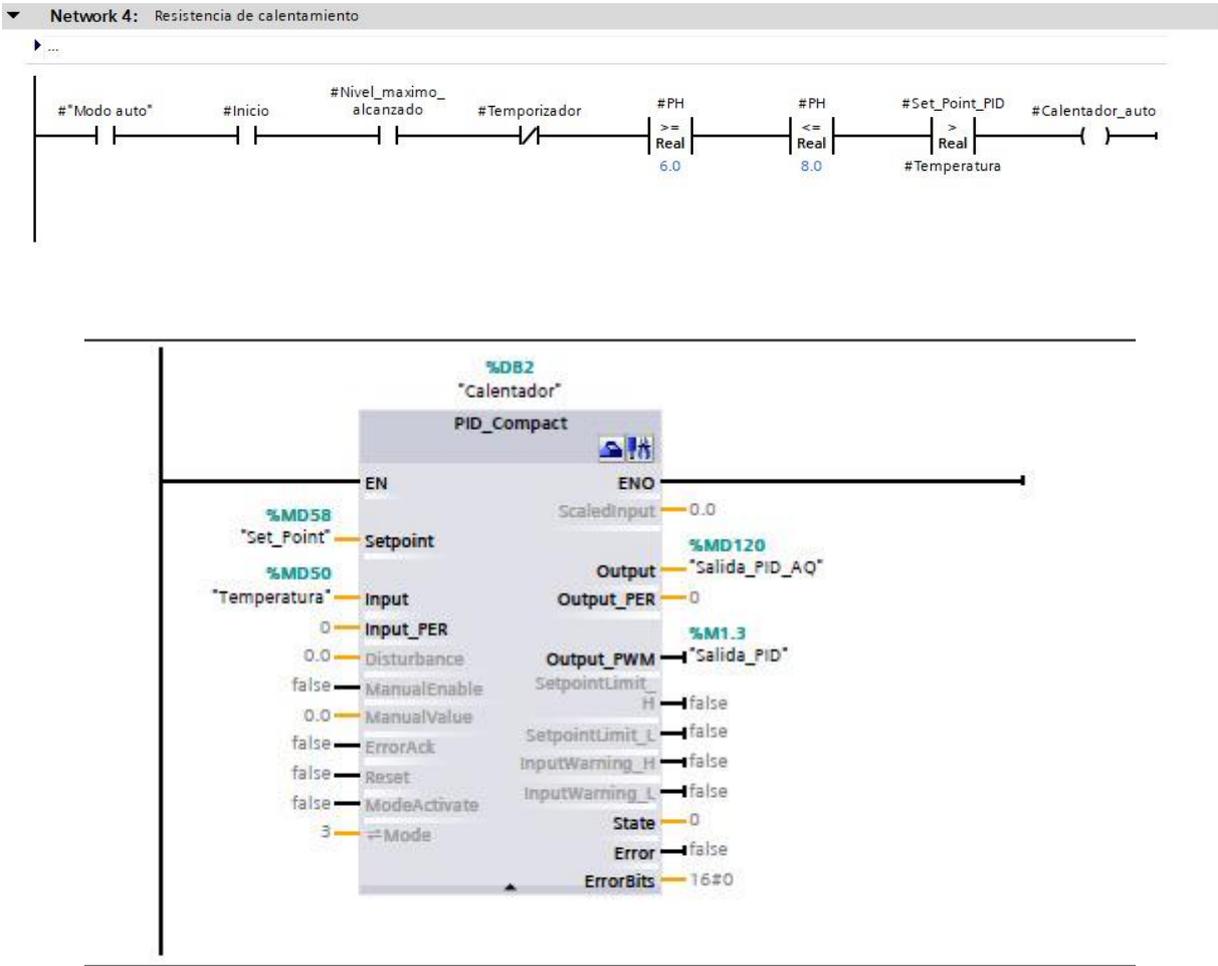
**Figura 21**  
*Agitador y Agitación.*



Nota. Culminación del llenado del biodigestor e inicio de la agitación del reactor.

Una vez culminada la parte del llenado del biodigestor y este se encuentre en el nivel adecuado se comenzará con la agitación para así poder generar biogás y otros residuos reutilizables.

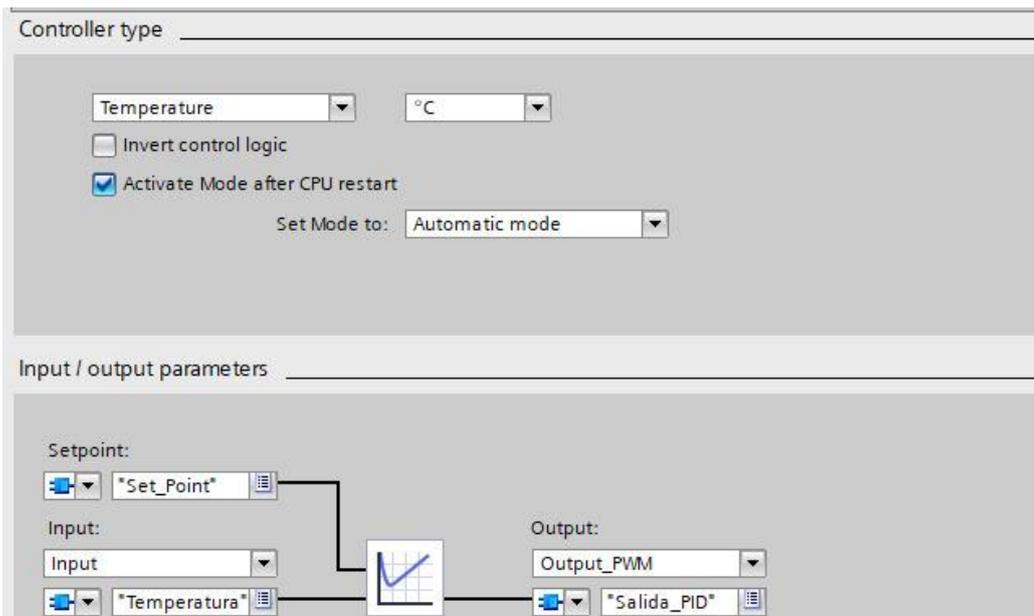
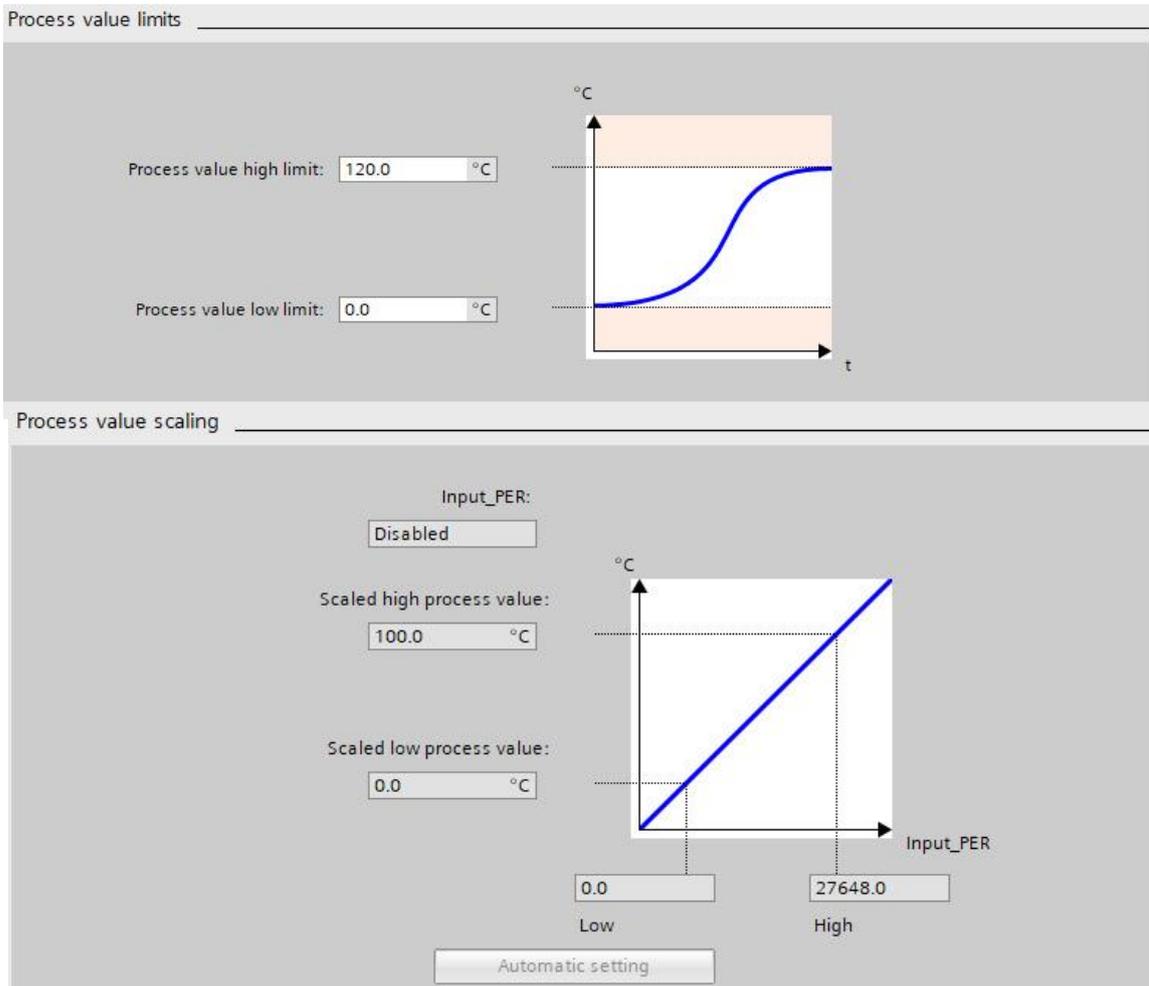
**Figura 22.**  
*Controlador de Temperatura.*



**Nota.** Bloque PID que controlara la temperatura.

Mientras está el proceso de agitación un bloque PID se encarga de la variable temperatura para poder controlar, graficar y evaluar los datos arrojados por la temperatura y así estar en el rango óptimo de funcionamiento.

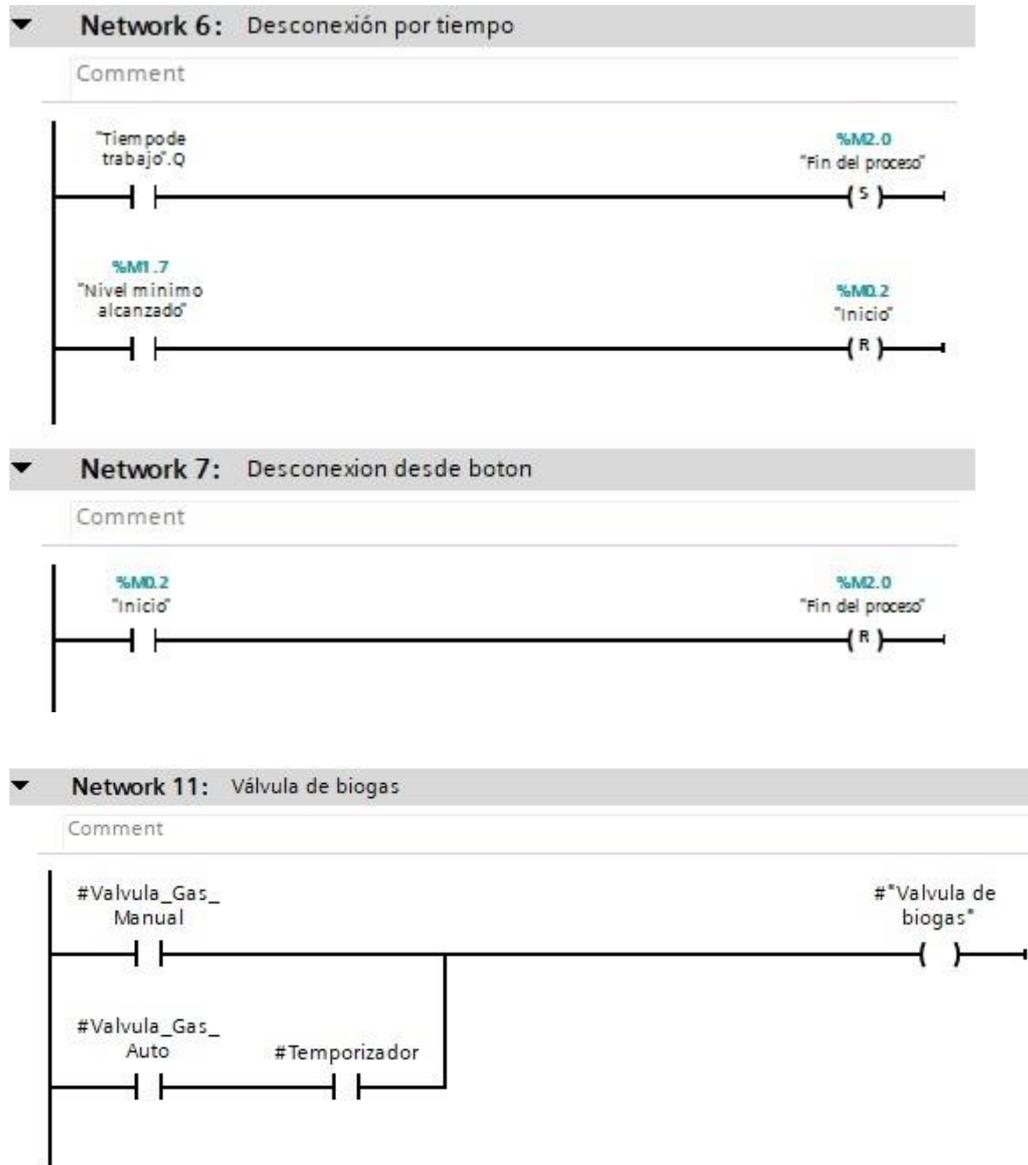
**Figura 23**  
*Configuración del bloque PID de temperatura.*



**Nota.** Configuración del bloque PID.

## Figura 24

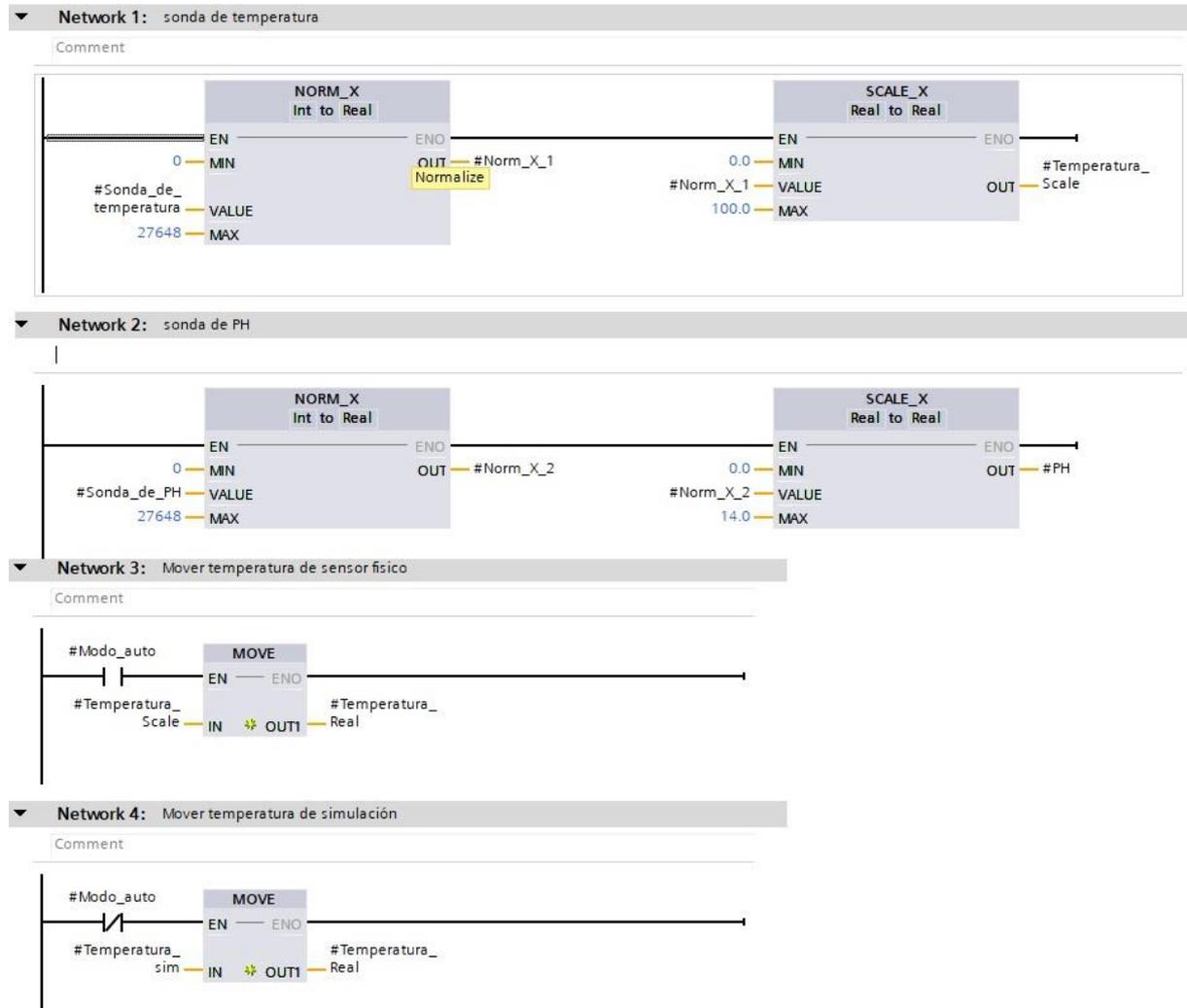
Finalización del Proceso Automático.



**Nota.** Finalización del tiempo del proceso del biodigestor o tanque principal.

Una vez finalizado el tiempo el biodigestor entrara en modo de descanso y comenzara a descargar el biogás y los residuos reutilizables. De igual forma se configuro un botón de emergencia si el operador desea terminar el proceso en cualquier tiempo del funcionamiento del biodigestor, este entrara en modo de reposo y comenzara a descargar.

**Figura 25**  
*Programación INICIO - MANUAL*

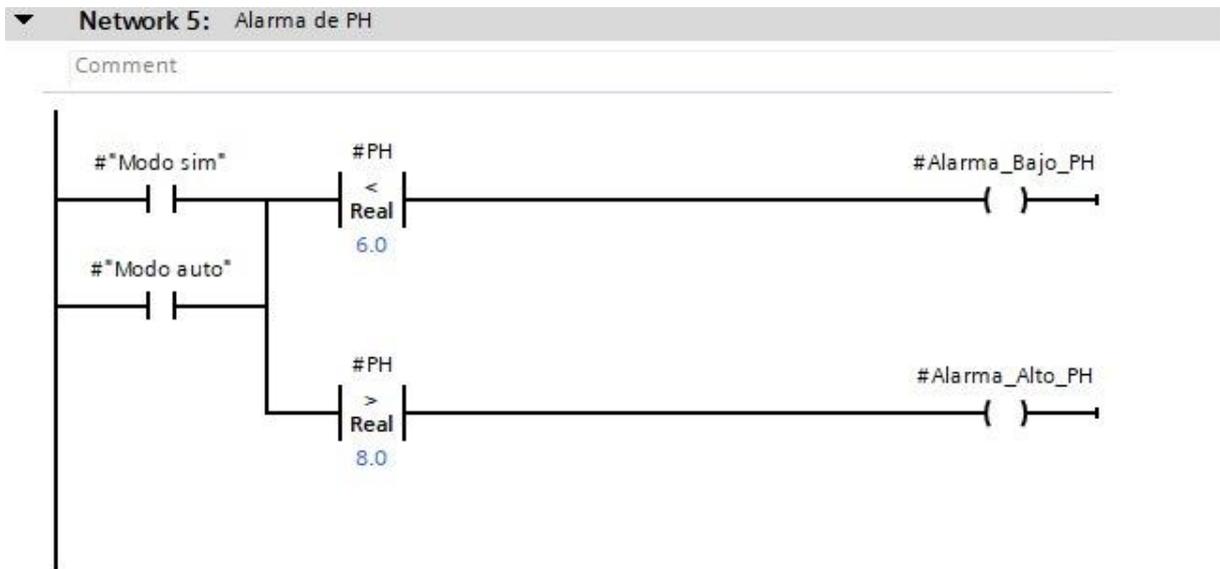


**Nota.** Recepción de las entradas analógicas de la temperatura y el pH.

En esta parte del proceso, el modo manual ofrece variar de forma al operador desea respetando los rangos mínimos configurados con anticipación, en este proyecto se cuenta con una termocupla para poder variar la temperatura y para realizar la gráfica en tiempo real se configuro un bloque PID el cual graficara y mostrara avisos en la pantalla HMI si la temperatura o el pH se encuentra en el rango deseado.

## Figura 26

### Controlador del pH

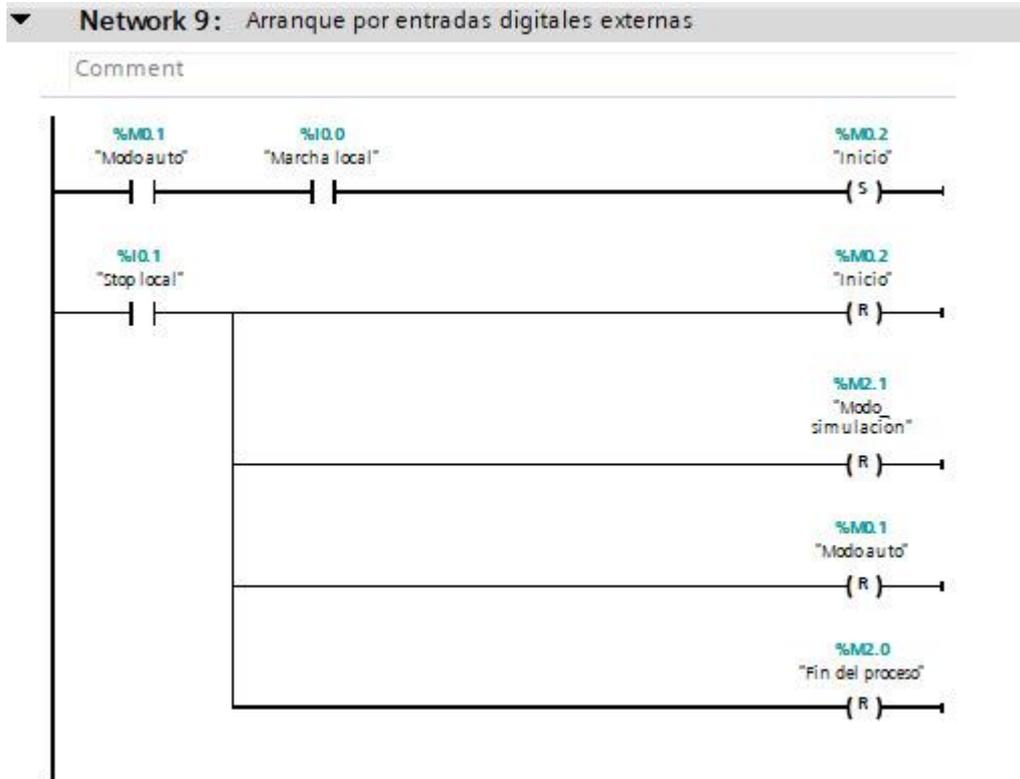


Nota. Alarma del pH cuando llegue al rango máximo y al rango mínimo.

De igual forma mientras este en el proceso de agitación el biodigestor se programó un bloque que controlara, graficara y evaluara los datos arrojados por el pH, pero este valor podrá variar por un potenciómetro del PLC de forma que desee el operador dentro del rango óptimo.

## Figura 27

Arranque por entradas digitales externas.

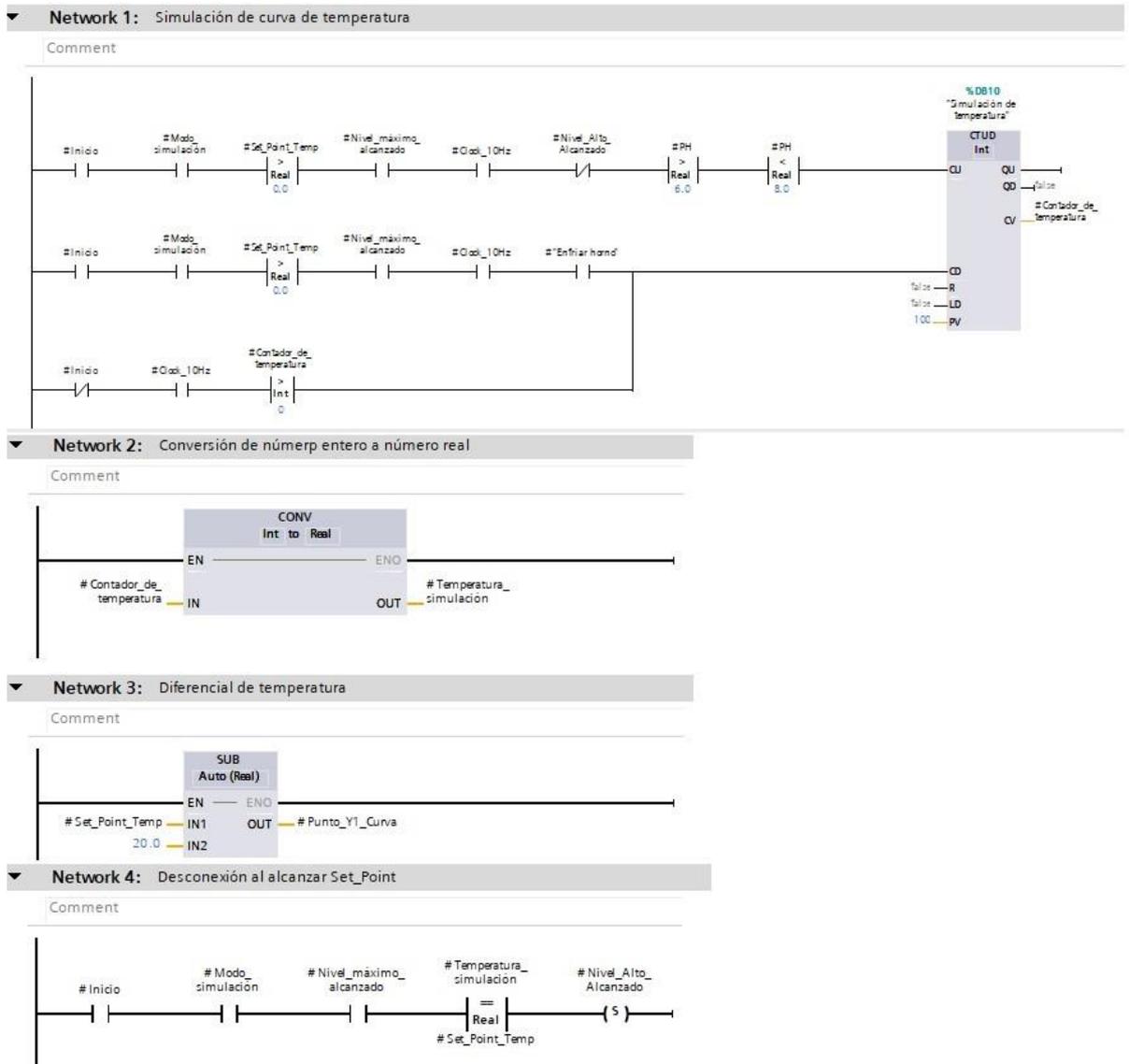


Nota. Obtención de los valores y compilación en el programa del biodigestor.

Una vez obtenido y convertido el valor analógico a digital de la temperatura y el pH se debe enviar el valor dentro del rango establecido para así mostrar los resultados en la pantalla HMI.

## Figura 28

Lectura del valor de Temperatura.

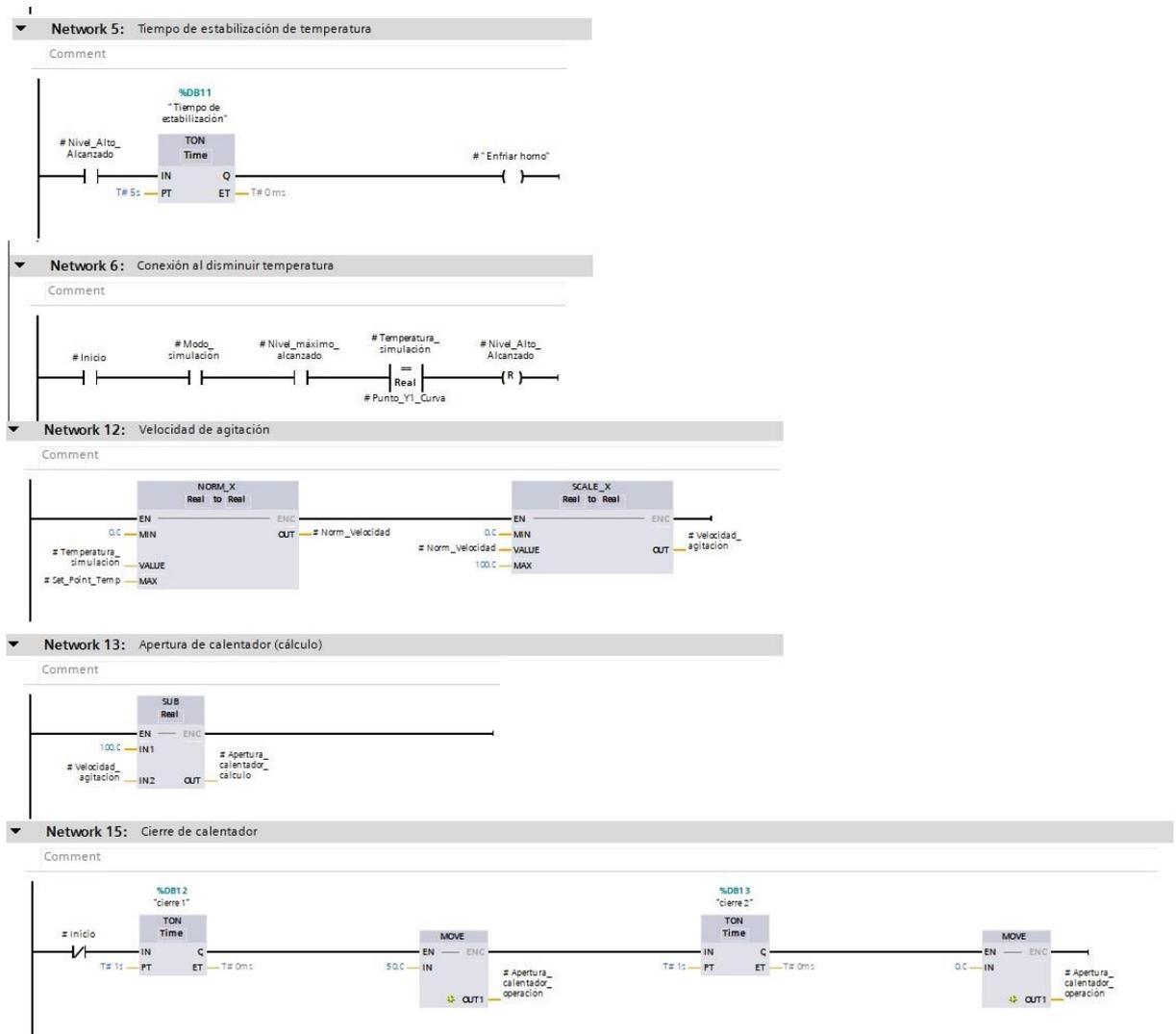


**Nota.** Obtención del valor de temperatura de forma digital y generación de la grafica de temperatura con el rango del setpoint.

Se obtiene del valor analógico de temperatura y a la vez se configura un setpoint (rango máximo de la temperatura), y se configuro una simulación de la gráfica que depende de la variación en tiempo real de la termocupla como temperatura.

## Figura 29

Tiempo de estabilización de Temperatura.

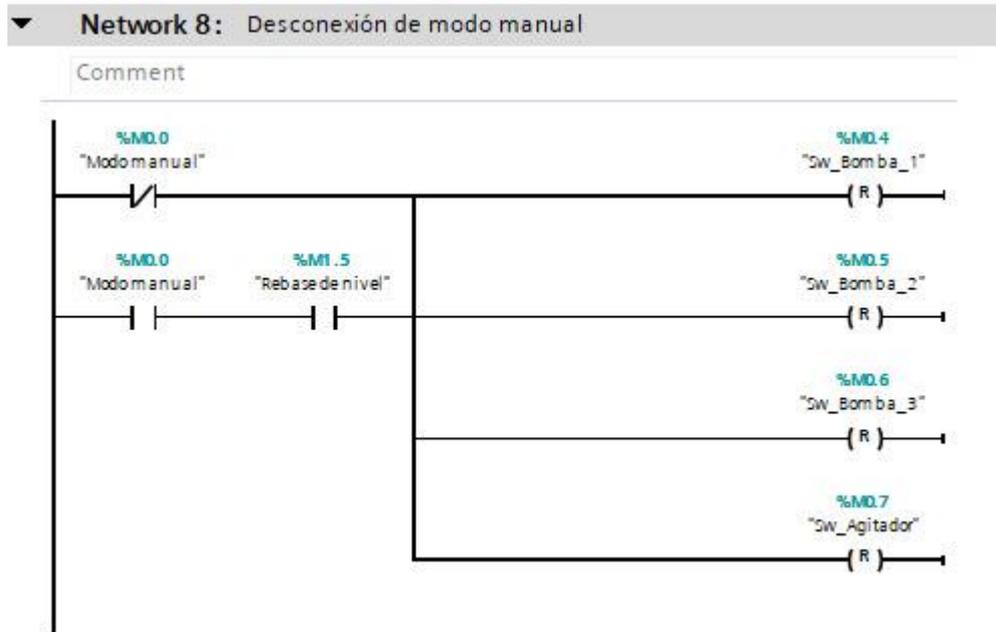


Nota. Configuración del HMI para mostrar los valores en tiempo real de la temperatura.

Una vez se obtenga los valores y la variación de la temperatura se configura en la pantalla HMI un aviso en el biodigestor para que el operador tenga conocimiento cuando la temperatura este en un nivel alto y cuando la temperatura este en un nivel bajo. De igual forma está configurado el pH saldrá un aviso para que el operador regule y se encuentre dentro del rango óptimo.

### Figura 30

#### Desconexión de Modo Manual



Nota. Finalización del proceso de modo manual.

Una vez finalizado el tiempo el biodigestor entrara en modo de descanso y comenzara a descargar el biogás y los residuos reutilizables. De igual forma se configuro un botón de emergencia si el operador desea terminar el proceso en cualquier tiempo del funcionamiento del biodigestor, este entrara en modo de reposo y comenzara a descargar.

**Figura 31**  
*Tabla de dirección del PLC.*

PLC tags								
	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
1	Sonda de temperatura	Default tag table	Int	%IW64	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Sonda de PH	Default tag table	Int	%IW66	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Temperatura	Default tag table	Real	%MD50	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	PH	Default tag table	Real	%MD54	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Set_Point	Default tag table	Real	%MD58	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Modo manual	Default tag table	Bool	%M0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Modo auto	Default tag table	Bool	%M0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Inicio	Default tag table	Bool	%M0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Parada	Default tag table	Bool	%M0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Sw_Bomba_1	Default tag table	Bool	%M0.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Sw_Bomba_2	Default tag table	Bool	%M0.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Sw_Bomba_3	Default tag table	Bool	%M0.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Sw_Agitador	Default tag table	Bool	%M0.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Sw_Valvula	Default tag table	Bool	%M1.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Sw_Calentador	Default tag table	Bool	%M1.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	Clock_1Hz	Default tag table	Bool	%M300.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Salida_PID	Default tag table	Bool	%M1.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	Bomba de residuos agricolas	Default tag table	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	Bomba de estiercol	Default tag table	Bool	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Bomba de residuos de alimentos	Default tag table	Bool	%Q0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	Motor agitador	Default tag table	Bool	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
22	Valvula de biogas	Default tag table	Bool	%Q0.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23	Resistencia de calentamiento	Default tag table	Bool	%Q0.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PLC tags								
	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
25	Nivel de tanque	Default tag table	Int	%MW10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Clock_Byte	Default tag table	Byte	%MB300	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
27	Clock_10Hz	Default tag table	Bool	%M300.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
28	Clock_5Hz	Default tag table	Bool	%M300.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
29	Clock_2.5Hz	Default tag table	Bool	%M300.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
30	Clock_2Hz	Default tag table	Bool	%M300.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
31	Clock_1.25Hz	Default tag table	Bool	%M300.4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
32	Clock_0.625Hz	Default tag table	Bool	%M300.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33	Clock_0.5Hz	Default tag table	Bool	%M300.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
34	Set_Semanas	Default tag table	Time	%MD100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
35	Set_Dias	Default tag table	Time	%MD104	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
36	Set_Horas	Default tag table	Time	%MD108	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
37	Set_Minutos	Default tag table	Time	%MD112	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
38	Set_Segundos	Default tag table	Time	%MD116	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
39	Fin del proceso	Default tag table	Bool	%M2.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
40	Alarma_Bajo_PH	Default tag table	Bool	%Q0.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
41	Alarma_Alto_PH	Default tag table	Bool	%Q0.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
42	Rebase de nivel	Default tag table	Bool	%M1.5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
43	Descargar por reboce	Default tag table	Bool	%M1.6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
44	Marcha local	Default tag table	Bool	%I0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
45	Stop local	Default tag table	Bool	%I0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
46	Nivel minimo alcanzado	Default tag table	Bool	%M1.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
47	Salida_PID_AQ	Default tag table	Real	%MD120	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
48	%Apertura válvula	Default tag table	Int	%MW124	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

PLC tags								
	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
49	Válvula proporcional	Default tag table	Word	%QW80	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
50	Modo_simulación	Default tag table	Bool	%M2.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
51	Temperatura simulacion	Default tag table	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
52	Velocidad de agitación	Default tag table	Real	%MD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
53	Llama baja	Default tag table	Bool	%M2.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
54	Llama alta	Default tag table	Bool	%M2.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
55	Apertura operacion simulacion	Default tag table	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Nota. Variables analógicas y digitales utilizadas en la programación del PLC.

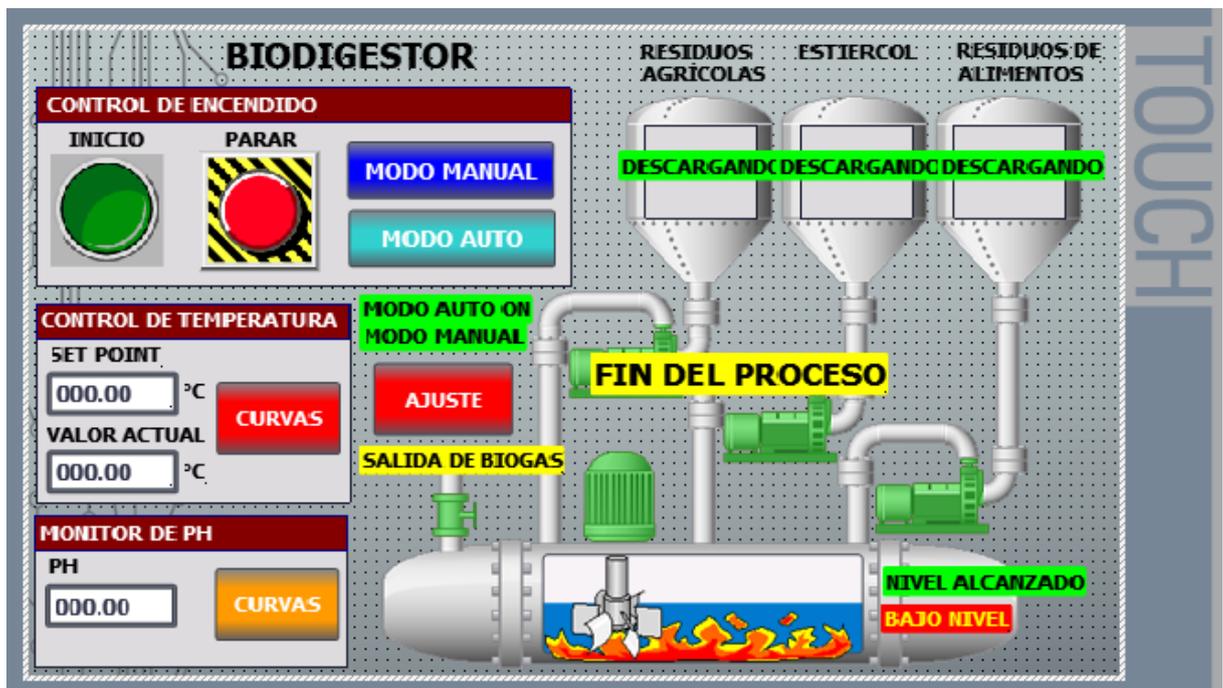
## 2.16 HMI

### 2.16.1 Pantalla principal

En la interfaz de usuario se puede visualizar la cantidad total de imágenes empleadas en el diseño del sistema, además de los mensajes de alerta que se mostrarán cuando sea necesario.

**Figura 32**

*Pantalla principal del HMI.*



Nota. Pantalla principal final del HMI

**Figura 33**  
*Pantalla Secundaria*



Nota. Ingreso del tiempo de la simulación del biodigestor.

A continuación, se hará referencia a la tabla de direccionamiento de variables utilizadas y vinculadas entre la programación del main principal y la configuración de las propiedades de los componentes de la pantalla HMI.

### **2.16.2 Tabla de direccionamiento HMI**

Para el caso de la tabla de direcciones HMI se verifica todas las variables y su enlace con PLC\_1

**Figura 34**

*Tabla de dirección HMI*

HMI tags						
Name	Tag ta...	Data type	Connection	PLC name	PLC tag	
Bomba de residuos agricolas	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Bomba de residuos agricolas"	
Llama baja	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Llama baja"	
Set_Point	HMI	Real	HMI_Connecti...	PLC_1	Set_Point	
Resistencia de calentamiento	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Resistencia de calentamiento"	
Modo manual	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Modo manual"	
Modo_simulación	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Modo_simulación	
Inicio	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Inicio	
Modo auto	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Modo auto"	
Fin del proceso	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Fin del proceso"	
Temperatura	HMI	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	Temperatura	
%Apertura válvula	HMI	Int	HMI_Connection_1	PLC_1	"%Apertura válvula"	
Nivel_máximo_alcanzado	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Nivel_máximo_alcanzado	
Alarma_Alto_PH	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Alarma_Alto_PH	
Alarma_Bajo_PH	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Alarma_Bajo_PH	
Descargar por reboce	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Descargar por reboce"	
Rebase de nivel	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Rebase de nivel"	
Set_Segundos	HMI	Time	HMI_Connection_1	PLC_1	Set_Segundos	
Set_Minutos	HMI	Time	HMI_Connection_1	PLC_1	Set_Minutos	
Set_Horas	HMI	Time	HMI_Connection_1	PLC_1	Set_Horas	
Set_Dias	HMI	Time	HMI_Connection_1	PLC_1	Set_Dias	
Set_Semanas	HMI	Time	HMI_Connection_1	PLC_1	Set_Semanas	
Valvula de biogas	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Valvula de biogas"	

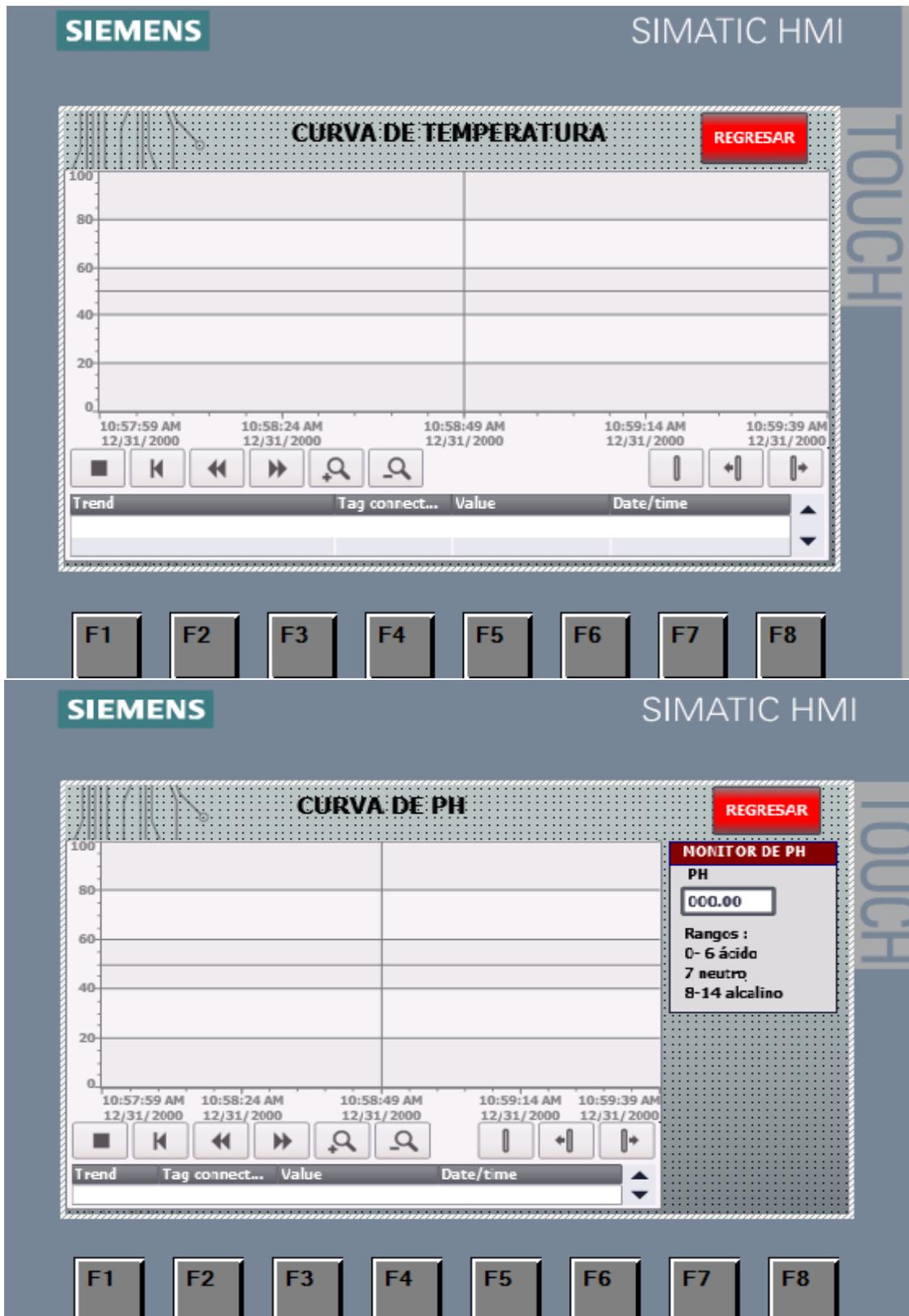
  

HMI tags						
Name	Tag ta...	Data type	Connection	PLC name	PLC tag	
Sw_Bomba_3	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Sw_Bomba_3	
Sw_Bomba_2	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Sw_Bomba_2	
Sw_Bomba_1	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Sw_Bomba_1	
Sw_Agitador	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	Sw_Agitador	
PH	HMI	Real	HMI_Connection_1	PLC_1	PH	
Motor agitador	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Motor agitador"	
Bomba de residuos de alimento	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Bomba de residuos de alim..."	
Bomba de estiercol	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Bomba de estiercol"	
Llama alta	HMI	Bool	HMI_Connection_1	PLC_1	"Llama alta"	
Nivel de tanque	HMI	Int	HMI_Connection_1	PLC_1	"Nivel de tanque"	

**Nota.** Variables utilizadas en la programación del HMI.

Ahora se mostrará el diseño de la pantalla HMI que funcionará como un aviso de mensajes y alertas.

**Figura 35**  
 Pantalla HMI – Grafica de Temperatura y pH.



**Nota.** Curvas de la temperatura y el pH generadas por el bloque PID

### 3.1. RESULTADOS

Para ejecutar un correcto análisis de resultados se deben considerar un análisis de las variables de interés tanto de entrada como salida.

#### 3.1.1. Análisis de Resultados

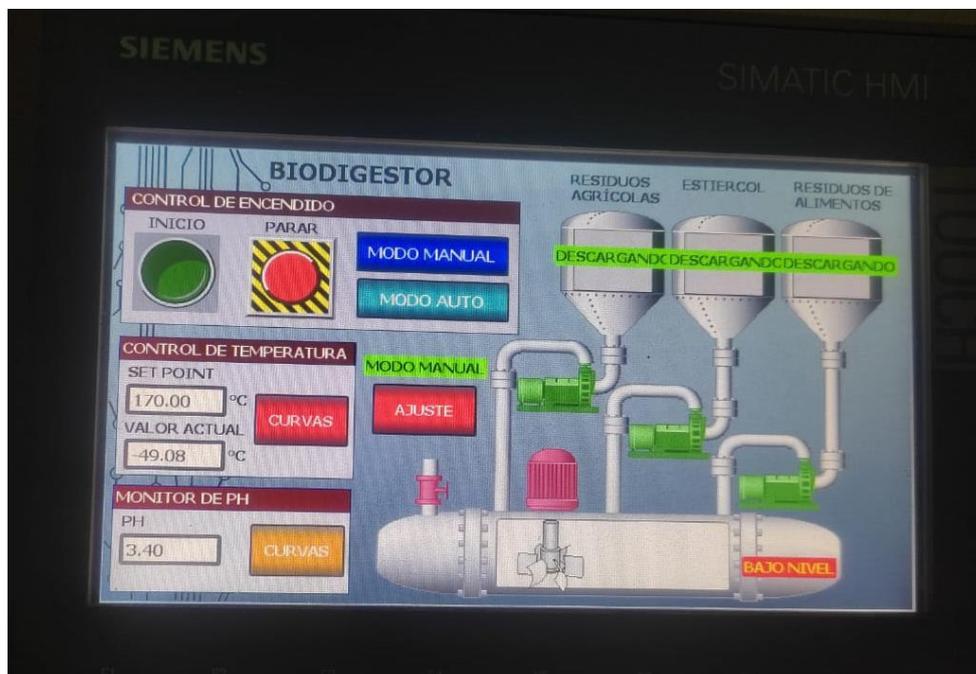
En el análisis de las variables del proceso de la fermentación anaeróbica se dividen en varias variables de entrada y salida en dichos apartados se valida la necesidad de tener un registro de monitoreo en tiempo real para generar datos estadísticos que permitan reducir tiempos no productivos y mantenimientos innecesarios.

##### 3.1.1.1. Inicio del proceso modo automático

El inicio del proceso puede ser iniciado manualmente o automáticamente por un operador, cuando se inicia el proceso de modo automático, se activan las bombas de alimentación para descargar, Una vez descargado se iniciará los sistemas de agitación para mezclar los sustratos con el material.

**Figura 36**

*HMI de inicio del proceso.*



**Nota.** Simulación en modo manual.

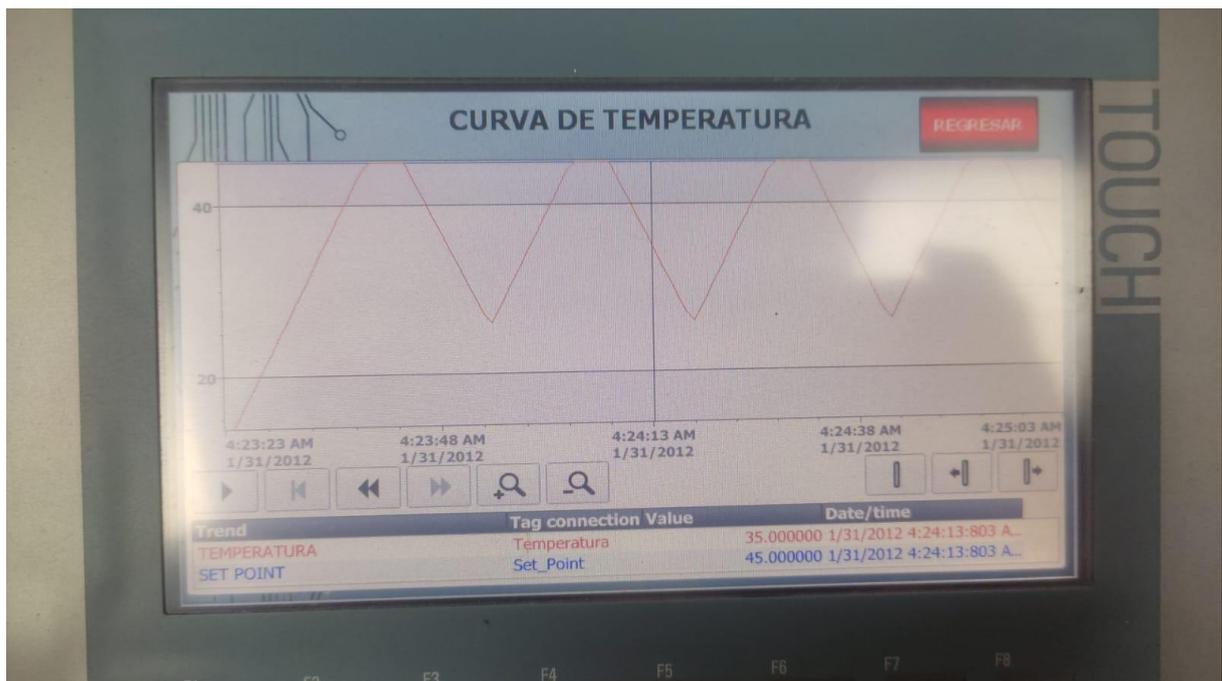
A continuación, se realiza el llenado del reactor y por consiguiente se realiza un análisis de los gráficos obtenidos por la temperatura y pH para poder validar la importancia de registrar los cambios de los parámetros en tiempo real.

### 2.16.2.1 Análisis variable de temperatura

En el gráfico 1 obtenido del software de TIA portal representa el nivel de temperatura que se está variando en tiempo real, se describe una representación visual que ofrece una perspectiva clara y continua de la evolución de este parámetro a lo largo del tiempo. Este gráfico permite observar de manera eficiente las fluctuaciones y cambios de la temperatura dentro del rango establecido para el proceso de fermentación anaeróbica, ofreciendo una instantánea actualizada del estado de producción en tiempo real.

#### Gráfico 1.

*Gráfica de la variable de temperatura.*



Nota. Curva de la temperatura obtenida en modo automático mediante el bloque PID.

El control y monitoreo de la variable "temperatura" es importante por varias razones. En primer lugar, los biodigestores, que descomponen materia orgánica para producir biogás, operan de manera más eficiente a temperaturas específicas. La temperatura ideal varía dependiendo del tipo de biodigestor y del material que se esté digiriendo. Mantener la

temperatura dentro del rango óptimo asegura que el proceso de digestión sea eficiente y que se maximice la producción de biogás.

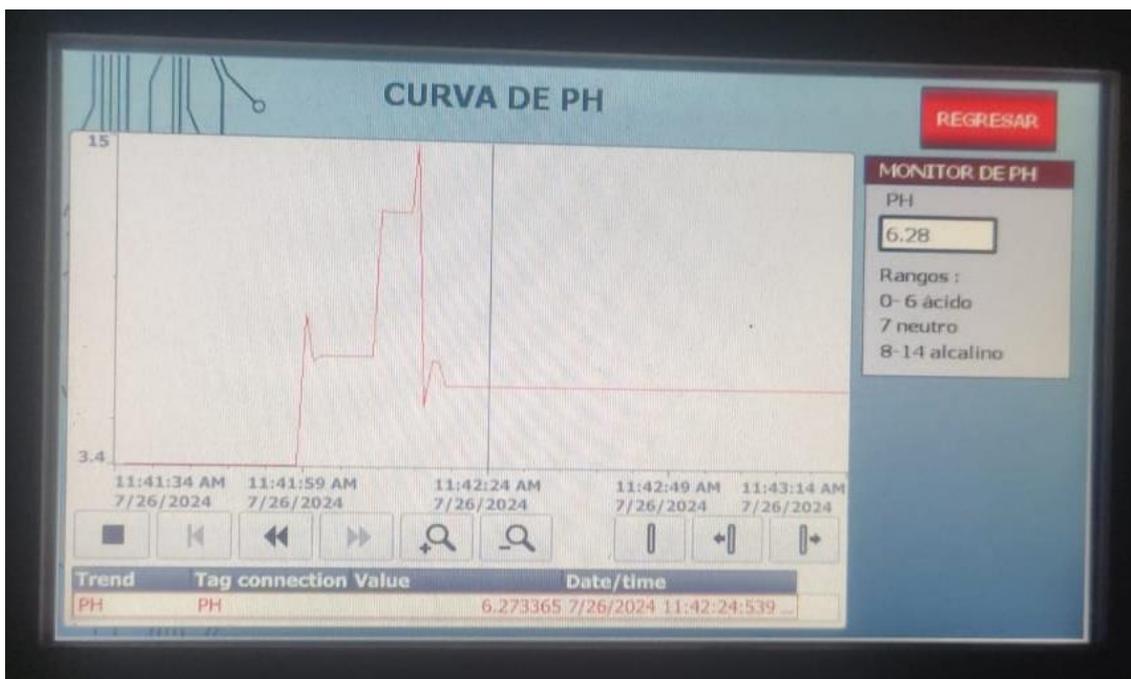
Además, otro aspecto importante es que la temperatura afecta la actividad de los microorganismos responsables de la digestión anaeróbica. Si la temperatura es demasiado alta o demasiado baja, estos microorganismos pueden volverse menos activos o incluso morir, lo que puede disminuir la eficiencia del biodigestor y afectar la calidad del biogás producido.

### 2.16.2.2 Análisis de la variable pH.

En el gráfico 2 obtenido del software de TIA portal representa el nivel de pH que se está variando en tiempo real, se describe una representación visual que ofrece una perspectiva clara y continua de la evolución de este parámetro a lo largo del tiempo.

#### Gráfico 2

Gráfica de la variable de pH.



Nota. Curva del pH obtenida del bloque PID.

El control y monitoreo de la variable "pH" es de importancia debido a que el pH es un indicador crucial del equilibrio ácido-base en el biodigestor. Los microorganismos responsables de la digestión anaeróbica tienen un rango de pH óptimo en el que funcionan mejor, típicamente entre 6.8 y 7.5. Fuera de este rango, la actividad microbiana puede disminuir, afectando la eficiencia del proceso y la producción de biogás.

## 2.17 Modo Manual

El inicio del proceso manual, se activan las bombas de alimentación para descargar, Una vez descargado se iniciará los sistemas de agitación para mezclar los sustratos con el material. Donde empezara a variar la temperatura de acuerdo con la lectura de la termocupla tipo k.

En la siguiente figura 37 se visualiza la simulación usando la termocupla tipo y el de la temperatura en la pantalla HMI que va aumentando y se van registrando en las gráficas según el tiempo transcurrido del control y monitoreo.

### Figura 37.

*Simulación termocupla tipo K.*

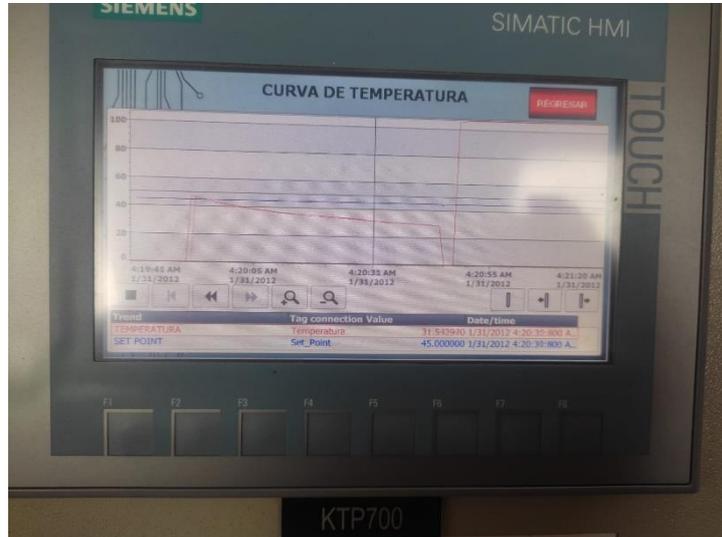


Nota. Variacion de temperatura mediante la entrada analogica utilizando una termocupla tipo K.

En la figura 38 se mostrará los cambios registrados en la pantalla HMI.

**Figura 38**

*Grafica de la temperatura con la termocupla tipo K.*

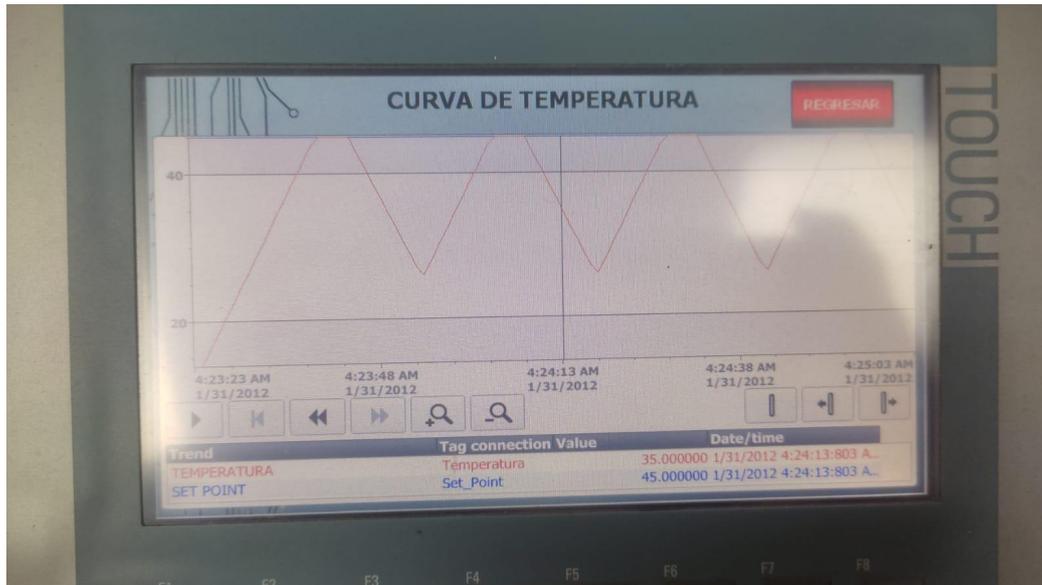


Nota. Curva de la temperatura del proceso manual.

**2.17.1.1 Analisis de la variable de temperatura.**

Se utilizó un bloque OB30 o de interrupción cíclica en el bloque PID debido al tiempo de procesamiento y el tiempo de cálculo, en el bloque PID se tendrá un ajuste de temperatura (setpoint) el cual se configura desde la pantalla HMI, después se mostrará la temperatura captada desde la termocupla transformada desde analógica a digital. La variable de salida del bloque PID es muy importante de escoger que tipo de salida será, como las resistencias de calentamiento son actuadores digitales se utilizará una salida PWM el cual será de tipo intermitente donde el ancho del impulso se volverá más corto a medida que se acercaría a la temperatura real incluyendo como rango máximo al setpoint.

**Gráfico 3.**  
*Variable de temperatura.*



Nota. Grafica arrojada del bloque PID mediante un OB30.

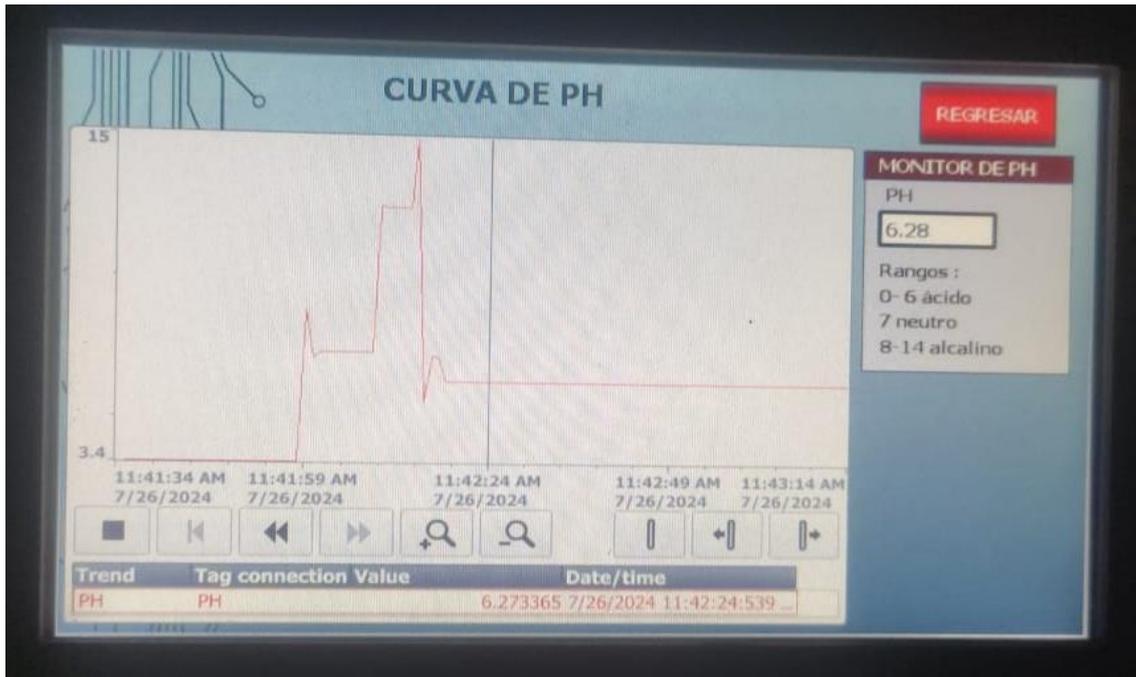
El control y monitoreo preciso de la variable "temperatura" resulta crucial en el proceso del biodigestor por diversas razones. En primer lugar, esta variable proporciona información sobre la eficiencia del proceso. Al observar el aumento y decrecimiento gradual de la temperatura, los personales de supervisión pueden evaluar la velocidad de producción y asegurarse de que el proceso esté funcionando correctamente.

### 2.17.1.2 Análisis de la variable pH.

El gráfico 4 de la variable "pH" es una representación clave en el proceso de agitación, indicando el valor del pH, el cual empezara a variar dentro de un rango estable para evitar cualquier inconveniente que se pueda presentar en el biodigestor.

#### Gráfico 4.

*Gráfico de la variable del pH.*



Nota. Curva del pH arrojada por el bloque PID mediante del OB30.

## **Conclusiones**

El diseño y simulación de un biodigestor mediante la utilización de un Controlador Lógico Programable (PLC) y una Pantalla HMI (Interfaz Hombre-Máquina) representa un avance significativo en la automatización y control de procesos industriales, específicamente en el ámbito de la gestión de residuos orgánicos y la producción de biogás. Esta combinación de tecnologías ofrece numerosas ventajas, que abarcan desde la eficiencia operativa hasta la sostenibilidad ambiental.

En primer lugar, la implementación de un PLC en el sistema de biodigestión proporciona un control preciso y fiable de las diversas variables del proceso, como la temperatura y el pH. Los PLCs son conocidos por su robustez y capacidad para operar en entornos industriales exigentes, lo que asegura una operación continua y sin interrupciones del biodigestor. Además, la programación del PLC permite automatizar tareas repetitivas y ajustar parámetros en tiempo real, lo que optimiza el rendimiento del biodigestor y maximiza la producción de biogás.

La integración de una pantalla HMI en el sistema añade una capa adicional de control y supervisión. El HMI ofrece una interfaz intuitiva y accesible para los operadores, permitiéndoles monitorear el estado del biodigestor y realizar ajustes necesarios de manera eficiente. La capacidad de visualizar datos en tiempo real y recibir alertas sobre posibles anomalías, mejora la capacidad de respuesta y reduce los tiempos de inactividad, lo que a su vez incrementa la productividad del sistema.

Además, la simulación del biodigestor mediante estas tecnologías permite identificar y solucionar problemas antes de la implementación real. La simulación proporciona un entorno seguro para probar diferentes escenarios y ajustes, minimizando el riesgo de fallos durante la operación real. Esta fase de prueba es crucial para optimizar el diseño del sistema y asegurar que todos los componentes funcionen de manera armoniosa.

En términos educativos y de formación, el desarrollo y simulación de un biodigestor con PLC y HMI también ofrece beneficios importantes. Los estudiantes y profesionales en el campo de la ingeniería y la automatización pueden adquirir habilidades prácticas y conocimientos técnicos aplicables a una amplia gama de industrias. Este enfoque práctico en la enseñanza facilita la comprensión de conceptos complejos y prepara a los futuros ingenieros para enfrentar los desafíos del mundo real con soluciones innovadoras.

Finalmente, la conclusión que se puede extraer de este proyecto es que la combinación de PLCs y HMIs en el diseño y simulación de biodigestores no solo mejora la eficiencia y control del proceso, sino que también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental y la educación técnica. La adopción de estas tecnologías es una inversión estratégica que promete beneficios a largo plazo, tanto en términos de productividad industrial como de responsabilidad ecológica.

## **Recomendaciones**

Es importante implementar un sistema de monitoreo en tiempo real que permita supervisar continuamente las variables críticas del proceso, como la temperatura, el pH y la presión. El HMI debe ofrecer una interfaz intuitiva para facilitar la visualización y el control de estos parámetros.

Configurar alarmas y notificaciones que alerten al personal en caso de cualquier desviación de las condiciones óptimas del proceso. Esto permite una respuesta rápida y minimiza el riesgo de fallos y tiempos de inactividad.

Asegúrese de que el diseño del sistema cumpla con todas las normativas de seguridad aplicables. La implementación de sistemas de seguridad redundantes y procedimientos de emergencia es crucial para proteger tanto al personal como al equipo.

Mantenga una documentación detallada de todo el proceso, desde el diseño y la programación hasta la operación y el mantenimiento. Esta documentación es esencial para el diagnóstico de problemas y la formación del personal.

## BIBLIOGRAFÍA

- Achinas, S. A. (2020). A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. *Engineering*, 299-307.
- Appels, L. B. (2021). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 755-781.
- Appels, L. B. (n.d.). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 755-781.
- Bonilla, I., Tavison, A., Morales, M., Guajardo, L. &, & Laines, C. (2022). *IOT, El Internet de las Cosas y la Innovacion de sus Aplicaciones*.
- cursosaula21. (n.d.). *AS-Interface: qué es y cómo funciona*. Retrieved from <https://www.cursosaula21.com/que-es-as-interface/>
- Dorf, R. C. (n.d.). *Modern Control Systems. Pearson 12th ed.*
- Frontiers in Microbiology. (2022). *The Role of Microbial Community Dynamics in Enhancing Anaerobic Digestion Efficiency*. Frontiers in Microbiology.
- García, F. T. (2020). *Automatización de Procesos Biológicos Mediante PLC: Aplicaciones en Biodigestores*. *Journal of Environmental Engineering*, 45(3), 123-135.
- Gholami, A. E.-N. (2021). Biogas production from agricultural residues. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1801-1815.
- Gutiérrez Agüero, E. (2023, 06). *Automatización y monitorización de una línea de producción mediante Factory I/O y TIA Portal con comunicación PROFINET entre PLCs*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/10902/29504>
- Holm-Nielsen, J. B.-P. (2019). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 5478-5484.
- Innovation, E. T. (2022). *Sustainable Biogas Production: Optimization of Anaerobic Digesters for Small-Scale Applications*.
- ITDG. (n.d.). *ITDG*. Retrieved from ITDG.

- Journal of Cleaner Production. (2023). *Improving Biogas Production from Organic Waste: Innovations in Anaerobic Digestion Systems*. Journal of Cleaner Production.
- Journal of Environmental Management. (2021). *Advanced Anaerobic Digestion Technologies for Biogas Production: A Review of Recent Progress*. Journal of Environmental Management.
- Kester, B. (2021). *The SCADA Handbook: Systems for Industrial Control and Monitoring*. Wiley.
- López Flores, M. X. (2019). *Industria 4.0 para la monitorización de un proceso industrial*. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/29852>
- López, R. J. ( 2021). Gestión Sostenible de Residuos Orgánicos: El Rol de los Biodigestores Automatizados. *Environmental Science & Technology*, 48(6), 2145-2156.
- microautomacion. (n.d.). *La automatización industrial es una disciplina de la ingeniería encargada de controlar máquinas o procesos industriales de forma óptima, mejorando la calidad del producto y su productividad*. Retrieved from <https://co.microautomacion.com/es/tec/comando-bimanual-2/>
- Modbus Organization. (2019). *Modbus Protocol Specification*. Retrieved from Modbus Organization.
- Obregón Gutiérrez, J. O., & Moreno Balladares, L. A. ( 2022). *Desarrollo de un sistema de monitoreo de calidad de energía en la planta industrial Rhinoplast empleando internet de las cosas industrial*. Retrieved from <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/57437>
- ODVA. (2021). *Ethernet/IP Technology and Specifications*. Open DeviceNet Vendors Association (ODVA).
- Ogata, K. (n.d.). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall 5th ed.
- Organization of American States. (n.d.). *Organization of American States*. Retrieved from Organization of American States.
- Persson, M. J. (n.d.). Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. *IEA Bioenergy*, 1-36.

- phytobiotics. (2023, 08 01). *phytobiotics*. Retrieved from phytobiotics: [https://www.phytobiotics.com/es\\_eur/noticias/mejora-de-la-eficiencia-economica-de-las-plantas-de-biogas-mediante-el-uso-de-aditivos/](https://www.phytobiotics.com/es_eur/noticias/mejora-de-la-eficiencia-economica-de-las-plantas-de-biogas-mediante-el-uso-de-aditivos/)
- Profibus & Profinet International. (2021). PROFINET: The Open Standard for Industrial Communication. *PROFIBUS & PROFINET International*.
- Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2022). Recent Advances in Anaerobic Digestion Technology: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Renewable Energy. (2022). *Optimization Strategies for Enhanced Methane Production in Anaerobic Digesters*.
- ResearchGate web. (n.d.). *ResearchGate web*. Retrieved from ResearchGate web.: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Produccion-volumetrica-de-biogas-en-funcion-del-tiempo-de-retencion-hidraulico\\_fig1\\_371355502](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Produccion-volumetrica-de-biogas-en-funcion-del-tiempo-de-retencion-hidraulico_fig1_371355502)
- Ryckebosch, E. D. (2019). Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*, 1633-1645.
- Satoshi. (29 de 06 de 2020). *¿Qué es Modbus?* Obtenido de <https://www.opiron.com/que-us-modbus/>
- Solé, A. C. (n.d.). *Instrumentación Industrial*.
- Waste Management. (2021). *Anaerobic Digestion of Organic Wastes: The Impact of Feedstock Quality on Digester Performance*. Waste Management.
- Weiland, P. (n.d.). Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 849-860.
- Wellinger, A. M. (2020). *The biogas handbook: Science, production and applications*. . Woodhead Publishing.
- Zhang, L. (2019). *Enhancing Operator Interaction with HMI in Bioprocesses*. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(7), 541-553.