

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
ADMINISTRATIVAS Y SOCIALES



**Sistema automatizado de un  
invernadero escolar  
usando Internet de las Cosas**

TESIS

que presentan para obtener el grado de

*Ingeniero en Mecatrónica*

**Al López**

**Eder Alberto Gil Bermudez**

DIRECTOR:

Dr. Jesús David Avilés Velázquez

CO-DIRECTOR:

Dra. María Alejandra Rojas Ruiz

TECATE, B.C.

junio 2025



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, ADMINISTRATIVAS Y**  
**SOCIALES**

**Sistema automatizado de un invernadero escolar usando**  
**Internet de las Cosas**


**TESIS**

**que presentan para obtener el grado de Ingeniero en Mecatrónica**

Presentan:


**Al López**  
**Eder Alberto Gil Bermudez**

Aprobada por:




---

Dr. Jesús David Avilés Velázquez.  
Presidente



---

Dra. María Alejandra Rojas Ruiz  
Secretario



---

MI. Claudia Lizeth Márquez Martínez.  
Profesora de Ing. en Mecatrónica



---

Dr. Juan Francisco Flores Reséndiz  
Coordinador del PE de Ing. en  
Mecatrónica

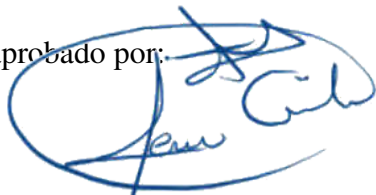
**Tecate, Baja California, junio del 2025.**



**Resumen** de la tesis de **Al López** y **Eder Alberto Gil Bermudez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de INGENIERO EN MECATRÓNICA de la UABC. Tecate Baja California, México, junio del 2025.

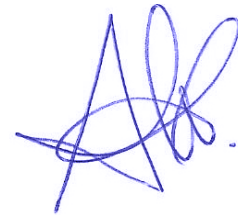
## **Sistema automatizado de un invernadero escolar usando Internet de las Cosas**

Resumen aprobado por:



---

Dr. Jesús David Avilés Velázquez  
Director de Tesis.



---

Dra. María Alejandra Rojas Ruiz  
Co-directora de Tesis.

**Resumen** La agricultura enfrenta actualmente retos significativos relacionados con el cambio climático, la escasez de recursos hídricos y la necesidad de aumentar la productividad de forma sostenible. En este contexto, los invernaderos automatizados se presentan como una solución eficaz para optimizar el uso de recursos y mantener condiciones ambientales controladas. Sin embargo, su implementación en entornos educativos aún es limitada, lo que restringe el desarrollo de competencias prácticas en automatización, Internet de las Cosas (IoT) y sostenibilidad por parte de los estudiantes. Con el objetivo de abordar esta problemática, se desarrolló un sistema automatizado para un invernadero escolar, integrando tecnologías del Internet de las Cosas, controladores lógicos programables (PLCs) y la plataforma Node-RED. La metodología consistió en implementar sensores de humedad, temperatura y nivel hidrostático conectados a un microcontrolador ESP32, que transmite datos a través del protocolo MQTT hacia Node-RED. Esta plataforma permite la visualización remota de variables ambientales mediante tableros y la gestión eficiente de sistemas de riego y ventilación, coordinados por los PLCs mediante una red industrial. Los resultados evidenciaron una operación eficiente y estable del sistema, con una mejora significativa en el control de las variables ambientales del invernadero y un uso más racional de los recursos hídricos y energéticos. Además, el sistema demostró ser adaptable, escalable y con potencial para incorporar funciones avanzadas como algoritmos predictivos. Esta experiencia también puso en valor el impacto educativo del proyecto, al ofrecer una herramienta práctica para la formación en tecnologías emergentes y sostenibilidad.

**Palabras Clave:** *Internet Industrial de las cosas (IIoT), Automatización de procesos, Node-RED, Controladores LOGO!, Sistemas embebidos, Invernadero*

**Abstract** Agriculture currently faces significant challenges related to climate change, water scarcity, and the need to increase productivity in a sustainable manner. In this context, automated greenhouses have emerged as an effective solution for optimizing resource use and maintaining controlled environmental conditions. However, their implementation in educational settings remains limited, which restricts the development of practical skills in automation, Internet of Things (IoT) and sustainability among students. To address this issue, an automated system was developed for an academic greenhouse, integrating IoT technologies, programmable logic controllers (PLCs) and the Node-RED platform. The methodology involved deploying humidity, temperature and hydrostatic level sensors connected to an ESP32 microcontroller, which transmits data via the MQTT protocol to Node-RED. This platform enables remote visualization of environmental variables through dashboards and facilitates the efficient management of irrigation and ventilation systems, coordinated by the PLCs through an industrial communication network. The results demonstrated efficient and stable system operations, with significant improvements in the control of greenhouse environmental variables and a more rational use of water and energy resources. Furthermore, the system proved to be adaptable, scalable and capable of incorporating advanced functions such as predictive algorithms. Additionally, the experience highlighted the educational value of the project by providing a practical tool for training in emerging technologies and sustainability.

**Keywords:** *Industrial Internet of Things (IIoT), Process Automation, Node-RED, LOGO! Controllers, Embedded Systems, Greenhouse*

## Dedicatoria

**Al López:** Al culminar esta etapa tan trascendental de mi formación como ingeniero en mecatrónica, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma de Baja California, institución que no solo fue el escenario donde adquirí conocimientos, sino también el espacio donde forjé herramientas y valores que definirán mi camino profesional. A la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Administrativas y Sociales (FCIAS), mi gratitud por brindarme una formación integral que fue clave en cada paso de mi trayectoria académica.

Quiero expresar un reconocimiento muy especial al apoyo invaluable recibido durante la elaboración de mi tesis. Mi más sincero agradecimiento al Dr. Jesús David Avilés Velázquez, cuya guía precisa, tiempo y constante disposición para aclarar dudas y brindar orientación fueron determinantes para culminar este proyecto con éxito. Asimismo, extendiendo mi gratitud a la Dra. María Alejandra Rojas Ruiz, por su compromiso y apoyo inquebrantable durante todo el proceso. Su experiencia y dedicación fueron esenciales para fortalecer el desarrollo de este trabajo.

Agradezco también a todos los docentes que contribuyeron a mi formación académica. Cada clase, consejo y desafío académico me permitieron crecer tanto en lo personal como en lo profesional.

Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto de quienes me guiaron, enseñaron y acompañaron a lo largo de este camino. A todos ustedes, gracias por su invaluable contribución.

**Eder Alberto Gil Bermudez:** Finalizar esta etapa representa mucho más que concluir una carrera universitaria; simboliza años de esfuerzo, aprendizajes y crecimiento. Por ello, quiero dedicar unas palabras de agradecimiento a la Universidad Autónoma de Baja California, donde no solo adquirí conocimientos técnicos, sino también valores y experiencias que moldearon mi visión profesional y personal. A la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Administrativas y Sociales (FCIAS), agradezco por ofrecerme una formación que fue más allá del aula, brindándome herramientas clave para afrontar los desafíos del entorno profesional con mayor confianza.

En especial, reconozco el acompañamiento de quienes hicieron posible el desarrollo de este trabajo de tesis. Al Dr. Jesús David Avilés Velázquez, gracias por su orientación clara y su constante disposición para apoyar este proyecto. Su compromiso fue decisivo en cada etapa. También expreso mi gratitud a la Dra. María Alejandra Rojas Ruiz, por su guía firme y su valiosa experiencia, la cual fue esencial para la consolidación de esta investigación.

No puedo dejar de mencionar a los profesores que formaron parte de mi camino académico. Cada enseñanza, reto y palabra de aliento dejó huella en mi proceso de formación.

Este proyecto es el resultado de muchas manos, ideas y esfuerzos compartidos. A todas las personas que me apoyaron, directa o indirectamente, gracias por caminar junto a mí en esta etapa que marca el inicio de nuevos retos.

**Al López y Eder Alberto Gil Bermudez** expresamos nuestro agradecimiento a nuestros compañeros de Universidad, Yael Antonio Sánchez Mercado y José Armando Montes Bonilla, por su valiosa colaboración en el desarrollo de este proyecto. Inicialmente, este trabajo fue concebido como un proyecto de la asignatura de Automatización Avanzada del Programa Educativo de Ingeniería en Mecatrónica de la FCIAS-UABC.

# Índice general

Índice de figuras	XI
-------------------	----

Índice de tablas	XIII
------------------	------

<b>1. Fundamentación</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Objetivo General . . . . .	3
1.2.1. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Justificación . . . . .	4
1.4. Alcances y Limitaciones . . . . .	6
<b>2. Marco teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Agricultura y Sostenibilidad . . . . .	8
2.1.1. Agricultura Sostenible . . . . .	8
2.1.2. Retos actuales de la agricultura . . . . .	8
2.1.3. Agricultura de precisión y su relación con la tecnología . . . . .	9
2.2. Invernaderos . . . . .	10
2.2.1. Concepto de Invernadero . . . . .	10
2.2.2. Invernaderos inteligentes . . . . .	10
2.2.3. Invernaderos en entornos académicos . . . . .	11
2.2.4. Impactos . . . . .	11
2.3. Tecnologías avanzadas en Invernaderos Inteligentes . . . . .	13
2.3.1. Sensores y monitoreo ambiental . . . . .	13
2.3.2. Actuadores y Sistemas de Control . . . . .	15
2.3.3. Internet de las Cosas . . . . .	17
2.4. Casos de Estudio . . . . .	17

---

<b>3. Emulación de Invernadero Académico</b>	<b>21</b>
3.1. Diseño mecánico en 3D . . . . .	22
3.2. Construcción . . . . .	26
3.2.1. Fase No. 1: Estructura base . . . . .	26
3.2.2. Fase No. 2: Componentes adicionales . . . . .	31
3.2.3. Fase No. 3: Dispositivos de medición y control . . . . .	34
3.3. Conexiones eléctricas . . . . .	40
3.4. Arquitectura del sistema de automatización . . . . .	43
<b>4. Resultados del control y monitoreo del invernadero</b>	<b>47</b>
4.1. Programación de controladores LOGO! . . . . .	47
4.2. Programación de microcontrolador ESP32 . . . . .	51
4.3. Programación en Node-RED IoT . . . . .	55
4.4. Resultados . . . . .	57
<b>5. Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>

# Índice de figuras

2.1. Sensor de humedad DTH11. . . . .	14
2.2. Sensor SEN-HS-CAP. . . . .	14
2.3. Controlador Lógico Programable. . . . .	16
3.1. Diseño mecánico en 3D de estructuras metálicas del invernadero académico. . . . .	23
3.2. Diseño mecánico en 3D de la distribución de bloques de cultivos por medio de macetas ubicadas en mesas de madera. . . . .	24
3.3. Diseño mecánico en 3D de la distribución espacial de las tuberías de PVC. . . . .	24
3.4. Diseño mecánico en 3D del invernadero académico. . . . .	25
3.5. Instalación de perfiles metálicos del invernadero académico. . . . .	28
3.6. Estructura inicial del invernadero. . . . .	28
3.7. Construcción de mesas de cultivos. . . . .	29
3.8. Instalación de aspersores en la tuberías de PVC. . . . .	29
3.9. Fase 1 de la construcción del invernadero. . . . .	30
3.10. Instalación de cubierta del invernadero. . . . .	32
3.11. Cubierta del invernadero. . . . .	32
3.12. Sistema de ventilación del invernadero. . . . .	33
3.13. Fase 2 de la construcción del invernadero. . . . .	34
3.14. Trabajos de conexiones eléctricas de sensores. . . . .	36
3.15. Instalación de controladores industriales en tablero de control. . . . .	38
3.16. Cableado eléctrico de los PLCs LOGO!. . . . .	39
3.17. Dispositivos destacados implementados en el invernadero. (a) Elementos de bajo consumo de energía. (b) Dispositivos de electrónica industrial. Elaboración propia. . . . .	41
3.18. Diagrama eléctrico de PLCs LOGOs en invernadero. Elaboración propia. . . . .	42
3.19. Diagrama eléctrico de microcontrolador ESP32 LOGO en invernadero. Elaboración propia. . . . .	42

---

3.20. Red (local o por nube) IoT en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	44
4.1. Proyecto de Red local con tres PLCs LOGO! Elaboración propia. . . . .	48
4.2. Programación de PLC LOGO! 8.3.1 para activación de electroválvulas, usando marcas, y configuración de sensor de nivel hidrostático. Elaboración propia. . . . .	49
4.3. Programación de PLC LOGO! 8.3.2 para activación de electroválvulas, usando variables de red en la intercomunicación industrial con PLCs LOGO! Elaboración propia. . . . .	50
4.4. Programación de PLC LOGO! 8.3.3 para activación de electroválvulas y ventilador, usando variables de red en la intercomunicación industrial con PLCs LOGO! Elaboración propia. . . . .	50
4.5. Configuración de la plataforma de IoT Node-RED del ESP32 con sensores de humedad del suelo y de humedad y temperatura ambiental en aplicación de red local para invernadero. Elaboración propia. . . . .	56
4.6. Configuración de la plataforma de IoT Node-RED de controladores industriales LOGO! y sensor de nivel hidrostático en aplicación de red local para invernadero. Elaboración propia. . . . .	57
4.7. Tableros virtuales de sensores de humedad y temperatura del suelo instalados en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	58
4.8. Tableros virtuales del sensor de temperatura ambiental con indicador de activación del ventilador en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	58
4.9. Tableros virtuales de señales analógicas del transmisor de nivel hidrostático en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	59
4.10. Dashboards que supervisan el estado operativo de las electroválvulas en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	59
4.11. Activación de electroválvula 9 en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	62
4.12. En operación tableros virtuales de sensores de humedad y temperatura del suelo instalados en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	62
4.13. En operación tableros virtuales del sensor de temperatura ambiental con indicador de activación del ventilador en el invernadero. Elaboración propia.	63
4.14. En operación tableros virtuales de señales analógicas del transmisor de nivel hidrostático en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	63
4.15. En operación dashboards que supervisan el estado operativo de las electroválvulas en el invernadero. Elaboración propia. . . . .	64

# Índice de tablas

2.1. Impactos de los invernaderos inteligentes en entornos académicos. Fuente: Elaboración Propia. . . . .	12
3.1. Elementos de construcción del invernadero. . . . .	30
3.2. Equipamiento del invernadero. . . . .	40



# Capítulo 1

## Fundamentación

El presente capítulo tiene como finalidad establecer las bases que sustentan el desarrollo de esta investigación. Para ello, se presentan los elementos clave que permiten contextualizar el estudio, justificando su relevancia y delimitando su alcance. En primer lugar, se introduce el proyecto, proporcionando una visión general de la problemática abordada y su importancia dentro del campo de estudio. Posteriormente, se expone el planteamiento del problema, donde se describe de manera clara la situación que motiva la investigación, destacando sus implicaciones y la necesidad de abordar las temáticas cubiertas en este proyecto. Posteriormente, se definen el objetivo general y los objetivos específicos, los cuales orientan el desarrollo del estudio y permiten establecer los resultados esperados. Además, se presenta la justificación, argumentando la pertinencia del trabajo desde distintas perspectivas: académica, científica, tecnológica y sustentable. Finalmente, se delimitan los alcances y limitaciones del proyecto, especificando los aspectos que serán considerados dentro de la investigación y aquellos factores que podrían representar restricciones en su desarrollo.

En conjunto, este capítulo establece los fundamentos necesarios para la comprensión y desarrollo del proyecto, asegurando que se establezca una estructura clara y coherente que guíe el análisis y facilite la obtención de resultados.

### 1.1. Introducción

En la agricultura moderna, los invernaderos automatizados representan una solución clave para incrementar la producción y optimizar el uso de los recursos. La integración de tecnologías, que maximicen su eficiencia, resulta imperativo para minimizar el consumo de la energía y del vital líquido. No obstante, muchos invernaderos a nivel mundial continúan empleando métodos manuales para el riego y la regulación climática, generando un uso

ineficiente de los recursos y dificulta la adaptación a las condiciones ambientales cambiantes, afectando el desarrollo de los cultivos. La ausencia de automatización reduce la capacidad de respuesta ante variaciones en el entorno, derivando en una producción menos eficiente y más costosa. En este contexto, la urgencia de una agricultura más sostenible y tecnológicamente avanzada impulsa la investigación y el desarrollo de sistemas automatizados que optimicen la gestión de los invernaderos. En la actualidad, la agricultura enfrenta desafíos significativos debido al cambio climático, la escasez de recursos hídricos y la necesidad de incrementar la producción de alimentos de manera sostenible. Los invernaderos automatizados han emergido como una solución eficaz para controlar las condiciones ambientales y optimizar el crecimiento de cultivos. Sin embargo, en entornos académicos, la adopción de estas tecnologías es limitada, lo que restringe tanto la investigación aplicada como la formación práctica de los estudiantes en técnicas sostenibles modernas.

La implementación de sistemas automatizados en invernaderos académicos permite el monitoreo y control preciso de variables como temperatura, humedad y riego, utilizando tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA). Estas herramientas no sólo optimizan el uso de recursos, sino que también proporcionan plataformas educativas para que los estudiantes desarrollen competencias en áreas como la mecatrónica, la programación y la gestión sostenible. Torres et ál (2024), en un estudio reciente, destaca la integración de la Inteligencia Artificial en invernaderos para mejorar la eficiencia y productividad agrícola, subrayando su potencial educativo en la formación de ingenieros [43].

A pesar de los potenciales beneficios, la incorporación de invernaderos automatizados en instituciones educativas tiende a enfrentar desafíos como la falta de infraestructura adecuada, recursos financieros limitados y la escasez de personal capacitado para gestionar y mantener estos sistemas. Además, la ausencia de proyectos de este tipo limita la oportunidad de realizar investigaciones que aborden problemáticas locales y desarrollen soluciones adaptadas a contextos específicos. Por ejemplo, la Universidad de Guayaquil ha implementado sistemas de monitoreo remoto basados en IoT para incrementar la productividad agrícola, integrando diversas tecnologías como sensores inteligentes y análisis de Big Data, lo que demuestra la viabilidad y los beneficios de estas iniciativas en entornos académicos [18].

En el contexto académico, es fundamental desarrollar e implementar un sistema automatizado de invernadero que integre tecnologías avanzadas, no solo para optimizar el uso de recursos, sino también como una herramienta pedagógica clave en la formación de futuros profesionales. De esta manera, no solo se maximiza la eficiencia en el manejo de variables críticas como temperatura, humedad, iluminación y riego, sino también promover

el aprendizaje práctico en áreas como el Internet de las Cosas (IoT), control automático y análisis de datos.

Asimismo, se busca fomentar la investigación interdisciplinaria, incentivando la colaboración entre áreas como ingeniería, ciencias ambientales y agronomía, para desarrollar soluciones sostenibles basadas en tecnología de punta. De este modo, un sistema automatizado de invernadero no solo podría contribuir a la innovación educativa, sino que también proporcionará un entorno controlado para la experimentación y el desarrollo de estrategias orientadas al manejo eficiente de recursos naturales, preparando a los estudiantes para enfrentar los desafíos tecnológicos y ambientales actuales.

## **1.2. Objetivo General**

Desarrollar e implementar un sistema automatizado para un invernadero académico, integrando tecnologías IoT, sistemas de controladores lógicos programables (PLC) y plataformas de monitoreo en tiempo real, con el propósito de optimizar el uso de recursos hídricos y energéticos, incrementar la eficiencia en la producción de cultivos bajo condiciones controladas y fomentar la implementación de prácticas agrícolas sostenibles

### **1.2.1. Objetivos específicos**

1. Implementar un sistema de riego automatizado mediante electroválvulas y sensores higrométricos basados en tecnologías industriales y de sistemas electrónicos de baja consumo de potencia, con el objetivo de mantener niveles óptimos de humedad en el suelo de nueve macetas, activando el riego cuando sea requerido,
2. Desarrollar la comunicación remota de controladores industriales y sistemas electrónicos de consumo de baja potencia, integrando esquemas de Internet Industrial de las Cosas (IIoT) para el monitoreo en tiempo real.
3. Implementar un sistema de ventilación automatizado a partir de sensores de temperatura y humedad ambiental, destinado a regular el microclima del invernadero y a mantener condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos, reduciendo el riesgo de estrés térmico en las plantas.
4. Programar y configurar la lógica de control en un PLC Siemens LOGO!, estableciendo secuencias de operación para el sistema de riego y ventilación, integrando los datos

proporcionados por los sensores ambientales y de nivel, permitiendo así una gestión automatizada y eficiente de los recursos.

5. Desarrollar una interfaz de monitoreo mediante una plataforma de IoT, implementando tableros virtuales (dashboards) que permitan la visualización en tiempo real de las variables monitoreadas (humedad del suelo, temperatura ambiental, nivel de agua en el tanque) y el estado de los actuadores (electroválvulas y ventiladores), facilitando el control remoto y la toma de decisiones basada en datos.

### 1.3. Justificación

El desarrollo de la agricultura moderna ha requerido la incorporación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la producción de alimentos. Sin embargo, la aplicación de estos avances en entornos académicos ha sido limitada, lo que afecta tanto la formación de nuevos profesionales como la generación de conocimiento científico aplicado a la optimización de recursos. Debido a esto, la integración de sistemas automatizados en invernaderos académicos representa una oportunidad clave para mejorar la educación y la investigación en diversos sectores, como el agroindustrial y el tecnológico [12].

Los invernaderos automatizados permiten tanto controlar variables ambientales, como brindar una plataforma de aprendizaje para estudiantes en áreas como ingeniería mecatrónica, agronomía, informática y sustentabilidad. A través de la integración de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, los estudiantes pueden adquirir experiencia práctica en el uso de Internet de las Cosas (IoT) y automatización aplicada a la agricultura.

También, se debe considerar que uno de los mayores retos de la agricultura actual es la eficiencia en el uso del agua y la energía. Un invernadero tradicional puede tener pérdidas significativas en los recursos debido a factores como sistemas de riego ineficientes o uso inadecuado de nutrientes, mientras que un sistema automatizado basado en sensores puede reducir el consumo hasta la mitad al suministrar únicamente los nutrientes necesarios para el crecimiento de los cultivos. Además, la optimización de variables como la ventilación puede disminuir el gasto energético, contribuyendo así a la reducción de la huella de carbono. Estudios han demostrado que la automatización y el uso de biofertilizantes en invernaderos pueden aumentar la producción y disminuir costos, consumo de agua y tiempo de germinación [5, 11, 37].

La creación de un invernadero automatizado en un entorno académico también permitirá desarrollar nuevas líneas de investigación en el campo de la agro-tecnología. Áreas como el desarrollo de modelos matemáticos para optimizar la producción pueden explorarse en un ambiente controlado dentro de instituciones de educación superior. Además, la recopilación de datos a través de sistemas IoT permitirá la implementación de otras ramas como Big Data y el análisis predictivo, permitiendo tomar decisiones con mayor precisión [33].

Un invernadero académico automatizado puede servir como modelo piloto para adaptar tecnologías a necesidades locales, además de fortalecer la vinculación entre universidades y la industria. Al obtener conocimientos y práctica que se enfocan en el uso de la tecnología para la agricultura sustentable, es posible que los alumnos puedan desarrollar prácticas profesionales, proyectos de investigación aplicada y transferencia tecnológica, promoviendo así la colaboración entre el ámbito académico y productivo. Esta sinergia facilita la innovación y la adaptación de soluciones tecnológicas a las necesidades específicas de la región, mejorando la competitividad y sostenibilidad.

En conclusión, la implementación de un invernadero automatizado en un entorno académico es relevante para mejorar la formación de profesionales, optimizar el uso de recursos, fomentar la investigación e innovación y fortalecer la colaboración entre la academia y la industria. El desarrollo y realización de este proyecto no solamente enriquece el área de la educación, sino que también contribuye al desarrollo de prácticas más eficientes y sostenibles, adaptadas a las necesidades locales y globales.

Debido a lo antes mencionado, este proyecto fue seleccionado por su impacto significativo en la optimización de la eficiencia y la sostenibilidad en el ámbito agrícola. En un mundo donde la necesidad de alimentos no deja de aumentar y los recursos son cada vez más escasos, los sistemas automatizados se presentan como una solución clave, maximizando el uso del agua y la energía, mientras se disminuyen los costos operativos y se fomenta un entorno más sostenible.

La propuesta busca revolucionar la gestión hídrica a través de un riego inteligente y minimizar el derroche energético con sistemas de ventilación automáticos, avanzando hacia una agricultura más consciente y responsable. Este modelo no sólo ofrece principios de permacultura, sino que también se adapta a diferentes contextos, ya sean domésticos o comerciales. A diferencia de los métodos tradicionales, el control automático asegura una respuesta precisa y rápida, transformando las condiciones de cultivo y garantizando un desarrollo más uniforme y saludable de las plantas.

## 1.4. Alcances y Limitaciones

Este proyecto se centra en el desarrollo de un invernadero automatizado a escala reducida, diseñado para albergar nueve macetas, con el propósito de optimizar el uso de recursos hídricos y mejorar el control de las condiciones ambientales internas. Se implementará un sistema basado en Controladores Lógicos Programables (PLC) que gestionará de manera automática el riego y la climatización del invernadero, minimizando la intervención humana y asegurando un entorno estable para el crecimiento de las plantas.

El sistema de riego incorporará electroválvulas de 12 VCD, las cuales se activarán automáticamente según los niveles de humedad en el suelo detectados por sensores, permitiendo un suministro eficiente de agua solo cuando sea necesario. También, se integrará un sensor ultrasónico para monitorear el nivel de agua en el tanque, el cual activará una bomba cuando el nivel descienda por debajo de un umbral predefinido, esto para garantizar un suministro continuo y eficiente.

En cuanto a la regulación climática, el invernadero contará con un sistema de ventilación automatizado que ajustará la temperatura y la humedad relativa del ambiente, creando condiciones óptimas para el desarrollo de cultivos. Este sistema será gestionado a través del PLC, el cual tomará decisiones basadas en datos obtenidos en tiempo real por los sensores ambientales.

Este proyecto será desarrollado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Administrativas y Sociales, con el propósito de servir como un modelo experimental para la enseñanza y la investigación en automatización agrícola. Además, se busca demostrar la viabilidad de la permacultura automatizada en entornos controlados, con el potencial de escalabilidad y replicabilidad tanto en hogares como en aplicaciones comerciales.

# Capítulo 2

## Marco teórico

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar los fundamentos conceptuales y teóricos que sustentan la presente investigación. A través de una revisión de la literatura, se abordan los principales aspectos relacionados con la agricultura sostenible y el uso de tecnología en invernaderos inteligentes, esto con el propósito de establecer un marco de referencia necesario para el desarrollo del proyecto.

Primeramente, se aborda la relación entre agricultura y sostenibilidad, analizando el concepto de agricultura sostenible, los retos actuales de ésta y el papel de la agricultura de precisión, destacando su firme vinculación con la tecnología.

Posteriormente, se presenta una exploración sobre los invernaderos, abordando su concepto, evolución y la incorporación de tecnologías avanzadas para el desarrollo de invernaderos inteligentes. Asimismo, se discuten sus aplicaciones en entornos académicos y el impacto que éstos tienen, enfatizando su relevancia en la sostenibilidad.

También, se profundiza en las tecnologías avanzadas aplicadas a los invernaderos inteligentes, en donde se analiza el uso de las tecnologías aplicadas en el proyecto, tales como sensores y sistemas de monitoreo ambiental, actuadores y sistemas de control y el papel del Internet de las Cosas (IoT).

Por último, se presentan casos de estudio que ilustran la aplicación real de estas tecnologías en escenarios similares al reflejado en la presente investigación, brindando ejemplos concretos que permiten comprender el impacto y viabilidad de los invernaderos académicos con la aplicación de Internet de las Cosas.

Este marco teórico da a conocer la base conceptual relevante para el desarrollo del estudio, con el propósito de brindar un análisis y mayor comprensión de las problemáticas abordadas, así como las soluciones tecnológicas propuestas.

## 2.1. Agricultura y Sostenibilidad

### 2.1.1. Agricultura Sostenible

La agricultura sostenible se define como un sistema de producción agrícola que satisface las necesidades actuales (en el caso de alimentos) sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades [44]. Este enfoque busca mantener la productividad y rentabilidad agrícola, minimizando los impactos negativos en el medio ambiente y promoviendo la equidad socioeconómica. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en Inglés), la agricultura sostenible debe garantizar la rentabilidad, la salud ambiental y la equidad social y económica [14].

Los principios fundamentales de la agricultura sostenible incluyen:

1. **Conservación de los recursos naturales:** Uso eficiente de recursos como el agua, biodiversidad y suelo para garantizar su largo plazo.
2. **Equidad socioeconómica:** Mejora de la calidad de vida de la sociedad, sobre todo de los agricultores y sus comunidades, asegurando que sus condiciones laborales sean justas y con acceso a recursos de necesidad básica.
3. **Viabilidad Económica:** Implementación de prácticas que sean rentables y competitivas en el mercado.

A nivel mundial, la mayoría de los sistemas agrícolas dependen intrínsecamente del clima, pero han cambiado drásticamente debido al progreso tecnológico, la expansión de la agricultura, el desarrollo socioeconómico, los cambios en los patrones de consumo y la amenaza de la degradación ambiental [31]. Se estima que casi la mitad de las tierras cultivables de la Tierra han sido convertidas en tierras de cultivo, pastizales y tierras de pastoreo [31]. Como consecuencia, aproximadamente 2,370 millones de personas en el mundo no tuvieron acceso adecuado a los alimentos en 2020, lo que representa un aumento de casi 320 millones en un solo año [14]. Esto ha convertido la inseguridad alimentaria y el cambio climático en los principales desafíos para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

### 2.1.2. Retos actuales de la agricultura

La agricultura es un sector importante que juega un papel clave en el crecimiento económico de los países. Sin embargo, la agricultura contemporánea enfrenta múltiples desafíos

que ponen en riesgo su sostenibilidad y capacidad para satisfacer la demanda global de alimentos.

Los entornos agrícolas están continuamente amenazados por una población mundial en auge, una escasez de tierra cultivable y cambios rápidos en el clima. Para garantizar la seguridad alimentaria y de los ecosistemas, es necesario diseñar cultivos futuros para el desarrollo agrícola sostenible maximizando la producción neta y minimizando los efectos indeseables en el medio ambiente [42].

Dado el espacio agrícola limitado, la falta de agua, el cambio climático y las condiciones ambientales en constante cambio, se deben desarrollar soluciones agrícolas inteligentes nuevas e innovadoras [20].

### **2.1.3. Agricultura de precisión y su relación con la tecnología**

Se están realizando esfuerzos para aumentar la calidad y cantidad de los productos agroindustriales transformándolos en productos inteligentes y conectados a través de una industria agrícola inteligente. La agricultura inteligente y de precisión se refiere a la integración de tecnología, como Internet de las cosas, sensores, robótica, inteligencia artificial, cadenas de suministro inteligentes, análisis de big data y blockchain, en la industria agrícola [13] [20].

La era del Internet de las Cosas (IoT) es el paraguas que cubre y habilita el resto de herramientas tecnológicas. La integración de tecnología inteligente puede conducir a una agricultura más productiva y eficiente al reducir la necesidad de interacciones humanas manuales y tomar decisiones inteligentes proactivas [22].

El IoT está remodelando el sector agrícola al proporcionar a los agricultores un conjunto diverso de herramientas para abordar varios desafíos que enfrentan en el campo. Por ejemplo, en la actualidad, los agricultores pueden conectarse a su granja desde cualquier lugar y en cualquier momento utilizando tecnologías habilitadas para IoT. Se utilizan sensores y actuadores para regular los procesos agrícolas, mientras que se utilizan redes de sensores inalámbricos para monitorear la granja. Los agricultores también pueden utilizar IoT para mantenerse al día con las condiciones actuales de sus tierras agrícolas utilizando un teléfono inteligente desde cualquier parte del mundo. Las tecnologías habilitadas por IoT tienen el potencial de reducir el costo de producción de cultivos y aumentar la productividad de la tierra [1].

En este contexto, la agricultura de precisión juega un papel fundamental en la gestión eficiente de los invernaderos, permitiendo el monitoreo y control de variables clave como la humedad, temperatura y suministro de agua. Estas tecnologías favorecen la optimización del

rendimiento de los cultivos bajo condiciones controladas, facilitando su implementación en modelos de producción agrícola sostenible y escalable.

## **2.2. Invernaderos**

### **2.2.1. Concepto de Invernadero**

Un invernadero es una estructura diseñada para proporcionar condiciones ambientales controladas que favorezcan el crecimiento de cultivos durante todo el año. A través del control de temperatura, humedad y otros factores, los invernaderos permiten optimizar la producción agrícola y reducir la vulnerabilidad ante condiciones climáticas diversas.

El uso de invernaderos se ha extendido a nivel mundial debido a su capacidad de los cultivos y minimizar los efectos de los cambios climáticos. Existen distintos tipos de invernaderos, como los de estructura metálica con cubierta de vidrio o plástico, los túneles de cultivo y los sistemas hidropónicos, que permiten la producción intensiva en espacios reducidos [21, 29]

La gestión climática del entorno del invernadero depende de muchos parámetros, como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono. Al controlarse estos parámetros, se podrían lograr las condiciones óptimas de crecimiento del cultivo, así como ahorros valiosos de energía y regulación del uso del agua [40].

En las últimas décadas, han surgido diversas investigaciones interesadas en la tecnología de gestión de invernaderos para encontrar la solución ideal teniendo en cuenta la tan discutida relación reducción de costos y consumo de energía [7, 38]. Las tendencias en este campo de estudio incluyen avances tecnológicos en el cultivo moderno y sostenible en invernaderos para lograr una agricultura de precisión [2]. Por ello, el uso de invernaderos sigue siendo uno de los temas esenciales en las metodologías agrícolas modernas, donde la técnica de manejo y control se considera una de las principales áreas de investigación para lograr un alto rendimiento con una reducción de costos en recursos y consumo de energía.

### **2.2.2. Invernaderos inteligentes**

Los invernaderos inteligentes incorporan tecnologías avanzadas como sensores, IoT y automatización para optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia productiva. Estos sistemas permiten el monitoreo y ajuste en tiempo real de variables críticas, asegurando condiciones ideales para el crecimiento de cultivos [9] [32]

El desarrollo de invernaderos inteligentes ha sido impulsado por la necesidad de aumentar la producción agrícola sin comprometer la sostenibilidad. Estos sistemas pueden utilizar sensores y controladores para ajustar parámetros como la cantidad de riego, la temperatura y la iluminación, logrando así un aprovechamiento más eficiente de los recursos disponibles.

Además de su impacto en la producción de alimentos, los invernaderos también contribuyen a la reducción de costos operativos y al control de plagas y enfermedades [24] [36]. Aunado a esto, los invernaderos benefician la preparación de estudiantes al ser implementados en entornos académicos.

### **2.2.3. Invernaderos en entornos académicos**

Los invernaderos han sido implementados en instituciones educativas académicas para la enseñanza, investigación y desarrollo de nuevas tecnologías agrícolas. Estos espacios permiten a estudiantes e investigadores a experimentar con innovaciones en agricultura de precisión y sostenibilidad.

Los invernaderos en entornos académicos ofrecen una oportunidad única para estudiar el comportamiento de diversas especies vegetales en condiciones controladas. Además, permiten tener un acercamiento con respecto al desarrollo de tecnologías y la creación de prototipos para la agricultura sostenible, conduciendo a la transferencia de conocimientos y el entendimiento de conceptos vistos en el aula, puestos en práctica.

También, los invernaderos inteligentes preparan a los jóvenes para el compromiso cívico, mejorando su comprensión en hábitos de sustentabilidad y bienes comunitarios, involucrando a estudiantes en el tratamiento de problemas sociales y ambientales en sus comunidades [4].

### **2.2.4. Impactos**

Los invernaderos han demostrado impactos positivos en la seguridad alimentaria, la eficiencia en el uso del agua, la reducción de la huella de carbono y la exposición a la práctica al ser aplicados en entornos académicos, como se puede observar en la Tabla 2.1.

Dado el impacto positivo de los invernaderos en la producción agrícola y la sostenibilidad ambiental, la incorporación de tecnologías avanzadas ha permitido mejorar su eficiencia y productividad. La implementación de sensores, sistemas de control automatizados y el uso del Internet de las Cosas (IoT) han revolucionado el manejo de los invernaderos, permitiendo un monitoreo en tiempo real de variables clave y una respuesta inmediata a cambios en las condiciones ambientales [27]. Estas innovaciones han optimizado el uso de recursos como el agua y la energía, reduciendo costos operativos y mejorando la calidad de los cultivos. A

<b>Impacto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ejemplo de aplicación</b>
Seguridad Alimentaria	Asegura un suministro de alimentos frescos en las universidades, fomentando la autosuficiencia alimentaria.	Programas de huertos escolares que proveen alimentos para comedores estudiantiles.
Eficiencia en el uso del agua	Implementación de sistemas automatizados que reducen el desperdicio de agua.	Uso de sensores de humedad en invernaderos académicos para ajustar el riego según la demanda del cultivo.
Reducción de la huella de carbono	Disminución de transporte de alimentos al producirse en el mismo campus; control inteligente del uso energético.	Implementación de invernaderos con paneles solares y sistemas IoT para optimizar la climatización.
Exposición a la práctica	Permite a los estudiantes aplicar conocimientos teóricos en un entorno real, fomentando el aprendizaje experiencial en agronomía, mecatrónica y ciencias ambientales.	Desarrollo de prototipos de invernaderos en cursos de Ingeniería.
Innovación en la agricultura de precisión	Aplicación de tecnologías emergentes como sensores inteligentes, IoT y análisis de datos para mejorar la producción y sostenibilidad en la agricultura.	Creación de plataformas de monitoreo remoto en invernaderos académicos.
Conciencia ambiental y sostenibilidad	Fomenta en los estudiantes una cultura ambiental al observar en tiempo real los beneficios de prácticas responsables y sostenibles.	Proyectos estudiantiles sobre impacto ambiental y optimización de cultivos sostenibles.

Tabla 2.1 Impactos de los invernaderos inteligentes en entornos académicos. Fuente: Elaboración Propia.

continuación, se explorarán las tecnologías más relevantes en los invernaderos inteligentes, su impacto en la eficiencia productiva y su papel en la agricultura de precisión [28].

## **2.3. Tecnologías avanzadas en Invernaderos Inteligentes**

Los invernaderos inteligentes representan una evolución significativa en la agricultura moderna, integrando tecnologías avanzadas para optimizar la producción y eficiencia. Estas instalaciones emplean sistemas automatizados que monitorean y controlan las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento óptimo de las plantas, incluyendo la regulación de temperatura, humedad, luz y nutrientes.

De acuerdo a distintas investigaciones [3] [10] [19], la parte central o el corazón de un invernadero inteligente es su sistema de gestión, el cual tiene la capacidad de procesar los datos que son captados por los sensores. Estos sistemas de gestión permiten predecir las necesidades de las plantas y ajustar automáticamente los factores de soporte vital para los cultivos.

### **2.3.1. Sensores y monitoreo ambiental**

Los sensores son componentes fundamentales en los invernaderos inteligentes, ya que proporcionan datos en tiempo real sobre diversas variables ambientales que afectan el crecimiento de las plantas. Para el presente proyecto, se hace énfasis en los sensores de humedad del suelo y los sensores hidrostáticos de agua, los cuales permiten un control preciso del riego y optimización del uso de recursos hídricos.

#### **Sensores de humedad**

Para propósitos de la presente investigación, los sensores de humedad son dispositivos diseñados para medir el contenido de agua presente en el suelo, proporcionando datos esenciales para la gestión eficiente del riego y desarrollo óptimo de las plantas. Este tipo de sensores ayudan a determinar cuándo y cuánta agua necesitan los cultivos, evitando tanto el riego excesivo como el insuficiente.

Se utilizó el sensor digital de humedad y temperatura DHT11, como se muestra en la figura 2.1. Combina un sensor capacitivo de humedad y un termistor para la temperatura, proporcionando una salida digital calibrada y de fácil integración con microcontroladores como Arduino, Raspberry Pi y otros sistemas embebidos [15]. Gracias a su facilidad de uso y bajo costo, el DHT11 es ideal para diversas aplicaciones, dos de ellas siendo: a) proyectos

educativos, para la introducción a la electrónica y programación mediante la medición de variables ambientales y b) invernaderos, esto para la supervisión y control de las condiciones de cultivo para optimizar el crecimiento de las plantas.

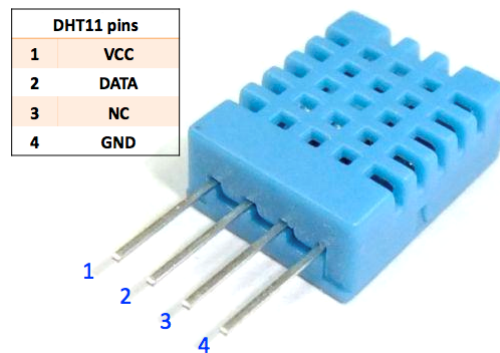


Figura 2.1 Sensor de Humedad DTH11. Fuente: Sunfounder, 2024.

Al aplicar este sensor, se garantiza una alta confiabilidad y excelente estabilidad a largo plazo. Se conecta a un microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento, que ofrece buena calidad, rápida respuesta, buena capacidad y rentabilidad [15].

También, se utilizó el sensor capacitivo SEN-HS-CAP, el cual mide la humedad del suelo mediante detección de cambios en la capacitancia, evitando problemas de corrosión comunes en sensores resistivos. Opera con un voltaje de 3.3V a 5V en corriente directa y consume aproximadamente 5 mA. Sus dimensiones de 98mm x 23mm facilitan su integración en diversos sistemas [16]. El sensor utilizado se puede observar en la figura 2.2.



Figura 2.2 Sensor SEN-HS-CAP. Fuente: UElectronics, 2024.

En el sistema desarrollado en este proyecto, el sensor SEN-HS-CAP monitorea continuamente la humedad en las macetas. Cuando detectan niveles por debajo del umbral definido, envían señales al Controlador Lógico Programable (PLC), que activa el riego de manera precisa. Esto asegura que cada planta reciba la cantidad adecuada de agua sin desperdicio.

### **Sensores hidrostáticos de agua**

Los sensores hidrostáticos se utilizan para medir el nivel de líquidos en tanques y depósitos, basándose en la presión ejercida por la columna del líquido. Esta presión es directamente proporcional a la altura del líquido y se mide mediante sensores de presión sumergibles.

En la presente investigación, se hizo uso de un sensor hidrostático de agua. Este sensor se emplea para medir de manera precisa el nivel de agua en el tanque del sistema de riego, diseñado para rangos de 1 a 5 metros de profundidad. Cuando el nivel de agua cae por debajo de un umbral predefinido, el sensor envía una señal al PLC, que activa automáticamente el solenoide para rellenar el tanque. Este sistema garantiza un suministro continuo de agua de manera eficiente, minimizando riesgos de interrupción en el riego.

En el sistema elaborado dentro de este proyecto, los sensores monitorean continuamente las macetas y envían señales al Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en Inglés) cuando detectan niveles de humedad por debajo de un umbral definido. Esto permite activar el riego de manera precisa, asegurando que cada planta reciba la cantidad adecuada de agua sin desperdicio. El PLC utilizado en esta investigación es el módulo básico SIEMENS, modelo LOGO!, como se muestra en la Figura 2.3.

### **2.3.2. Actuadores y Sistemas de Control**

En la agricultura moderna, la automatización ha permitido optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia en la producción. Uno de los pilares de la automatización es el uso de actuadores y sistemas de controles, los cuales permiten la regulación precisa de variables ambientales y operativas dentro de invernaderos. Estos sistemas se encargan de procesar la información proveniente de sensores y ejecutar acciones en tiempo real, asegurando condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos.

Los actuadores son dispositivos que reciben señales eléctricas y las convierten en acciones físicas, como la apertura y cierre de válvulas de riego, la activación de ventiladores o la regulación de iluminación en un invernadero. Su integración con sistemas de control



Figura 2.3 Controlador Lógico Programable SIEMENS, modelo LOGO!. Fuente: Siemens, 2024.

avanzados, como los Controladores Lógicos Programables (PLC), facilita la gestión autónoma de estos procesos, reduciendo la intervención humana y mejorando la precisión del sistema.

### Controladores Lógicos Programables

El PLC es el núcleo del sistema automatizado, diseñado para recibir, procesar y responder a señales provenientes de sensores. Este dispositivo se utiliza ampliamente en sistemas industriales y agrícolas debido a su capacidad para realizar tareas de control complejas con alta precisión y confiabilidad. En este proyecto, el PLC gestiona las señales de los sensores de humedad y temperatura, así como el control de las electroválvulas, la bomba de agua y el sistema de ventilación.

### Controles Climáticos

La regulación de la temperatura y la humedad dentro del invernadero es crucial para garantizar un entorno adecuado para el crecimiento de las plantas. El sistema automatizado incluye sensores que monitorean las condiciones ambientales y controlan la apertura de ventiladores o ventanas para estabilizar el microclima, promoviendo el desarrollo saludable de los cultivos.

### 2.3.3. Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado la agricultura al permitir la automatización y el monitoreo inteligente de cultivos mediante la interconexión de sensores y dispositivos. En el ámbito académico, los invernaderos equipados con tecnología IoT representan una herramienta didáctica invaluable, ya que permiten a los estudiantes adquirir experiencia práctica en la gestión eficiente de recursos agrícolas y en el uso de tecnologías emergentes. Al integrar sensores de humedad, temperatura y nivel de agua, los estudiantes pueden comprender de manera aplicada cómo estas variables afectan el crecimiento de las plantas y cómo la tecnología puede optimizar la producción [39] [30].

La implementación de IoT en invernaderos académicos mejora la enseñanza en disciplinas relacionadas con la agricultura y la ingeniería, además de fomentar la investigación en automatización agrícola y sostenibilidad. Los datos generados en tiempo real por los sensores pueden ser analizados en plataformas en la nube, lo que permite a los estudiantes desarrollar proyectos de investigación basados en Big Data, modelado de cultivos y eficiencia en el uso de recursos. Además, el acceso remoto a estos datos facilita la colaboración entre diferentes instituciones educativas, promoviendo el intercambio de conocimientos y metodologías [43].

Otro beneficio clave de los invernaderos inteligentes en entornos académicos es la posibilidad de simular distintos escenarios de cultivo bajo condiciones controladas. Los estudiantes pueden programar sistemas de riego automatizado, diseñar estrategias de ventilación y experimentar con diferentes configuraciones de iluminación para analizar su impacto en el crecimiento de los cultivos. Esto les proporciona una formación integral que abarca desde la biología de las plantas hasta la implementación de sistemas de control basados en IoT [45] [8].

A pesar de los múltiples beneficios, la integración del IoT en invernaderos académicos también presenta desafíos, como la necesidad de infraestructura tecnológica adecuada y la capacitación de docentes en el uso de estas herramientas [17]. Sin embargo, la inversión en este tipo de proyectos fortalece la educación en ingeniería agrícola, mecatrónica y disciplinas afines, preparando a los estudiantes para enfrentar los retos de la agricultura moderna con soluciones innovadoras y sostenibles.

## 2.4. Casos de Estudio

En 2015, se llevó a cabo un curso experimental en el que estudiantes desarrollaron prototipos de IoT para mejorar el mantenimiento de un invernadero urbano en una azotea.

Utilizando un enfoque de aprendizaje basado en problemas, los estudiantes identificaron áreas de mejora y desarrollaron soluciones innovadoras en colaboración con los jardineros responsables del invernadero. Este proyecto permitió a los estudiantes adquirir experiencia práctica en ingeniería de software colaborativa y en la aplicación de tecnologías emergentes en entornos reales[26].

En 2021, se desarrolló una plataforma de gestión inteligente basada en IoT para invernaderos básicos dedicados al cultivo de fresas en China. La plataforma permitía la interacción humano-computadora a través de una aplicación móvil, facilitando el control manual del ambiente dentro del invernadero. La implementación de esta tecnología resultó en un aumento del 128.55 por ciento en la eficiencia del uso del agua, una reducción del 40 por ciento en el uso de fertilizantes y una disminución del 61.67 por ciento en el uso de pesticidas, demostrando mejoras significativas en la gestión agrícola [25].

En 2022, se publicó una revisión exhaustiva que sintetiza la investigación académica sobre la aplicación de IoT para optimizar entornos de invernadero. El estudio analizó datos utilizando métodos descriptivos y estadísticos para inferir relaciones entre IoT, tecnologías emergentes, agricultura de precisión y mejoras en la agricultura comercial. Además, se discutió el papel del IoT en la mitigación de los efectos adversos del cambio climático en la agricultura, destacando avances tecnológicos como sensores para prevención de heladas y el control preciso de nutrientes en cultivos sin suelo[28].

En 2023, se desarrolló un sistema basado en la plataforma ESP32 para la automatización, monitoreo y control de invernaderos utilizando IoT. Este sistema permitía medir variables críticas dentro del invernadero, como temperatura, humedad y niveles de luz, lo que facilitaba la gestión de las condiciones ambientales para el crecimiento óptimo de las plantas. La investigación destacó el potencial del ESP32 como una solución de bajo costo y alto rendimiento para la implementación de tecnologías IoT en entornos agrícolas académicos y comerciales [34].

En 2024, TerraceLab y la Asociación de la Industria de Navarra (AIN) desarrollaron un sistema para gestionar huertos verticales, utilizando IoT. Basado en la técnica de la hidroponía, donde las raíces de las plantas se sumergen en una solución de nutrientes, este sistema optimizó el crecimiento de cultivos como lechugas, albahaca y espinaca. La plataforma permitía el control remoto y automatizado de las condiciones desde dispositivos móviles, facilitando su gestión en entornos como colegios, centros de trabajo y residencias. Este proyecto surgió para enfrentar la demanda creciente de alimentos frescos y la escasez de tierras agrícolas urbanas, buscando reducir costos y maximizar la eficiencia [35].

Los casos de estudio presentados evidencian el impacto creciente de la tecnología IoT en la optimización de los entornos de invernaderos y huertos urbanos, así como su capacidad para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura. A lo largo de los años, se ha observado una evolución en el enfoque de estos proyectos, comenzando con la integración de prototipos en entornos académicos y culminando en soluciones comerciales y de bajo costo aplicadas a una variedad de contextos, desde huertos en casa o zonas urbanas, hasta sistemas hidropónicos industriales.

El desarrollo de plataformas inteligentes basadas en IoT ha permitido tanto optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas, como integrar el conocimiento agrícola con tecnologías emergentes, creando un puente entre la innovación tecnológica y las necesidades del sector agrícola. Además, la colaboración entre estudiantes, investigadores y profesionales de invernaderos y huertos ha demostrado ser clave para el éxito de estos proyectos, facilitando la transferencia de conocimientos y la implementación efectiva de soluciones adaptadas a las realidades locales.

En definitiva, estos estudios subrayan el potencial del IoT como herramienta clave en la transformación digital de la agricultura, y su creciente aplicabilidad en el contexto sostenible, dando respuesta a desafíos globales como el cambio climático y la escasez de recursos. Sin embargo, aún existen retos relacionados con la escalabilidad, la accesibilidad económica y la interoperabilidad entre sistemas, por lo que continuar realizando este tipos de estudios es imperativo para garantizar la adopción sostenible de estas tecnologías.



## Capítulo 3

# Emulación de Invernadero Académico

En este capítulo, se presenta de manera detallada el diseño mecánico y la construcción de un invernadero académico, ubicado en las instalaciones de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Administrativas y Sociales, Campus Tijuana de la Unidad Tecate, de la Universidad Autónoma de Baja California. Este proyecto tiene como objetivo ofrecer un espacio de aprendizaje y experimentación para estudiantes y docentes, permitiendo la aplicación práctica de conceptos teóricos relacionados con la ingeniería y la sostenibilidad en el ámbito agrícola.

El diseño mecánico del prototipo toma como base los esquemas convencionales utilizados en invernaderos destinados a la producción agrícola, adaptándolos a las necesidades específicas de investigación y educación de la Institución. Se han integrado aspectos innovadores que buscan optimizar la eficiencia energética, la gestión del agua y la utilización de materiales sostenibles, contribuyendo así a un modelo más respetuoso con el medio ambiente. La estructura del invernadero fue concebida para soportar diversas condiciones climáticas locales, garantizando la estabilidad y durabilidad a largo plazo, mientras se facilita la implementación de tecnologías avanzadas para el control del clima y el monitoreo de los cultivos.

El proceso de construcción incluyó la selección de materiales durables, la planificación detallada de la distribución interna para maximizar el aprovechamiento del espacio y la integración de sistemas de automatización que permiten el monitoreo y ajuste en tiempo real de factores como temperatura, humedad y niveles de riego. Este enfoque multifacético asegura que el invernadero no solo sea un espacio funcional para la producción de cultivos, sino también un entorno acorde para la investigación aplicada en tecnologías agrícolas y sostenibilidad.

### 3.1. Diseño mecánico en 3D

En esta etapa del proyecto, se empleó el software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) SolidWorks para modelar y visualizar de manera precisa la estructura y distribución del invernadero antes de su ejecución. Esta herramienta permitió desarrollar un diseño detallado que facilitó la integración eficiente de todos los componentes del sistema, tales como las estructuras de soporte, los sistemas de riego automatizado, y los elementos de ventilación y control climático. La capacidad de realizar simulaciones y análisis previos a la construcción permitió optimizar el uso del espacio disponible, garantizando una distribución que favoreciera tanto la operatividad como la accesibilidad para el cultivo. Además, el proceso de modelado permitió identificar y resolver posibles inconvenientes desde la etapa de diseño, lo cual contribuyó a la reducción de costos imprevistos y tiempos de ejecución. De igual manera, la visualización detallada del diseño facilitó la planificación de la instalación y la coordinación de las distintas fases del proyecto. Este enfoque, que prioriza la precisión y la optimización de recursos, no solo asegura una ejecución eficiente del proyecto, sino que también establece las bases para una operación sostenible y de alto rendimiento del invernadero, con un enfoque particular en la eficiencia energética y el manejo responsable de los recursos.

El diseño mecánico en 3D del invernadero contempla un espacio cerrado con una superficie de 12 metros cuadrados, distribuidos en 3 metros de ancho por 4 metros de largo. Este espacio está delimitado por una estructura metálica fabricada con Perfiles Tubulares Rectangulares (PTR), dispuesta de manera vertical para garantizar la estabilidad y resistencia de la construcción. En la parte superior, la estructura presenta una configuración en forma triangular, también conocida como dos aguas, lo que permite una adecuada evacuación de aguas pluviales y facilita la ventilación natural, favoreciendo las condiciones climáticas internas del invernadero.

En la Figura 3.1 se presenta el diseño mecánico en 3D de la distribución de las estructuras metálicas PTR de 1 pulgada, que limitan el área de 12 metros cuadrados, antes mencionado. La representación se muestra en una vista isométrica, que permite una visualización clara y precisa de la disposición y la interconexión de los componentes estructurales. Este diseño ha sido modelado utilizando el software SolidWorks, lo que asegura una alta fidelidad en las dimensiones y proporciones, así como la posibilidad de realizar simulaciones de comportamiento estructural bajo diversas condiciones.

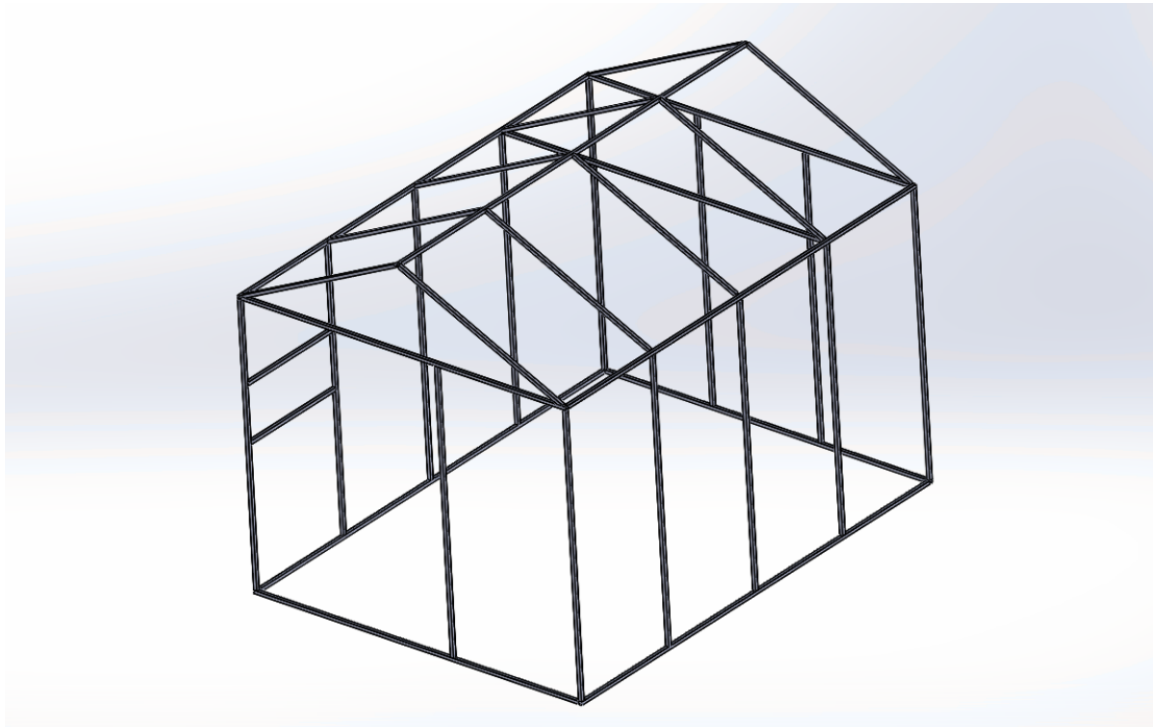


Figura 3.1 Diseño mecánico de estructuras metálicas del invernadero académico. Vista isométrica. Elaboración propia.

Adicionalmente, se integró un diseño mecánico en 3D para la distribución de macetas y tuberías dentro del invernadero, con el objetivo de optimizar la organización y el manejo de los cultivos. Este diseño contempla la inclusión de dos secciones de mesas de madera, diseñadas para albergar un total de 9 macetas, permitiendo la distribución eficiente de los cultivos en bloques. El diseño ergonómico de las mesas facilita la manipulación eficiente de las plantas y mejora el acceso a los cultivos para su observación, riego y mantenimiento. Además, su altura y distribución fueron planificadas para reducir la fatiga del usuario al realizar actividades de cultivo, promoviendo un entorno de trabajo más cómodo y eficiente. Además, esta disposición facilita el control y monitoreo de diferentes tipos de cultivos, al segmentar el espacio en áreas definidas que favorecen el manejo individualizado de cada bloque (ver Figura 3.2). La disposición de las tuberías de policloruro de vinilo (PVC) se planificó de forma que permita una irrigación eficiente, garantizando que cada maceta reciba el riego adecuado de manera uniforme y controlada por medio de la activación de electroválvulas de 12 VCD. Además, este diseño en 3D no solo facilita la visualización del montaje y la distribución espacial, sino que también permite realizar simulaciones para optimizar el flujo de agua y la disposición de los cultivos, mejorando las condiciones para su crecimiento y asegurando un manejo adecuado de los recursos (ver Figura 3.3).

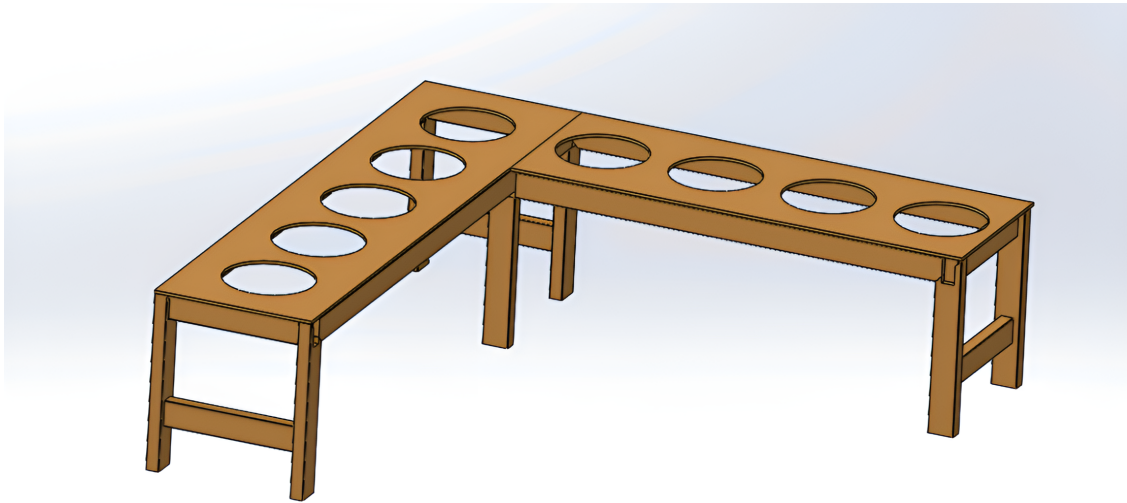


Figura 3.2 Diseño mecánico en 3D de la distribución de bloques de cultivos por medio de macetas que serán ubicadas en mesas de madera. Vista isométrica. Elaboración propia.

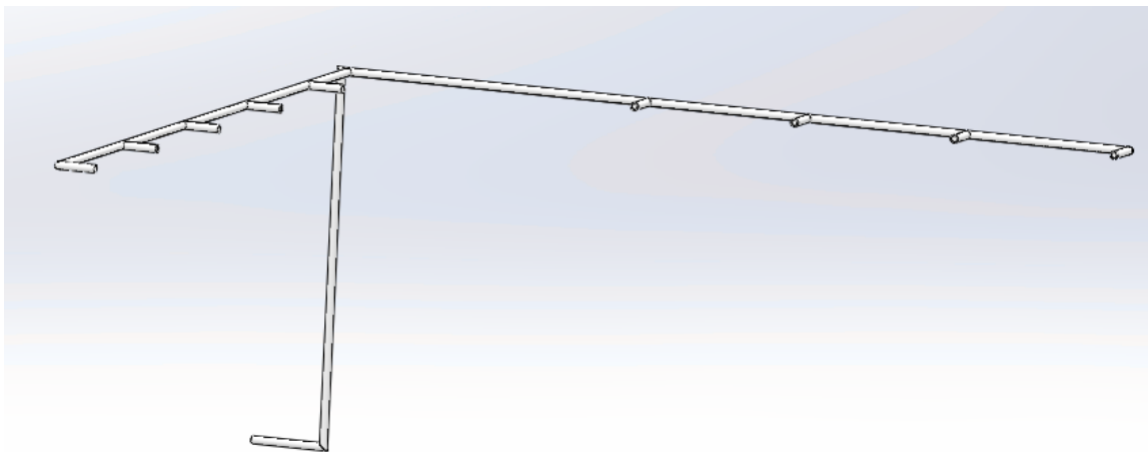


Figura 3.3 Diseño mecánico en 3D de la distribución espacial de las tuberías de PVC. Vista isométrica. Elaboración propia.

La integración de los componentes del invernadero se ilustra en la Figura 3.4, donde se presenta la disposición de los elementos fundamentales que conforman la estructura y los sistemas operativos del mismo. En dicha figura, se observa la organización de 8 macetas ubicadas en las secciones centrales de las mesas de madera, lo cual facilita el acceso y manejo de los cultivos. Además, se muestra la instalación de un sistema de tuberías de PVC, que se conecta de manera eficiente a electroválvulas y aspersores, configurando un sistema de riego automatizado que asegura una distribución uniforme del agua, optimizando el consumo de recursos hídricos y garantizando la salud y el crecimiento adecuado de las plantas.

El noveno espacio, deliberadamente no ocupado por una maceta, ha sido destinado para la instalación de un contenedor de mayor capacidad, el cual se empleará para la observación y monitoreo de cultivos experimentales o plantas acuáticas. Esta disposición no solo ofrece flexibilidad en términos de experimentación, sino que también permite la evaluación del comportamiento de diferentes especies bajo condiciones controladas, ampliando así las capacidades de investigación dentro del invernadero. Finalmente, en la parte inferior izquierda de la figura, se puede observar el tablero de control, diseñado para la gestión integral de los sistemas del invernadero. Este tablero centralizará el control de parámetros críticos como temperatura, humedad, riego y ventilación, lo que permitirá una supervisión en tiempo real de las condiciones ambientales y de los sistemas de soporte. Gracias a su interfaz avanzada, los usuarios podrán realizar ajustes precisos en cada sistema, asegurando así un entorno óptimo para el desarrollo de los cultivos y garantizando la eficiencia operativa del invernadero. Asimismo, la implementación de este sistema modular y adaptable ofrece la flexibilidad necesaria para llevar a cabo experimentos y estudios de diferentes tecnologías avanzadas.

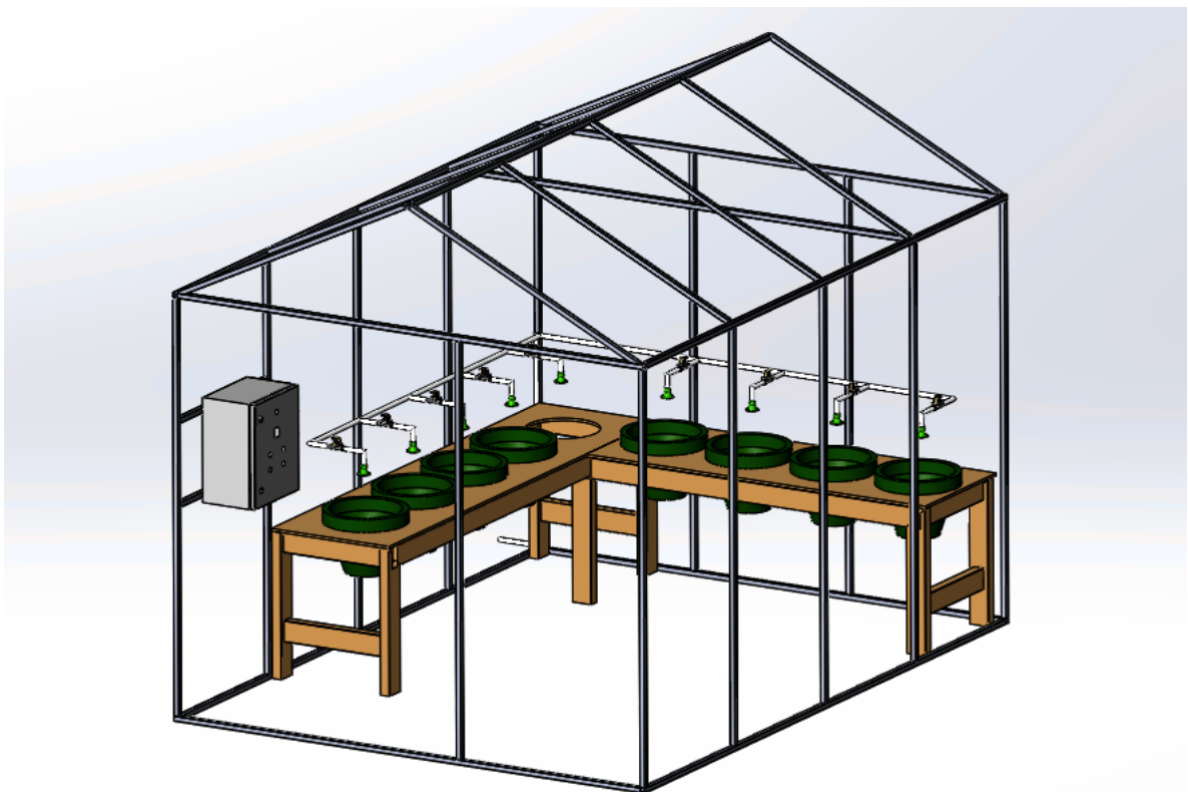


Figura 3.4 Diseño mecánico en 3D del invernadero académico. Vista isométrica. Elaboración propia.

## 3.2. Construcción

La construcción del invernadero académico se llevó a cabo en tres fases, con el objetivo de analizar y comprender la incorporación de los diferentes elementos estructurales, funcionales y operativos. El proceso de construcción permitió evaluar la viabilidad del diseño, optimizar el uso de materiales y garantizar un espacio adecuado para el desarrollo de cultivos en un entorno controlado. El invernadero está diseñado para fines académicos y experimentales, proporcionando un espacio adecuado para la enseñanza, investigación y pruebas en el ámbito de la agronomía y gestión ambiental. La estructura permitirá realizar estudios sobre diferentes tipos de cultivos, sustratos, riego y control de variables ambientales como temperatura y humedad.

### 3.2.1. Fase No. 1: Estructura base

En esta primera etapa, se delimitó el área del invernadero mediante la instalación de perfiles estructurales de acero PTR de 1 pulgada. Para hacer un uso eficiente de los recursos disponibles, se reutilizaron perfiles metálicos que formaban parte de un intento anterior de construcción. Esto no solo optimizó costos, sino que también promovió un enfoque sustentable al aprovechar materiales ya existentes. La superficie total del invernadero fue establecida en 12 metros cuadrados, acorde con las especificaciones establecidas en la etapa de diseño. La estructura fue fijada a 0.70 metros por debajo del nivel del suelo utilizando una mezcla de cemento para construcción civil, de tal manera que garantizara estabilidad y resistencia ante condiciones ambientales externas como viento y lluvia, asegurando así la durabilidad del invernadero. Las uniones de los perfiles PTR fueron realizadas mediante soldadura por arco eléctrico utilizando electrodos 6011, lo que dio como resultado una estructura metálica de diseño similar al de techos a dos aguas (ver Figuras 3.5 y 3.6).

Además de la instalación de la estructura metálica, se implementaron tuberías de PVC de ½ pulgada para transportar el agua de riego hacia los cultivos. La regulación del flujo hídrico se gestiona mediante electroválvulas de 12 VCD, como se ilustra en las Figuras 3.7. Estas electro-válvulas, comúnmente utilizadas en sistemas de riego, permiten un control preciso del suministro de agua, optimizando el uso eficiente del recurso hídrico. Para garantizar una distribución uniforme del agua en cada cultivo, se integraron aspersores al sistema de tuberías de riego para proporcionar una cobertura homogénea y adaptándose a diferentes tipos cultivos (ver Figuras 3.8). La instalación y calibración adecuada de aspersores es crucial para maximizar la eficiencia del riego y minimizar el desperdicio de agua en los cultivos por bloques.

Asimismo, se llevó a cabo la construcción e instalación de mesas de cultivo, diseñadas para soportar el peso de las macetas y optimizar un sistema de cultivo por bloques. Estas mesas fueron fabricadas con madera reutilizada proveniente del intento anterior del invernadero, seleccionando a aquellas partes resistentes a la humedad y a las variaciones térmicas dentro del invernadero, lo que garantiza su durabilidad y funcionalidad a largo plazo. El ensamblaje de las mesas incluyó fijaciones con tornillos y refuerzos laterales en las patas, asegurando una mayor resistencia estructural y previniendo deformaciones causadas por la carga. El diseño ergonómico de las mesas facilita la manipulación eficiente de las plantas y mejora el acceso a los cultivos para su observación, riego y mantenimiento. Además, su altura y distribución fueron planificadas para reducir la fatiga del usuario al realizar actividades de cultivo, promoviendo un entorno de trabajo más cómodo y eficiente. Para reforzar su estabilidad, las mesas fueron ensambladas con uniones robustas y tratamientos protectores que prolongan la vida útil de la madera frente a la exposición constante a la humedad y posibles plagas. Su disposición en forma de "L" dentro del invernadero fue estratégicamente organizada para optimizar el espacio disponible, permitiendo una mejor circulación del aire y facilitando la implementación de sistemas de riego y drenaje, así como un rápido acceso a las plantas, reduciendo la fatiga en las tareas de cultivo. En conjunto, estas mesas de cultivo representan un componente clave en la mejora del rendimiento agrícola dentro del invernadero, proporcionando una estructura confiable y funcional que favorece el crecimiento saludable de las plantas y la eficiencia en su manejo (ver nuevamente Figuras 3.6 y 3.7).



Figura 3.5 Instalación de perfiles metálicos del invernadero académico. Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 3.6 Estructura inicial del invernadero. (a) Instalación de perfiles tubulares. (b) Instalación de tuberías de PVC y mesas de cultivos. Elaboración propia.



Figura 3.7 Construcción de mesas de cultivos y colocación de electro-válvulas. (a) Diseño en mesas. (b) Perforación de mesas. Elaboración propia.



Figura 3.8 Instalación de aspersores en la tuberías de PVC. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal. Elaboración propia.



Figura 3.9 Fase 1 de la construcción del invernadero. Elaboración propia.

En la Figura 3.9 se presentan los avances de la construcción del invernadero durante su primera fase. Se observa una alta correspondencia con el diseño en 3D, previamente expuesto en la Figura 3.4, evidenciando la fidelidad de la ejecución respecto al planteamiento original.

Los principales elementos de construcción del invernadero académico, junto con sus especificaciones técnicas, se detallan en la Tabla 3.1.

No.	Elementos	Valores
1	Contenedor	0.130 m <sup>3</sup> 1 mts × 0.40 mts.
8	Macetas	0.30 mts × 0.25 mts
2	Tubos PVC	1/2" con 4 mts c/u.
2	Perfiles PTR cuadrados	1" × 1" (calibre 18) con 6 mts c/u.
2	Tablas	mts × mts.
30	Electrodos de soldadura	6011 por arco eléctrico.

Tabla 3.1 Elementos de construcción del invernadero.

### 3.2.2. Fase No. 2: Componentes adicionales

Durante la segunda fase de construcción del invernadero, se instalaron varios componentes fundamentales que asegurarán el funcionamiento apropiado del sistema y favorecen el desempeño de los cultivos. Entre estos componentes, se incluyen la cubierta, el ventilador, el tablero eléctrico y las canaletas para cableado eléctrico. A continuación, se describen en detalle las características, funciones y ventajas de cada uno de estos componentes:

- **Cubierta.** La cubierta del invernadero está compuesta por una lona fabricada de polietileno, el cual es un material que se distingue por su bajo costo, durabilidad y facilidad de instalación. Este material fue elegido por ser altamente eficiente en términos de transmisión de luz, permitiendo que una cantidad significativa de radiación solar llegue al interior del invernadero, lo cual es esencial para el proceso de fotosíntesis y, por ende, para el crecimiento saludable de las plantas. Asimismo, la lona de polietileno posee una gran resistencia a los impactos mecánicos, incluso en condiciones de viento o lluvias intensas. Además, permite una apropiada gestión de la eficiencia energética debido al control preciso de la temperatura interna del invernadero. El área de la cubierta comprende un total de 36 metros cuadrados.

En la Figuras 3.10 y 3.11 muestran las ilustraciones del proceso de instalación de la cubierta de lona de polietileno, mostrando tanto la vista frontal como la posterior del mismo. Estas figuras ofrecen una visión detallada de las etapas implicadas en la implementación de dicho componente, destacando los aspectos de su colocación y fijación los trabajos de instalación de la cubierta de la lona de polietileno.

- **Ventilador.** El sistema de ventilación del invernadero está compuesto por un ventilador con un diámetro de 0.30 metros, diseñado para operar con una alimentación de 12 VCD. El ventilador desempeñará un aspecto esencial en la circulación del aire dentro del invernadero, con la finalidad de regular la temperatura y la humedad interna del invernadero, los cuales son factores cruciales para el crecimiento óptimo de las plantas. El control de estos factores ambientales permite crear un microclima favorable que maximiza el rendimiento de los cultivos. La alimentación a 12 VCD no solo optimiza el consumo energético, sino que también proporciona una operación más segura y sostenible, minimizando riesgos eléctricos y reduciendo la huella de carbono del sistema ecológico.
- **Canaletas eléctricas.** Para el tendido del cableado eléctrico, se emplearon canaletas de 40 mm×40 mm, las cuales son una solución robusta y segura para la organización y



(a)



(b)

Figura 3.10 Instalación de cubierta del invernadero. Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 3.11 Cubierta del invernadero. (a) Vista frontal. (b) Vista posterior. Elaboración propia.

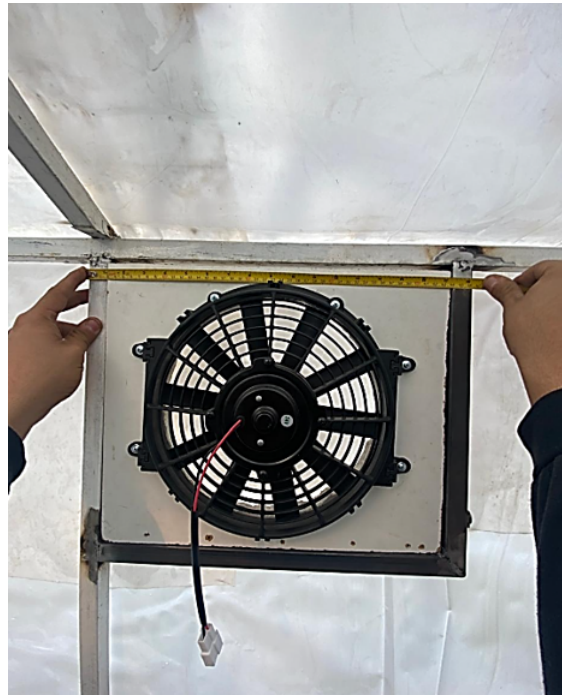


Figura 3.12 Sistema de ventilación del invernadero. Elaboración propia.

protección de los cables. Estas canaletas permiten un recorrido ordenado del cableado, previniendo posibles daños mecánicos o interferencias que podrían comprometer la seguridad y el funcionamiento de los sistemas eléctricos. Estas canaletas fueron elegidas por ser materiales de alta resistencia a la corrosión y a las condiciones ambientales típicas de un invernadero, como la humedad y las variaciones térmicas. Además, las canaletas facilitan el mantenimiento preventivo, permitiendo el acceso rápido y seguro al sistema eléctrico para cualquier ajuste o reparación necesario. La instalación de las canaletas puede ser apreciada en la Figura 3.13.

- **Tablero eléctrico.** Por otro lado, los sistemas de control del invernadero serán alojados en un tablero eléctrico de protección IP67, con dimensiones de 50 mm x 50 mm x 10 cm. Este tablero fue escogido con clasificación IP67, teniendo protección al polvo y soportar inmersiones temporales en agua, garantizando la protección de los componentes eléctricos en ambientes húmedos y polvorientos que puedan estar presentes en el invernadero (ver nuevamente Figura 3.13).



Figura 3.13 Fase 2 de la construcción del invernadero. Elaboración propia.

### 3.2.3. Fase No. 3: Dispositivos de medición y control

En esta última fase de construcción del invernadero, se realizó la instalación física y eléctrica de los dispositivos de medición y control, asegurando su correcta integración en el tablero de control. Estos dispositivos pertenecen tanto al campo de la electrónica industrial como al de los sistemas embebidos, con el objetivo de garantizar un monitoreo preciso y un control eficiente de las variables ambientales y operativas del invernadero. Tales dispositivos están conformados por sensores, controladores y actuadores. A continuación, se enlistan los dispositivos posicionados en el invernadero.

#### Dispositivos de medición y monitoreo

Estos dispositivos recopilan información sobre las condiciones ambientales e hídricas dentro del invernadero:

1. **Sensor hidrostático de nivel.** El sensor hidrostático es un dispositivo diseñado para medir la presión ejercida por un fluido en un punto específico, ya sea líquido o gas, convirtiéndola en una señal que puede ser interpretada como un nivel o altura de líquido. Su principio de operación está basado en la presión hidrostática, la cual establece que la presión dentro de un fluido aumenta a medida que la profundidad se incrementa debido al peso de la columna de líquido que se encuentra sobre el punto de

medición. Esta característica permite que los sensores hidrostáticos sean ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales, ambientales y de monitoreo de fluidos. El sensor hidrostático requiere periódicamente de calibración para asegurar mediciones exactas, especialmente en entornos donde la precisión es crucial. Para el caso de nuestro invernadero, se optó por la utilización de un sensor hidrostático modelo QDY60A, que cuenta con un rango lineal de cinco metros, y opera con una alimentación de 24 VCD, teniendo una salida analógica de 4-20 mA. Este sensor medirá el nivel del tanque de mayor capacidad en nuestro invernadero.

2. **Sensor de temperatura y humedad ambiental.** Este sensor ambiental es usado para recopilar y monitorear las condiciones climáticas en diversos entornos, como en invernaderos, donde el control de tales variables es crucial para el crecimiento y desarrollo apropiado de las plantas. Estos sensores permiten realizar un seguimiento constante de la temperatura y la humedad relativa, asegurando que los niveles estén dentro de los rangos ideales para cada tipo de cultivo. En el caso del invernadero, se utilizó el sensor digital de humedad y temperatura DHT11, el cual es un dispositivo de bajo costo basado en las tecnologías de sistemas embebidos. Sus rangos de medición de temperatura son 0°C a 50°C, con una precisión de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Además, el rango de humedad está entre 20% a 80% de humedad relativa, con una precisión de  $\pm 5\% \text{ RH}$ . Su voltaje de alimentación opera en 5 VCD. Este sensor puede ser integrado fácilmente de manera sencilla en el invernadero académico, y estará posicionado a un costado en el tablero de control, teniendo conexiones eléctricas directas con el microcontrolador ESP32.
3. **Sensor de humedad del suelo.** Este tipo de sensor es construido para medir y monitorear la humedad y temperatura del suelo, siendo esencial en el monitoreo de los cultivos del invernadero y es crucial la información proporcionada al controlador para la regulación del sistema de riego. El usado en el invernadero es el sensor SEN-HS-CAP, el cual es un dispositivo basado en tecnología capacitiva, diseñado para medir la humedad del suelo mediante la detección de variaciones en la capacidad dieléctrica del suelo. Este sensor puede tener contacto con el suelo, con una profundidad, entre 5cm y 30cm, sin correr el riesgo de oxidación. Su rango de humedad está entre 0% (suelo seco) a 100% (suelo saturado). Generalmente, operan adecuadamente en rangos que no alcanzan sus límites como 9% a 90%. Su voltaje de alimentación está dado entre 3.3 VCD y 5 VCD, teniendo una señal de salida de 0-3.3 VCD o 0-5 VCD usando el protocolo de comunicación serial I2C. Estos sensores serán utilizados en 8

de las nueve macetas, estando colocados en tierra a un lado del cultivo. En la Figura 3.14, se aprecian los trabajos de conexiones eléctricas de los sensores instalados en el invernadero.

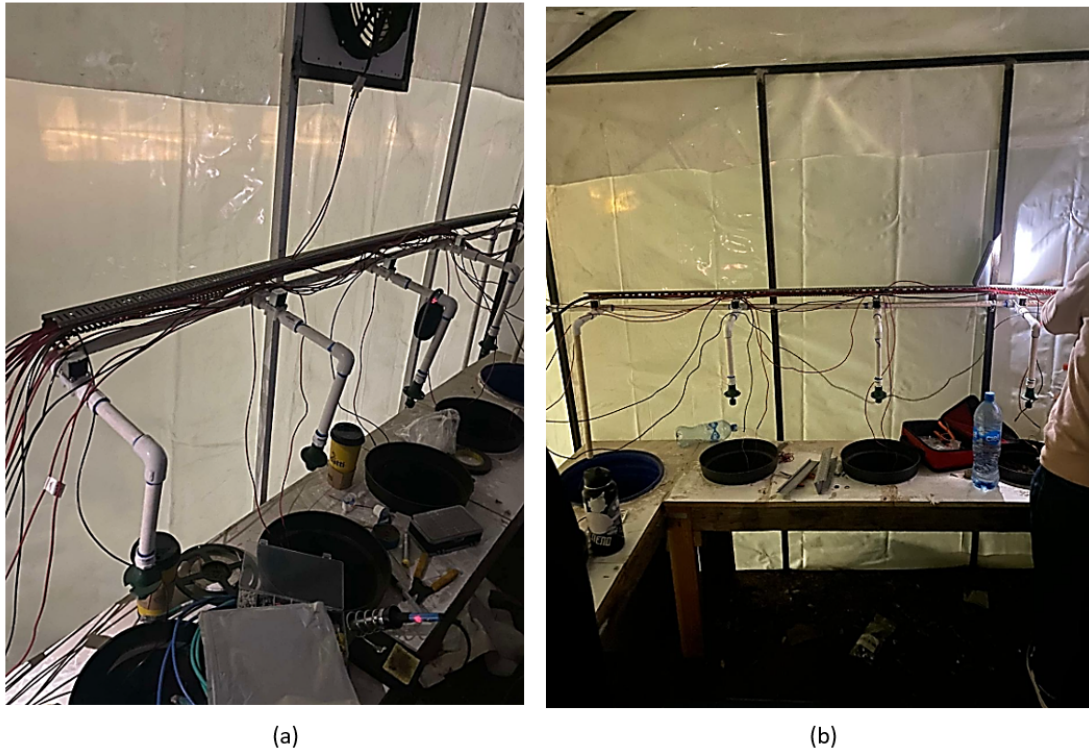


Figura 3.14 Trabajos de conexiones eléctricas de sensores. Elaboración propia.

### Dispositivos de control

En el tablero de control, se instalaron controladores industriales y un microcontrolador para regular el entorno ambiental del invernadero, así como para controlar el agua de riego de los cultivos. Estos dispositivos trabajarán de manera conjunta, sin estar conectados eléctricamente, para gestionar variables críticas de luminosidad, temperatura y humedad del ambiente y del suelo, asegurando condiciones óptimas para el cultivo. Enseguida se especifican los dispositivos usados.

1. **Controladores industriales.** Estos controladores están diseñados para gestionar procesos de distintas escalas y niveles de potencia, ofreciendo sistemas robusto, confiable y altamente eficiente dentro de esquemas de automatización industrial. En el invernadero se han instalado tres Controladores Lógicos Programables (PLCs, por sus siglas en

inglés) de la marca SIEMENS, modelo LOGO! 12/24 RCE, los cuales se encargan del accionamiento de nueve electroválvulas de riego de 12 VCD y de un relé de 24 VCD destinado al control del sistema de ventilación. Además, estos PLCs recopilan información proveniente de un sensor analógico de nivel hidrostático de 4-20 mA, permitiendo monitorear y regular con precisión los parámetros ambientales e hídricos del sistema. El tipo de salidas de los PLCs son relé, conectados con una fuente de alimentación de 12 VCD. Para adquirir el dato analógico se requiere un arreglo resistivo con el transmisor de nivel. La instalación de PLCs se ilustran en las Figuras 3.15-3.16.

2. **Microcontrolador.** Este tipo de dispositivos son la base del funcionamiento de los sistemas embebidos, encargados de procesar las señales digitales y analógicas en niveles de voltaje de 0-3.3 VCD y 0-5 VCD, y al mismo tiempo activar dispositivos de baja potencia. El microcontrolador ESP32-S2 fue incorporado en el tablero principal con el objetivo de recuperar los datos de los ocho sensores de temperatura y humedad del suelo SEN-HS-CAP que se encuentran instalados en dentro de las macetas. Además, procesará la información del sensor ambiental DHT11. Además, activará una tira de LEDs RGB WS2812B que brindará luminosidad al invernadero (ver Figura 3.15).

### Actuadores

En este apartado se describen los actuadores empleados en el sistema de automatización del invernadero, los cuales desempeñan un papel clave en el control de variables ambientales y en la gestión del riego. Estos dispositivos han sido seleccionados considerando su fiabilidad, eficiencia energética y capacidad de integración con los controladores programables del sistema. A continuación, se detallan los actuadores implementados:

- **Electroválvulas.** Para la regulación automatizada del flujo de agua, se instalaron nueve electroválvulas de 12 VCD con un diámetro de  $\frac{1}{2}$  pulgada, diseñadas para operar mediante la activación de un solenoide. Estas electroválvulas permiten la distribución controlada del riego en distintas secciones del invernadero, asegurando que cada área reciba la cantidad de agua adecuada en función de las necesidades hídricas de los cultivos. Además, su implementación proporciona una gestión eficiente del recurso hídrico, reduciendo desperdicios y optimizando el consumo de agua en la producción del invernadero.
- **Ventilador.** Con el objetivo de garantizar una ventilación adecuada y el mantenimiento de condiciones ambientales óptimas, se implementó ventilador de 12 VCD de ope-

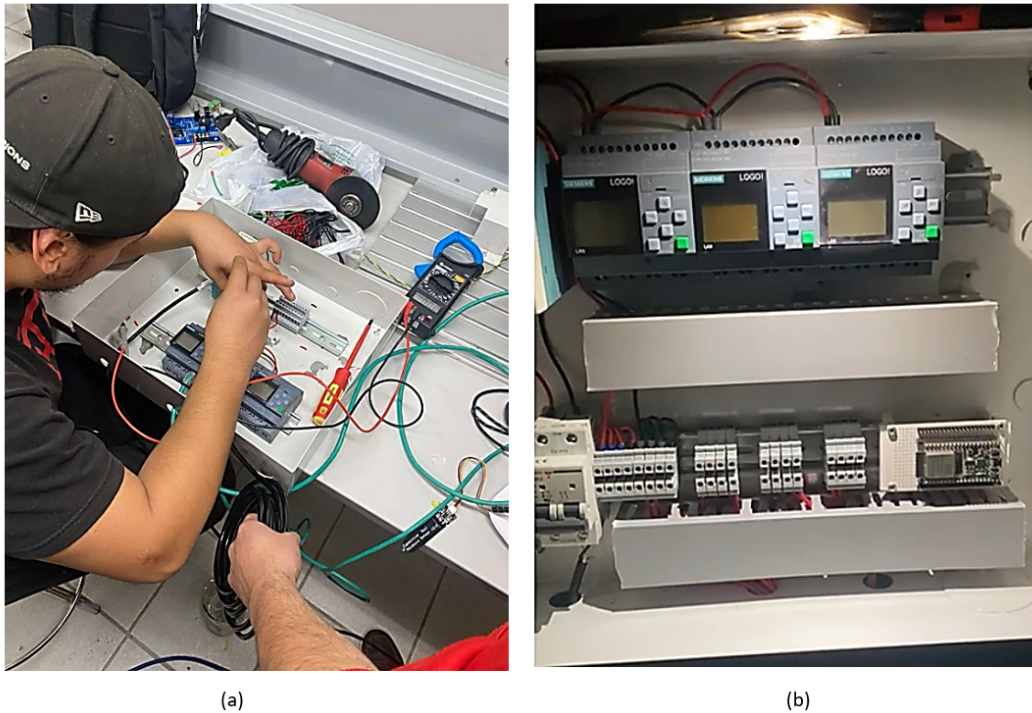


Figura 3.15 Instalación de controladores industriales en tablero de control. Elaboración propia.

ración. Este sistema permite controlar la circulación del aire dentro del invernadero, favoreciendo la regulación térmica y evitando acumulaciones de calor o humedad excesiva que puedan afectar el desarrollo de las plantas. La ventilación adecuada es un factor crucial en la estabilidad del microclima, ya que influye directamente en la transpiración de los cultivos, la concentración de dióxido de carbono y la prevención de enfermedades relacionadas con la humedad.

- **Módulo de relevador y tiras de LEDs RGB.** Para garantizar una iluminación artificial eficiente y adaptable a las necesidades del cultivo, el invernadero está equipado con un módulo de relevador de 5 VCD a 12 VCD de cuatro canales para la activación de tiras de LEDs RGB WS2812B, las cuales permiten ajustar tanto la intensidad como el espectro de luz emitido. Este tipo de iluminación programable contribuye a optimizar el crecimiento de las plantas al proporcionar espectros específicos de luz que favorecen distintos procesos fisiológicos, como la fotosíntesis y la floración. La implementación de tecnología LED en la iluminación del invernadero no solo mejora la eficiencia energética del sistema, sino que también permite una gestión más precisa

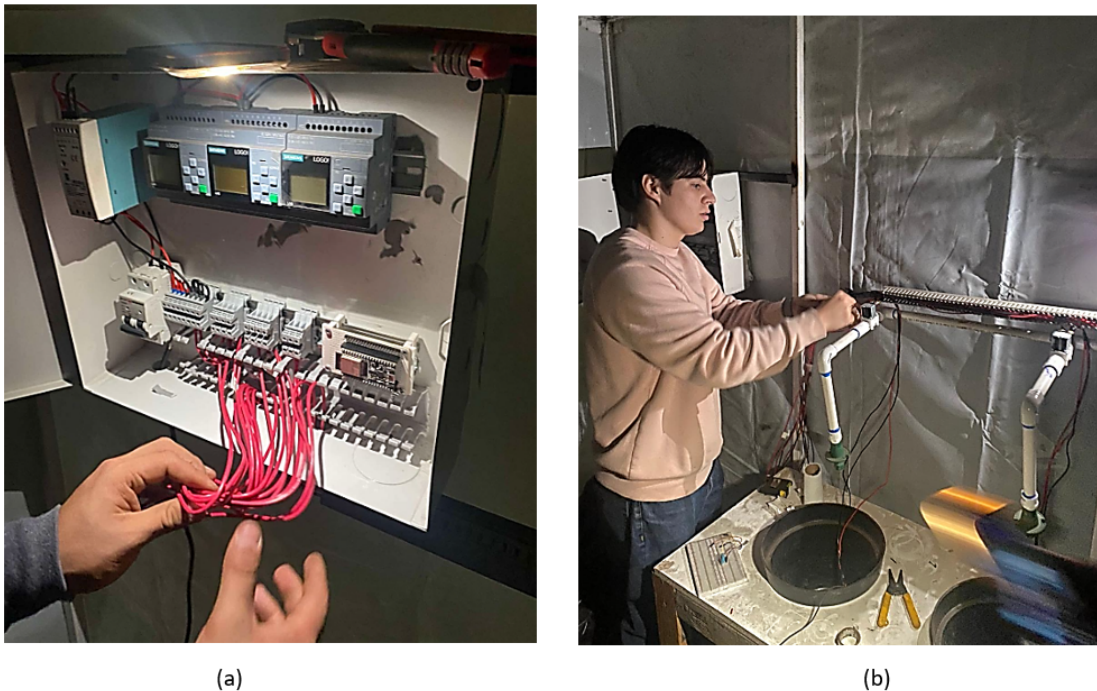


Figura 3.16 Cableado eléctrico de los PLCs LOGO!. Elaboración propia.

de la fotoperiodicidad, facilitando la adaptación de los cultivos a diferentes condiciones ambientales

En la tabla 3.2 se enlistan los dispositivos electrónicos incorporados al invernadero académico, tanto de la familia de la electrónica industrial como de los sistemas embebidos, junto con algunos datos técnicos.

En la Figura 3.17 se muestran los componentes más relevantes empleados en el diseño e implementación del invernadero escolar. En particular, la Figura 3.17(a) presenta los dispositivos integrados mediante tecnología de bajo consumo energético, característica de los sistemas embebidos. Entre estos destacan el microcontrolador ESP32-S2 WROOM, ocho sensores de humedad y temperatura del suelo modelo SEN-HS-CAP, así como un sensor DHT11, encargado de medir temperatura y humedad relativa del ambiente. Por otra parte, la Figura 3.17(b) ilustra los elementos relacionados con la electrónica industrial. En este grupo se incluyen tres controladores lógicos programables (PLC) LOGO! versión 8.3 de la marca Siemens, un transmisor de nivel hidrostático QDY60A, nueve electroválvulas de 12 VCD, y un ventilador axial que opera con el mismo voltaje. Estos dispositivos permiten la automatización de diversas funciones dentro del invernadero, tales como el control de riego, ventilación y monitoreo de variables críticas para el desarrollo óptimo de los cultivos.

Tabla 3.2 Equipamiento del invernadero.

No.	Elementos	Datos técnicos
3	PLCs LOGO! marca Siemens	Modelos V8.3, 12/24 RCE. Alimentación a 24 VCD, entrada en CD, salidas a relevador.
1	Sensor de nivel QDY60A	Sensor de nivel hidrostático. Rango de medición de 0 – 5 mts, y de operación en 4 – 20mA, con alimentación de 24 VCD.
9	Electroválvulas	Accionamiento de 12 VCD, de 1/2 pulgada para tubería de agua.
1	Microcontrolador ESP32 S2.	Alimentación de 3.3 VCD, entradas/salidas operando entre 0 – 3.3 VCD.
1	Sensor DHT11	Sensor de temperatura y humedad ambiental, con alimentación de 0 – 3.3 o 0 – 5 VCD. Sus rangos de medición son: temperatura 0°C–50°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), humedad: 20 – 90% ( $\pm 5\%$ ).
8	Sensores SEN-HS-CAP	Sensores de temperatura y humedad del suelo. Su rango de medición varía entre 9% – 90%. Su alimentación es 0 – 3.3 o 0 – 5 VCD.
1	Relevador	Alimentación 12 VCD, 4 canales.
1	Ventilador	Alimentación 24 VCD.
1	Tira de LEDs RGB WS2812B	Alimentación de 5 VCD, 300 LEDs, longitud de tira de 5 mts.
1	Tablero de control	Protección IP65, de 0.40 mts $\times$ 0.40 mts $\times$ 0.10 mts.
2	Botones de arranque y paro.	Alimentación con 24 VCD

### 3.3. Conexiones eléctricas

Para el sistema de control de riego de los cultivos, se implementaron tres controladores lógicos programables (PLCs) LOGO! de Siemens, interconectados en red. Estos PLCs se encargan de activar o desactivar un total de nueve electroválvulas, en función de las lecturas de humedad y temperatura del suelo, las cuales son obtenidas mediante sensores SEN-HS-CAP. Dichos sensores están conectados a un microcontrolador ESP32, que se encarga de recopilar, procesar y transmitir las señales relevantes. Adicionalmente, el sistema de ventilación se encuentra controlado por el tercer PLC LOGO!, el cual opera en función de las condiciones ambientales, específicamente la humedad relativa y la temperatura del aire. Estas variables son medidas por un sensor DHT11, también conectado al ESP32, que envía la información

al PLC para la toma de decisiones. Las conexiones eléctricas de los PLCs LOGO! y del microcontrolador ESP32, se presentan en las Figuras 3.18 y 3.19, respectivamente.

En la Figura 3.19 se muestran las conexiones eléctricas de las tiras de LEDs al microcontrolador ESP32, utilizando un módulo de relés de cuatro canales. La activación de las tiras será controlada mediante un interruptor, el cual permitirá encender o apagar los LEDs de forma manual o automática, dependiendo de la lógica de control implementada en el sistema.

Cabe destacar que las conexiones eléctricas de los actuadores (electroválvulas y ventilador) están directamente gestionadas por los PLCs LOGO!, mientras que los sensores están conectados al microcontrolador ESP32, que actúa como unidad de adquisición de datos. El sistema incorpora una plataforma de Internet de las Cosas (IoT) con el objetivo de establecer una comunicación entre los actuadores controlados por los PLCs LOGO! y los sensores gestionados por el microcontrolador ESP32. Esta plataforma permite la transmisión bidireccional de datos, facilitando así la supervisión y el control coordinado de los dispositivos de electrónica industrial y de bajo consumo energético en el invernadero. Además, la solución

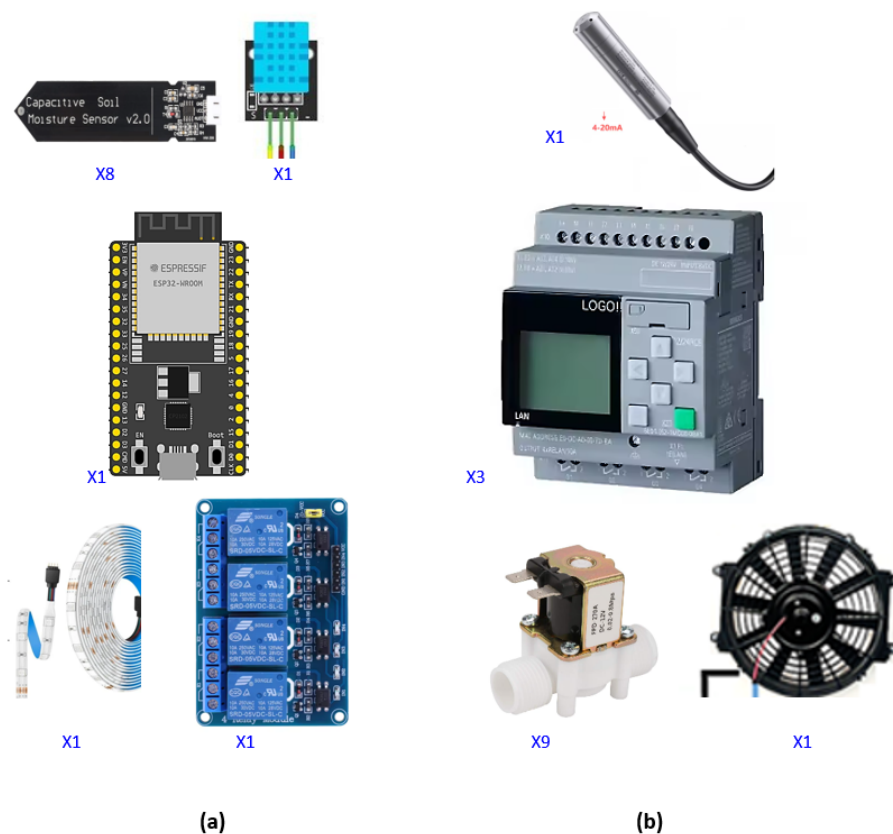


Figura 3.17 Dispositivos destacados implementados en el invernadero. (a) Elementos de bajo consumo de energía. (b) Dispositivos de electrónica industrial. Elaboración propia.

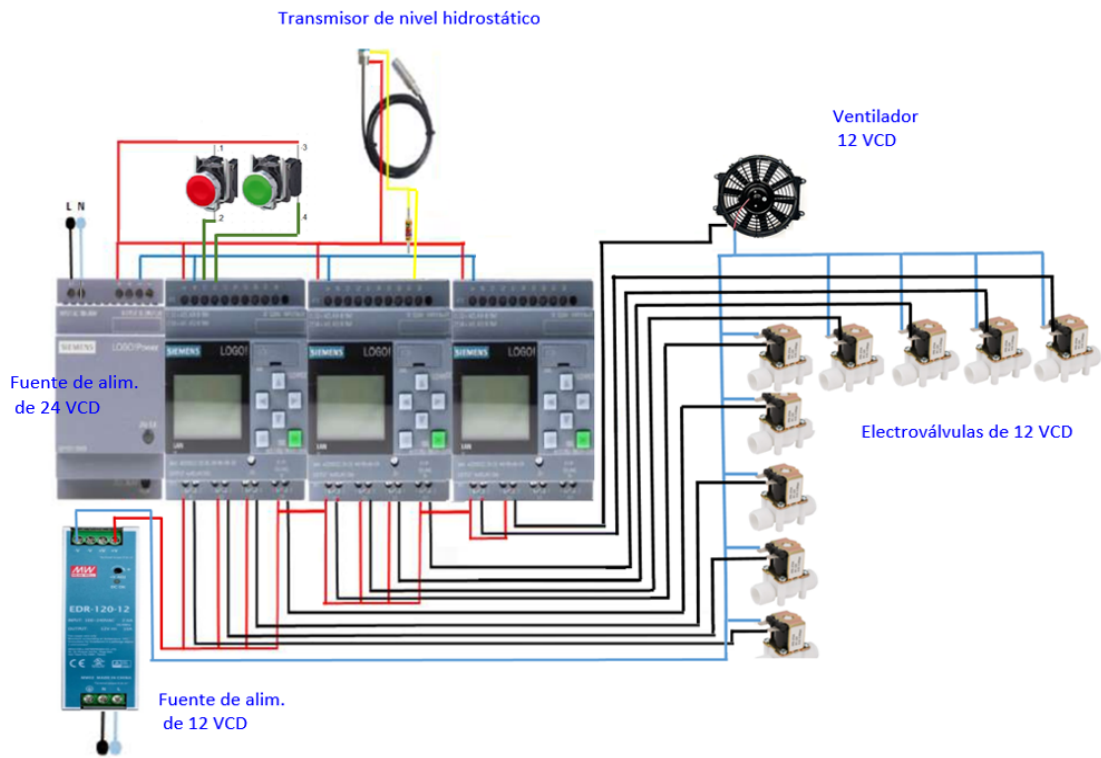


Figura 3.18 Diagrama eléctrico de PLCs LOGOs en invernadero. Elaboración propia.

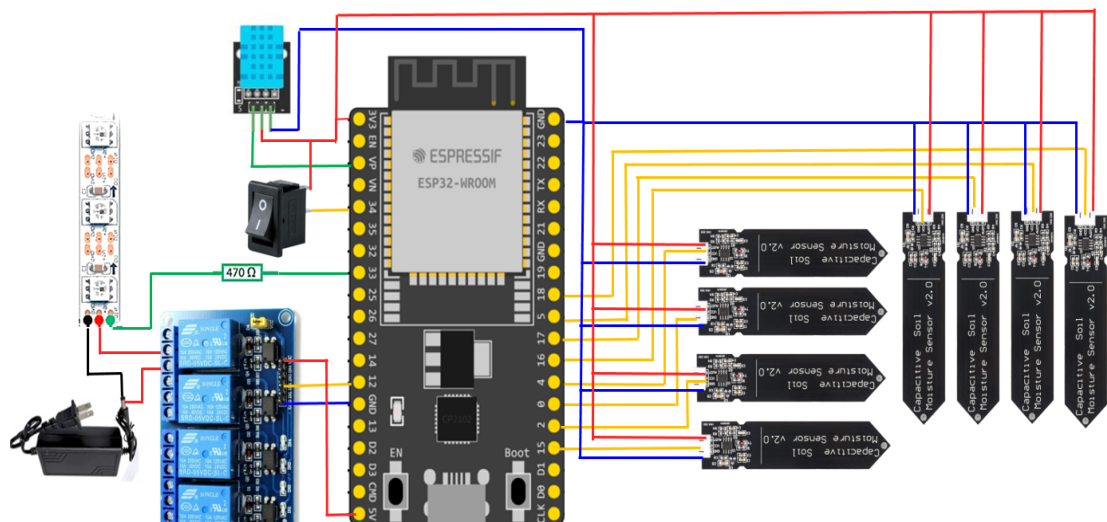


Figura 3.19 Diagrama eléctrico de microcontrolador ESP32 LOGO en invernadero. Elaboración propia.

IoT contempla la supervisión remota en tiempo real, lo que permite a los usuarios monitorear continuamente el estado operativo de los sensores (humedad y temperatura del suelo y del ambiente) y actuadores (electroválvulas y ventilador). También se habilita el almacenamiento de datos en red local o nube, lo que garantiza la trazabilidad histórica de las variables medidas, permitiendo análisis posteriores para la toma de decisiones fundamentadas.

La visualización dinámica de los datos se realiza a través de una interfaz gráfica accesible desde dispositivos móviles o computadoras, ofreciendo una experiencia intuitiva para el usuario final. Todo este esquema de integración tecnológica permite optimizar los procesos de riego y ventilación de forma automática, eficiente y basada en condiciones reales, promoviendo un uso más racional del agua y de la energía en entornos agrícolas controlados.

### 3.4. Arquitectura del sistema de automatización

La arquitectura del sistema de automatización del invernadero está diseñada bajo un enfoque modular y escalable, integrando sensores, actuadores, (micro)controladores, y una plataforma de gestión y visualización de datos. A continuación, se describen sus principales componentes y su interacción dentro del sistema.

1. **Capa de adquisición de datos.** Esta capa está conformada por una red de sensores encargados de monitorear las variables ambientales y del suelo en tiempo real. Cada sensor está estratégicamente ubicado en el invernadero para garantizar una recolección de datos precisa y representativa. Los principales dispositivos utilizados incluyen:
  - a) Sensor de temperatura y humedad: Mide las condiciones climáticas dentro del invernadero para ajustar los sistemas de ventilación y calefacción.
  - b) Sensor de humedad del suelo: Recupera el nivel de humedad en el sustrato, permitiendo la automatización del riego para un uso eficiente del agua.
2. **Capa de actuación.** Los actuadores son los dispositivos encargados de modificar el entorno del invernadero en función de las mediciones realizadas por los sensores. Estos elementos reciben señales de los (micro)controladores para garantizar condiciones óptimas para el cultivo. Entre los actuadores utilizados en el invernadero se encuentran:
  - a) Sistema de control de riego de electroválvulas: Regula el suministro de agua en función de la humedad del suelo, empleando técnicas de riego por aspersión

b) Ventilación automatizada: Controla la apertura y cierre de ventanas o extractores para mantener niveles adecuados de temperatura y humedad. Sistema de calefacción: Activa dispositivos térmicos cuando la temperatura desciende por debajo del umbral óptimo para el desarrollo del cultivo.

3. **Capa de procesamiento y comunicación.** Esta capa se encarga de recibir, procesar y transmitir la información obtenida por los sensores, además de gestionar la ejecución de comandos hacia los actuadores. Para ello, se emplean los siguientes dispositivos:

- a) Microcontroladores de bajo consumo energético ESP32, que recopilan y procesan datos de los sensores, y ejecutan algoritmos para transmitirlos a una red local o nube de cómputo.
- b) Dispositivos de nivel industrial tales como PLCs LOGO! en conjunto con routers y una plataforma de IoT, permiten establecer un gateway IoT, que aseguran la comunicación con la red local o nube de cómputo para activar o desactivar las electroválvulas, permitiendo la estabilidad y escalabilidad en la automatización del invernadero (ver Figura 3.20).

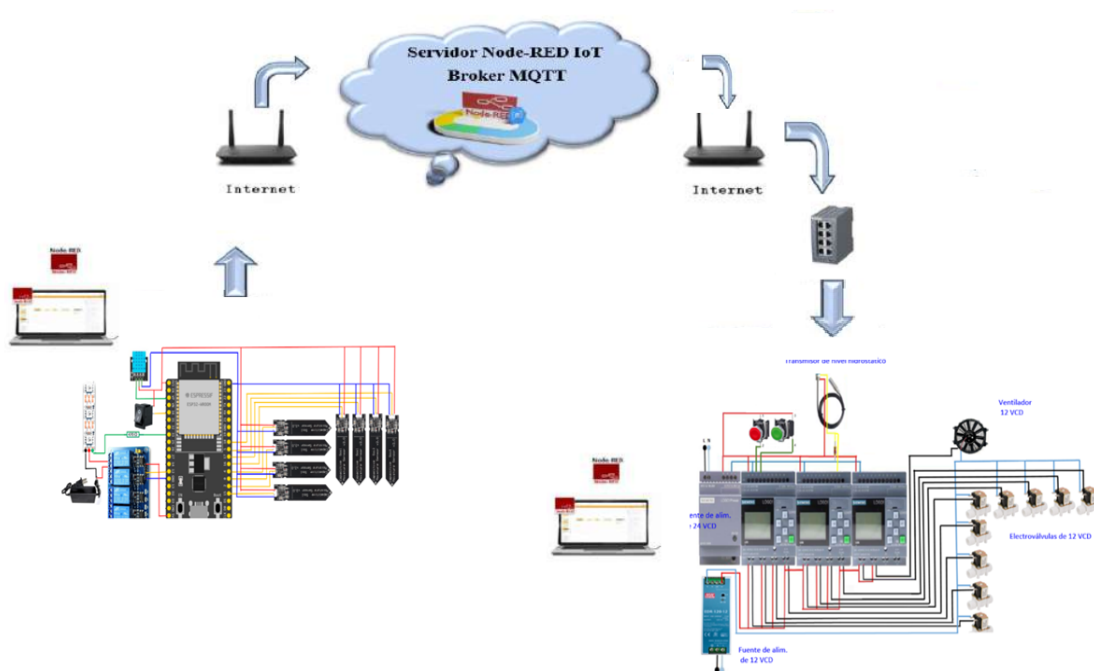


Figura 3.20 Red (local o por nube) IoT en el invernadero. Elaboración propia.

4. **Capa de gestión y visualización.** La plataforma Node-RED es el núcleo de la interfaz de gestión del sistema, proporcionando herramientas para la supervisión y control en tiempo real mediante una arquitectura basada en flujos de datos usando la comunicación MQTT [23, 41, 6]. Sus principales funciones incluyen:
- a) **Recepción y procesamiento de datos:** Integración de la información obtenida por los sensores para su análisis y generación de respuestas automáticas.
  - b) **Interfaz gráfica de usuario:** Visualización de variables críticas a través de dashboards virtuales, facilitando la supervisión del estado del invernadero.
  - c) **Automatización y toma de decisiones:** Implementación de reglas lógicas para activar o desactivar actuadores en función de las condiciones detectadas.

Por tanto, la arquitectura del sistema de automatización del invernadero combina tecnologías IoT con estrategias de control inteligente para mejorar la eficiencia en la producción agrícola. Su diseño modular permite la adaptación a distintos tipos de cultivos y condiciones ambientales, garantizando un monitoreo preciso y una gestión óptima de los recursos.



# Capítulo 4

## Resultados del control y monitoreo del invernadero

En este capítulo se presentan los resultados de la implementación de un sistema de automatización para un invernadero escolar, basado en la tecnología de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Se pone especial énfasis en la integración de la plataforma Node-RED como herramienta principal para la gestión y visualización de datos, permitiendo la comunicación entre sensores, actuadores y sistemas de control. El sistema de control desarrollado combina electrónica de nivel industrial con dispositivos de bajo consumo energético, característicos de los sistemas embebidos. Esta integración busca lograr un equilibrio entre robustez, eficiencia energética y flexibilidad en la automatización de los procesos del invernadero académico.

### 4.1. Programación de controladores LOGO!

Debido a la gran cantidad de actuadores instalados en el invernadero, los cuales están conectados a las salidas de tres controladores lógicos programables (PLCs) Siemens LOGO! (véase Figura 3.18), fue necesario desarrollar un proyecto de red que permitiera integrar y coordinar el funcionamiento de estos dispositivos. Para ello, se empleó el software LOGO! Soft Comfort, el cual facilitó el diseño, la configuración y la simulación de la comunicación entre los tres PLCs, garantizando así una operación sincronizada y eficiente de todos los actuadores. Esta integración no solo permitió mejorar la automatización del invernadero, sino que también optimizó el control de variables críticas como el riego, la ventilación, la iluminación y la regulación de temperatura, mediante una arquitectura de control distribuido. Además, las variables monitoreadas y controladas por los PLCs son recopiladas de la platafor-

ma de Internet de las Cosas (IoT) Node-RED a través de interfaz de red local, permitiendo la supervisión remota, el almacenamiento de datos históricos y la implementación de estrategias avanzadas de análisis y optimización en tiempo real.

La interconexión de los PLCs en el invernadero se estableció mediante comunicación industrial S7 (PROFINET), un protocolo basado en Ethernet que permite la transmisión rápida y confiable de datos entre dispositivos de automatización. Para configurar la red, se asignó una dirección IP única a cada uno de los controladores, utilizando las siguientes direcciones: 192.168.1.5, 192.168.1.3 y 192.168.1.2, correspondientes a los dispositivos identificados como LOGO! 8.3.1, LOGO! 8.3.2 y LOGO! 8.3.3, respectivamente. Asimismo, se tiene la comunicación con una computadora portátil cuya IP es 192.168.1.82, La configuración de la red, así como la asignación de direcciones y la definición de los roles de comunicación entre los PLCs (servidor y cliente), se llevó a cabo en el software LOGO! Soft Comfort. En la Figura 4.1 se muestra el esquema del proyecto de red diseñado en dicho entorno, donde se ilustran las conexiones lógicas entre los tres controladores y la estructura jerárquica de comunicación establecida.

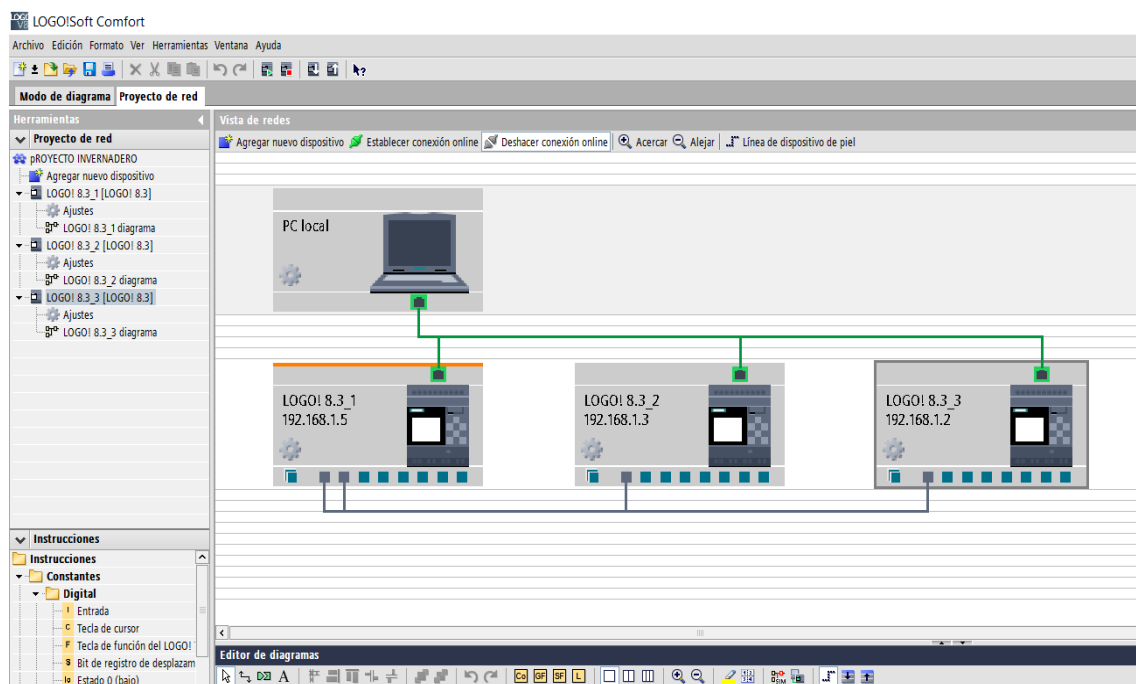


Figura 4.1 Proyecto de Red local con tres PLCs LOGO! Elaboración propia.

La información utilizada para la activación de las electroválvulas y ventilador, mediante las salidas de los controladores lógicos programables LOGO!, se obtiene de marcas (memorias internas) asociadas a variables de la red local de la plataforma IoT basada en Node-RED,

en comunicación con el microcontrolador ESP32 y los PLCs LOGO!. Adicionalmente, se consideran variables de entrada y salida de red para intercomunicación en los PLCs. Por otra parte, la señal proveniente del sensor de nivel hidrostático es configurada para operar bajo un escalamiento de 200 a 1000 unidades, correspondiente al rango de medición del sensor de 4 mA a 20 mA conectado a la entrada analógica  $AI_1$  del PLC LOGO! 8.3.1. El nivel de líquido en el tanque se determina a partir de esta variable escalada,  $x_1$ , mediante la siguiente expresión:

$$l_h = \frac{x_1 - 200}{8}, \quad (4.1)$$

donde  $h_l$  representa el nivel de líquido medido por el sensor hidrostático, expresado en centímetros,  $x_1$  es el valor de la señal escalada recibida en la entrada analógica  $AI_1$ . Este procedimiento consiste en restar 200 unidades al valor de  $x_1$  y dividir el resultado entre 8, obteniendo así el nivel de llenado real del tanque en centímetros. El flujo general de datos, la asociación de las marcas internas, y el procesamiento de la señal de nivel se ilustran en las Figuras 4.2 a 4.4.

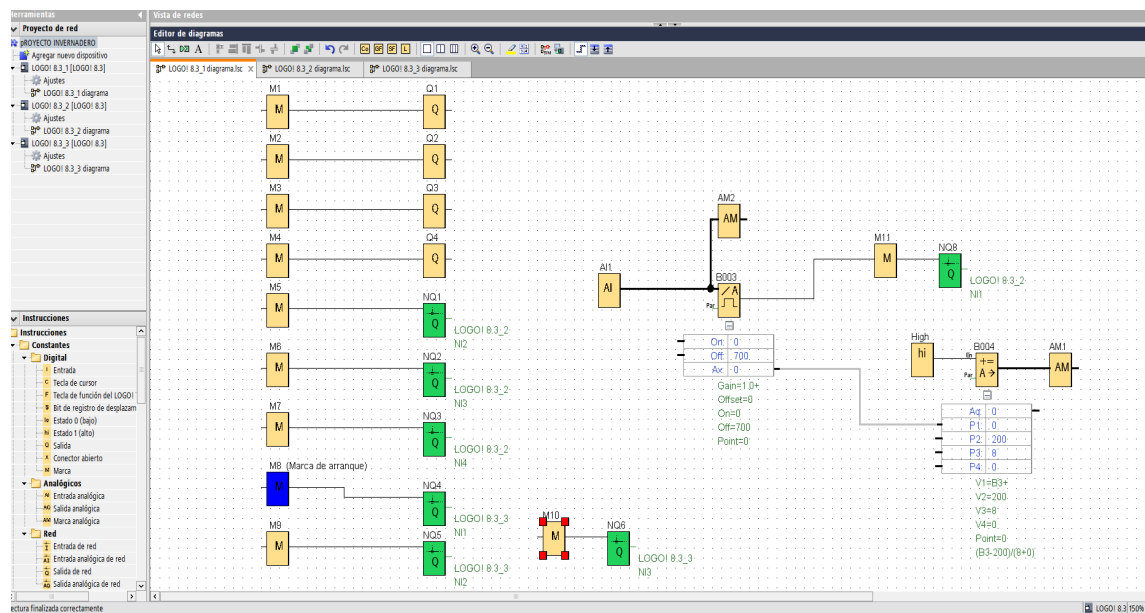


Figura 4.2 Programación de PLC LOGO! 8.3.1 para activación de electroválvulas, usando marcas, y configuración de sensor de nivel hidrostático. Elaboración propia.

Este enfoque híbrido, que combina automatización con comunicación industrial local S7 y conectividad IoT, fortalece la eficiencia operativa del invernadero, mejora la toma de decisiones basada en datos. Asimismo abre la posibilidad de integrar algoritmos de control inteligentes o predictivos en futuras etapas del proyecto.

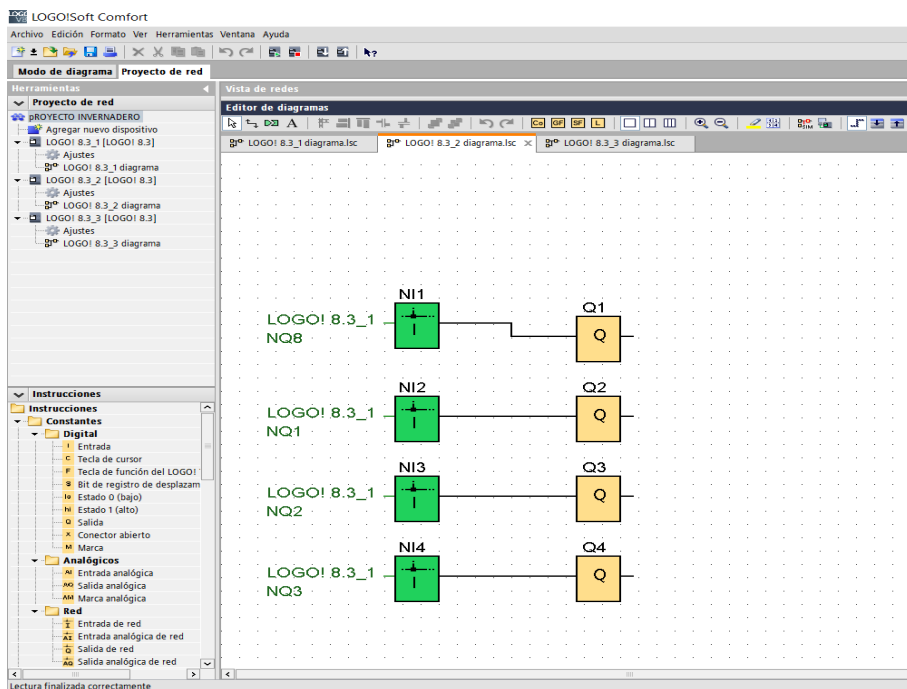


Figura 4.3 Programación de PLC LOGO! 8.3.2 para activación de electroválvulas, usando variables de red en la intercomunicación industrial con PLCs LOGO! Elaboración propia.

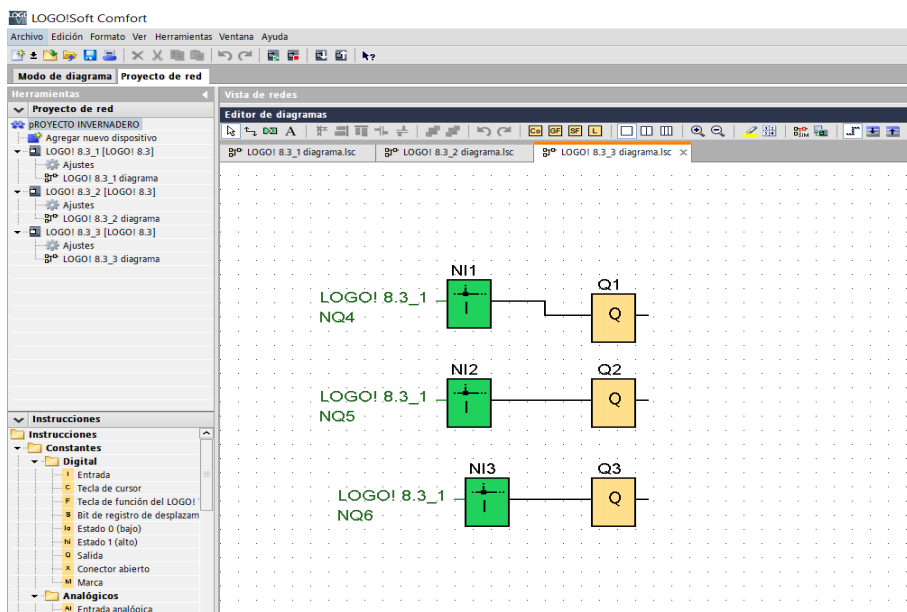


Figura 4.4 Programación de PLC LOGO! 8.3.3 para activación de electroválvulas y ventilador, usando variables de red en la intercomunicación industrial con PLCs LOGO! Elaboración propia.

## 4.2. Programación de microcontrolador ESP32

En esta sección se presenta el código de programación del microcontrolador ESP32 utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. El algoritmo desarrollado permite la configuración y operación de los sensores de humedad y temperatura del suelo SEN-HS-CAP, así como del sensor ambiental DHT11. Además, se gestiona el control de una tira de LEDs RGB, cuyo montaje se muestra en la Figura 3.19. El código implementado también establece la comunicación del ESP32 con la plataforma IoT Node-RED mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), bajo el modelo de publicador-suscriptor. En esta arquitectura, el ESP32 actúa como nodo publicador, transmitiendo de forma periódica las lecturas obtenidas tanto de los sensores de humedad del suelo como del sensor de temperatura y humedad ambiente. Esta información es enviada a tópicos específicos en el broker MQTT, desde donde puede ser recibida por nodos suscriptores configurados en Node-RED, permitiendo su posterior visualización, análisis y utilización para activar acciones automáticas.

En el protocolo MQTT, un tópico funciona como una ruta jerárquica que organiza y clasifica los mensajes enviados. Cada mensaje publicado por el ESP32 es etiquetado bajo un nombre de tópico (sensor/suelo/humedad o sensor/ambiente/temperatura), lo que permite que otros dispositivos o aplicaciones se suscriban únicamente a los datos que les interesa recibir, optimizando así el flujo de información y reduciendo el consumo de ancho de banda. Esta estructura flexible facilita el escalado del sistema y la incorporación de nuevos sensores o actuadores dentro de la red IoT. Esta configuración es clave para lograr una integración eficiente de los datos sensados en sistemas de monitoreo y control remoto basados en IoT.

### **Código No. 1: Programación de ESP32 para uso de sensores y publicación de datos en plataforma IoT.**

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <DHT.h>
/* PROGRAMACION DE ESP32 EN RED LOCAL */
// Credenciales WiFi
const char* ssid = "TP-Link_013E";
const char* password = "58884546";

// Configuración del servidor MQTT
```

```
const char* mqtt_server = "192.168.0.100";
// Cambia por la IP de servidor Mosquitto
const int mqtt_port = 1883;

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

// Pines de los sensores de humedad y DHT11
const int sensors[] = {36,39,34, 35, 32, 33, 25, 26};
const int DHTPin = 4;

// Valores analógicos para 0% y 100% humedad
// Valor analógico cuando el suelo está seco (0% humedad)
int dryValue = 3150;
// Valor analógico cuando el suelo está húmedo (100% humedad)
int wetValue = 1100;

// Configuración del DHT11
DHT dht(DHTPin, DHT11);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Configuración WiFi
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\nConectado al WiFi");

  // Configuración MQTT
  client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);

  while (!client.connected()) {
    Serial.println("Conectando a MQTT...");
```

```
    if (client.connect("ESP32Client")) {
        Serial.println("Conectado a MQTT");
    } else {
        delay(5000);
    }
}

for (int i = 0; i < 8; i++) {
    pinMode(sensors[i], INPUT);
}
// Inicializar el DHT11
dht.begin();
}

void loop() {
    client.loop();

    // Publicar datos de los sensores de humedad
    for (int i = 0; i < 8; i++) {
        int value = analogRead(sensors[i]);
        int percentage = map(value, dryValue, wetValue, 0, 100);
        percentage = constrain(percentage, 0, 100);

        char topic_value[25];
        char topic_state[25];
        char payload[10];

        // Publicar porcentaje
        sprintf(topic_value, "sensor/%d/", i);
        sprintf(payload, "%d", percentage);
        client.publish(topic_value, payload);

        sprintf(topic_state, "sensor/%d/state", i);
        if (percentage < 20) {
            // Enviar 'true' como booleano para switch
```

```
        client.publish(topic_state, "true");
    } else {
        // Enviar 'false' como booleano para switch
        client.publish(topic_state, "false");
    }
    delay(10);
}

// Leer la temperatura del DHT11
float temperature = dht.readTemperature();
if (isnan(temperature)) {
    Serial.println("Error al leer el DHT11");
    return;
}

char temp_topic[] = "sensor/temperature";
char temp_payload[10];
sprintf(temp_payload, "%.2f", temperature);
client.publish(temp_topic, temp_payload);

// Publicar estados de switches en función de la temperatura
if (temperature >30) {
    // Switch para temperatura alta
    client.publish("sensor/temperature/high", "true");
    client.publish("sensor/temperature/low", "false");
} else if (temperature <15) {
    client.publish("sensor/temperature/high", "false");
    // Switch para temperatura baja
    client.publish("sensor/temperature/low", "true");
} else {
    client.publish("sensor/temperature/high", "false");
    client.publish("sensor/temperature/low", "false");
}
}
```

### 4.3. Programación en Node-RED IoT

La configuración de los flujos se lleva a cabo en la plataforma IoT Node-RED, la cual permite el desarrollo de aplicaciones mediante una interfaz gráfica basada en nodos. En este entorno, un flujo corresponde a una plantilla de programación visual en la que se disponen e interconectan nodos funcionales, cada uno con un propósito específico, como la adquisición de datos, su procesamiento, el análisis condicional, visualización o incluso la conexión con servicios en la nube. Adicionalmente, la plataforma de IoT Node-RED simplifica la implementación de soluciones complejas, reduce la carga de programación de líneas de código y facilita la integración de dispositivos o sistemas heterogéneos.

Para establecer la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y la plataforma Node-RED, se utiliza el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), reconocido por su bajo consumo de ancho de banda, bajo consumo energético y arquitectura basada en el modelo publicador/suscriptor. En esta implementación, se configura un broker MQTT local, ubicado en la dirección IP 192.168.0.100 y operando en el puerto estándar 1883. Este broker actúa como intermediario entre el ESP32 y Node-RED, permitiendo que los sensores con el ESP32 publiquen datos sin requerir una conexión directa con cada uno de los clientes suscriptores, generando flexibilidad en el sistema de comunicación. Los datos generados por los sensores conectados al ESP32 son publicados en distintos tópicos MQTT. Las lecturas del sensor de humedad se envían al tópico sensor/humedad, mientras que los valores de temperatura obtenidos del sensor DHT11 se publican en el tópico sensor/temperatura. Estos tópicos son suscritos mediante nodos entrantes MQTT en Node-RED, cuyos datos son posteriormente canalizados hacia nodos de visualización de tableros virtuales conocidos como dashboard, permitiendo el monitoreo en tiempo real de las variables ambientales a través de una interfaz gráfica intuitiva y accesible desde dispositivos conectados a la red local.

La Figura 4.5 presenta un esquema representativo de esta configuración, donde se visualiza la arquitectura general del sistema, la disposición lógica de los nodos, su interconexión, y el flujo continuo de datos desde los sensores hasta la visualización en tiempo real.

Con el propósito de habilitar la comunicación entre los controladores programables Siemens LOGO! y la plataforma de gestión IoT Node-RED, se procede, en primera instancia, a la descarga e instalación de la librería correspondiente al protocolo de comunicación Siemens S7, la cual habilita el intercambio de datos de manera eficiente y segura entre ambos entornos. Una vez implementada la conectividad, los datos obtenidos a partir de sensores industriales y dispositivos de adquisición basados en ESP32 son procesados en tiempo real en

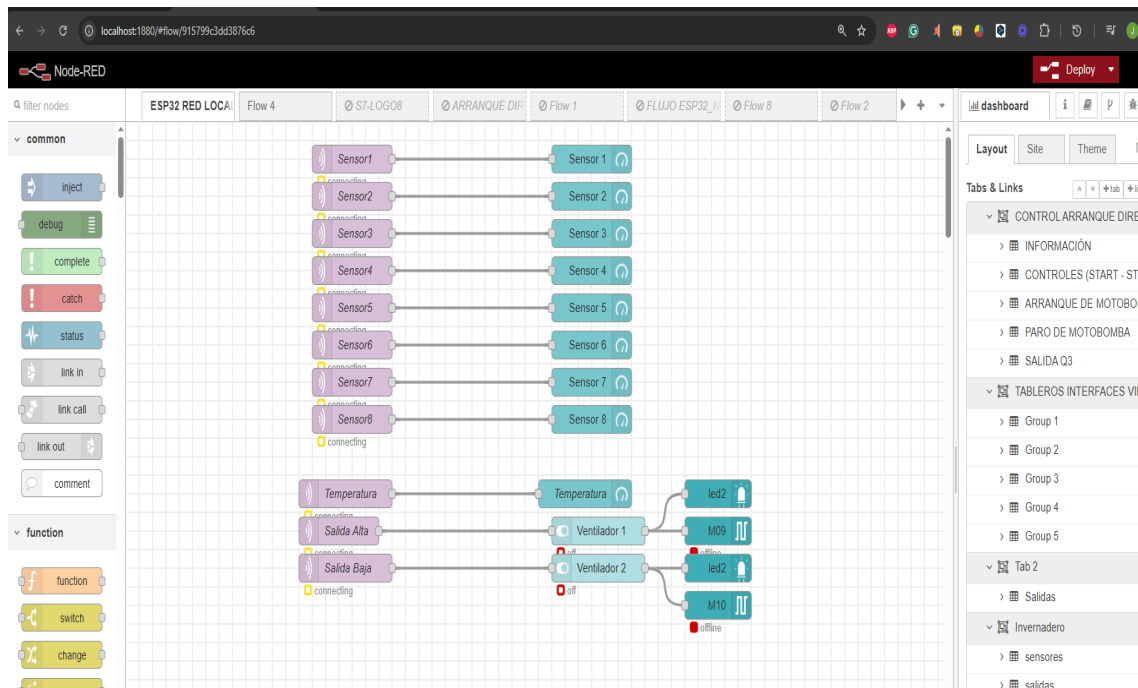


Figura 4.5 Configuración de la plataforma de IoT Node-RED del ESP32 con sensores de humedad del suelo y de humedad y temperatura ambiental en aplicación de red local para invernadero. Elaboración propia.

la plataforma Node-RED. Con esta información, se definen los condicionales que permiten emitir señales de control hacia las marcas (variables internas) de los PLCs LOGO!, a fin de gestionar la activación de actuadores como electroválvulas, responsables de regular el caudal de agua en el sistema, y un ventilador, cuya operación está asociada al control de ventilación del invernadero.

De manera complementaria, se realiza la integración y puesta en marcha de un sensor industrial de nivel hidrostático, el cual es configurado mediante el primer PLC LOGO!, permitiendo así una medición del nivel de líquido del depósito. Esta información resulta fundamental para la activación de la electroválvula 9 a partir de umbrales dinámicos. La arquitectura completa de integración, así como los esquemas de configuración de los controladores industriales en el entorno Node-RED, se ilustran en la Figura 4.6.

En las Figuras 4.7 a 4.8 se presentan los tableros virtuales (dashboards) desarrollados para la visualización en tiempo real de las variables medidas por los sensores conectados al módulo ESP32. En particular, se muestra la integración de los sensores de humedad del suelo SEN-HS-CAP, los cuales permiten monitorear las condiciones de riego, y del sensor DHT11, encargado de registrar la temperatura y humedad relativa del ambiente, así como de la activación del ventilador. Estos dashboards permiten al usuario observar de manera clara y

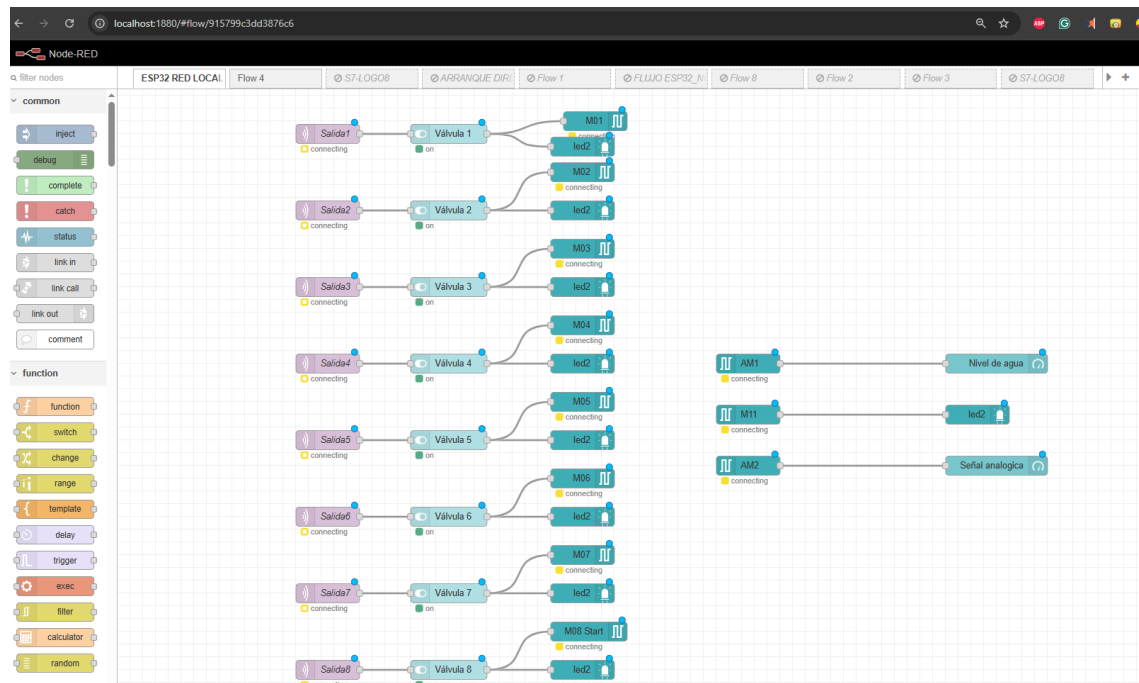


Figura 4.6 Configuración de la plataforma de IoT Node-RED de controladores industriales LOGO! y sensor de nivel hidrostático en aplicación de red local para invernadero. Elaboración propia.

estructurada el comportamiento dinámico de las variables ambientales, facilitando la toma de decisiones en tiempo real o la implementación de estrategias de control automático.

Por otro lado, en las Figuras 4.9 a 4.10 se ilustran los tableros virtuales correspondientes a las variables de salida de los actuadores controlados mediante los controladores programables Siemens LOGO!. Estas interfaces gráficas permiten supervisar el estado operativo de electroválvulas, así como verificar la correcta ejecución de las lógicas de control definidas en la plataforma Node-RED. Asimismo, se presentan los dashboards para las señales analógicas del transmisor de nivel hidrostático.

## 4.4. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados del funcionamiento del invernadero, integrando tecnologías de Internet Industrial de las Cosas (IIoT) con sistemas electrónicos de baja potencia. Los aspectos destacados se enlistan enseguida.

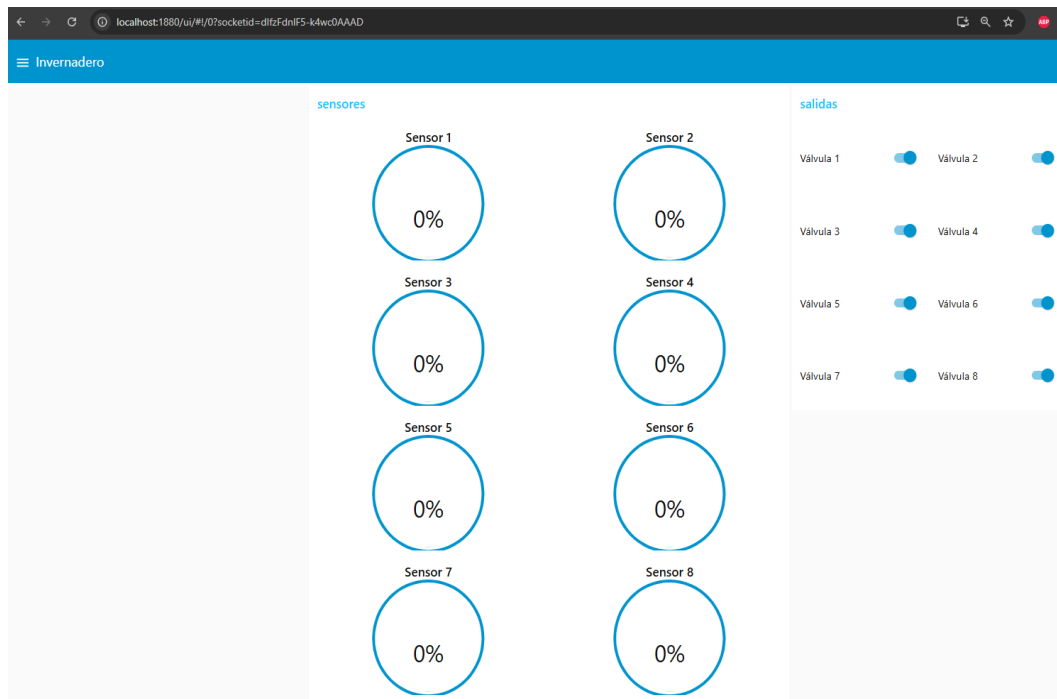


Figura 4.7 Tableros virtuales de sensores de humedad y temperatura del suelo instalados en el invernadero. Elaboración propia.

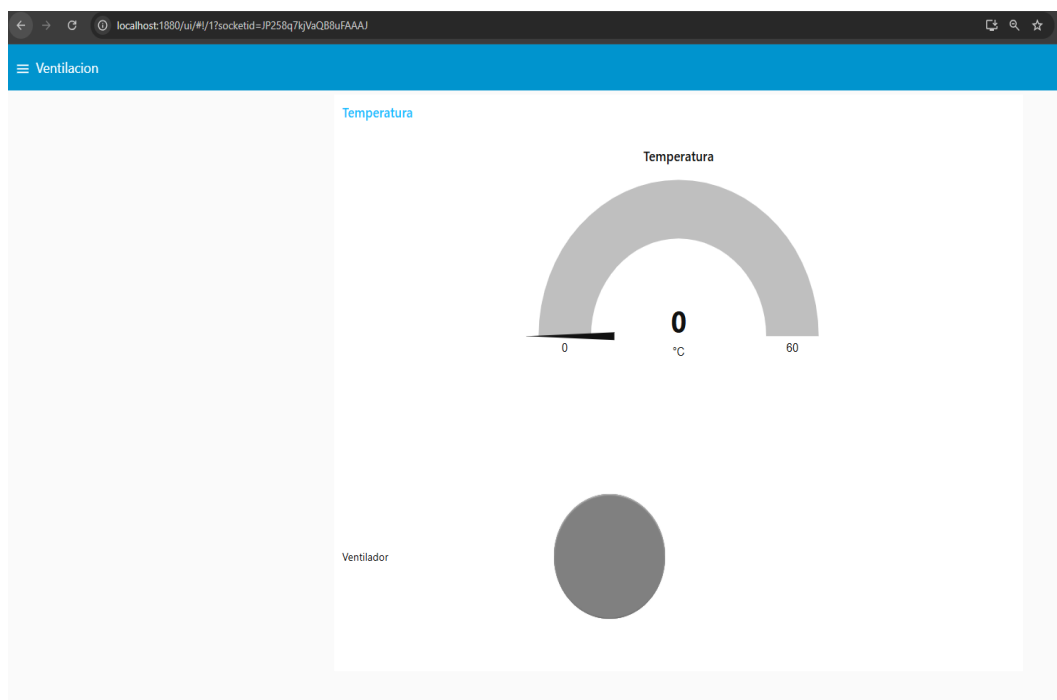


Figura 4.8 Tableros virtuales del sensor de temperatura ambiental con indicador de activación del ventilador en el invernadero. Elaboración propia.

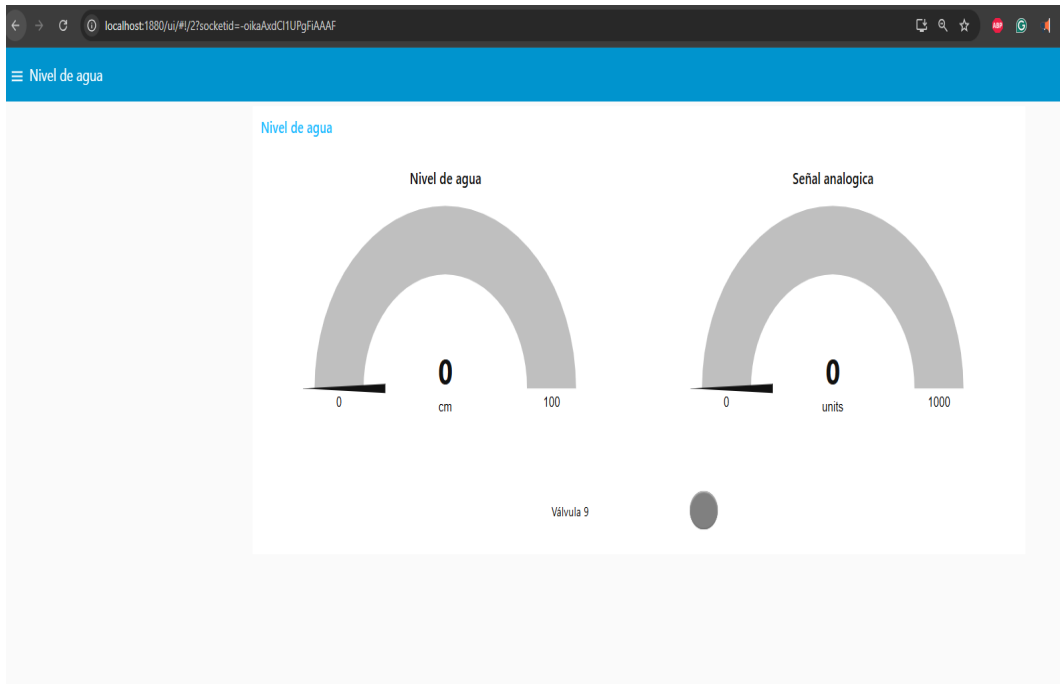


Figura 4.9 Tableros virtuales de señales analógicas del transmisor de nivel hidrostático en el invernadero. Elaboración propia.

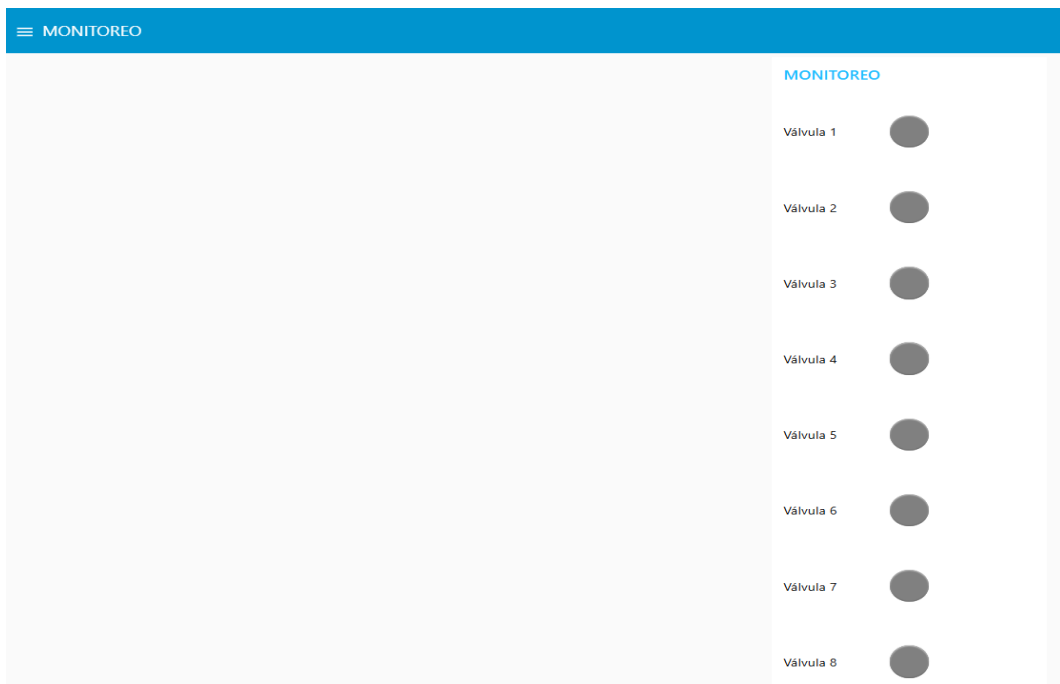


Figura 4.10 Dashboards que supervisan el estado operativo de las electroválvulas en el invernadero. Elaboración propia.

- 1. Integración del microcontrolador ESP32 con Node-RED mediante el protocolo MQTT.** La implementación del protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) en el entorno de comunicación entre el microcontrolador ESP32 y la plataforma Node-RED permitió establecer un enlace eficiente para la transmisión y recepción de datos en tiempo real. En este contexto, se configuró un broker MQTT local operando en la dirección IP 192.168.0.100 y en el puerto estándar 1883, permitiendo una comunicación fluida y estable basada en la arquitectura publicador/suscriptor. Los sensores conectados al ESP32, incluyendo el sensor DHT11 y los sensores de humedad del suelo SEN-HS-CAP, fueron programados para enviar los datos capturados hacia tópicos específicos en el broker MQTT de la red local. En particular, las lecturas de humedad del suelo fueron enviadas al tópico sensor/humedad, mientras que las mediciones de temperatura y humedad ambiental se publicaron en sensor/temperatura.

En Node-RED, los datos fueron recibidos mediante nodos MQTT configurados como suscriptores de los tópicos mencionados. Posteriormente, los datos se canalizaron hacia nodos de visualización dashboard, permitiendo el monitoreo en tiempo real de las variables ambientales y de suelo a través de interfaces gráficas de usuario accesibles desde cualquier dispositivo conectado a la red local. Esta arquitectura facilitó la implementación de estrategias de control basadas en condiciones predefinidas, como la activación del ventilador cuando la temperatura superaba umbrales críticos o la regulación del sistema de riego en función de los niveles de humedad del suelo.

- 2. Implementación del control de actuadores mediante PLC Siemens LOGO! y Node-RED.** La integración de los tres controladores programables Siemens LOGO! en red con la plataforma Node-RED se realizó mediante el protocolo de comunicación Siemens S7, utilizando librerías específicas que permitieron establecer un canal de intercambio de datos seguro y confiable. Una vez implementada la conectividad, los datos adquiridos por los sensores industriales, incluyendo un sensor de nivel hidrostático, fueron procesados en Node-RED para la toma de decisiones basadas en lógica de control previamente definida.

En particular, los datos del sensor hidrostático, que mide el nivel del depósito de agua, fueron canalizados hacia un nodo de procesamiento donde se aplicaron reglas condicionales para la activación de la electroválvula 9. Esta válvula, encargada de regular el flujo de agua hacia el sistema de riego, fue controlada de manera automática mediante un nodo output de Node-RED que transmitía las señales hacia el PLC LOGO!.

De manera adicional, se configuró la activación de las electro-válvulas y el ventilador para el control de riego y temperatura. Las electroválvulas se accionaron de forma automática cuando disminuyen a un nivel inferior a 40 % de humedad, variable proporcionada por los sensores SEN-HS- CAP,. El ventilador se activaba automáticamente al superar los umbrales de temperatura previamente definidos en el sensor DHT11. Los resultados mostraron un desempeño consistente en la ejecución de las lógicas de control, manteniendo el sistema en condiciones operativas apropiadas a lo largo del periodo de prueba de 30 días. En las Figuras 4.11-4.15, se ilustran el comportamiento del monitoreo de las variables humedad del ambiente y suelo del invernadero en funcionamiento, así como del control de riego por las electroválvulas y control de microclima con el ventilador

3. **Monitoreo en tiempo real mediante dashboards en Node-RED.** La plataforma Node-RED permitió el desarrollo de tableros virtuales (dashboards) orientados a la visualización estructurada de las variables ambientales y del suelo en el sistema IIoT. Los dashboards diseñados permitieron una supervisión integral del sistema, presentando gráficos de actualización en tiempo real que mostraban los valores de temperatura, humedad del suelo, nivel hidrostático del depósito y estado de los actuadores controlados por el PLC LOGO!.

En el tablero correspondiente al monitoreo de sensores con el microcontrolador ESP32, se presentaron indicadores y/o medidores que permitieron observar de manera clara el comportamiento dinámico de las variables de temperatura y humedad ambiental y del suelo, facilitando la toma de decisiones basadas en datos actualizados. Por otro lado, los tableros correspondientes a los controladores PLCs LOGO! presentaron indicadores visuales que mostraron el estado de activación o desactivación de las electroválvulas y el ventilador. Estos indicadores permitieron una verificación rápida del estado de los elementos controlados, asegurando así un monitoreo constante y una respuesta inmediata ante variaciones en las condiciones operativas del sistema.

4. **Consumo de recursos informáticos.** La implementación del protocolo MQTT contribuyó significativamente al bajo consumo de ancho de banda y recursos informáticos y energéticos del sistema IoT. La estructura basada en tópicos permitió que los dispositivos publicadores, como el ESP32, enviaran los datos de manera asincrónica y bajo demanda, evitando la saturación de la red con conexiones persistentes.

Para complementar los resultados obtenidos en la implementación del sistema de automatización del invernadero mediante ESP32, Node-RED y los PLCs Siemens LOGO! en red



Figura 4.11 Activación de electroválvula 9 en el invernadero. Elaboración propia.

con el protocolo S7, se ha desarrollado un video demostrativo que ilustra el funcionamiento integral del sistema, incluyendo la adquisición de datos mediante sensores ambientales, la transmisión mediante protocolo MQTT, el procesamiento en tiempo real en Node-RED y el control automático de actuadores a partir del algoritmo lógico programado en los PLCs LOGO!. Este video puede ser visualizado en el siguiente enlace: <https://bit.ly/44rVt1g>

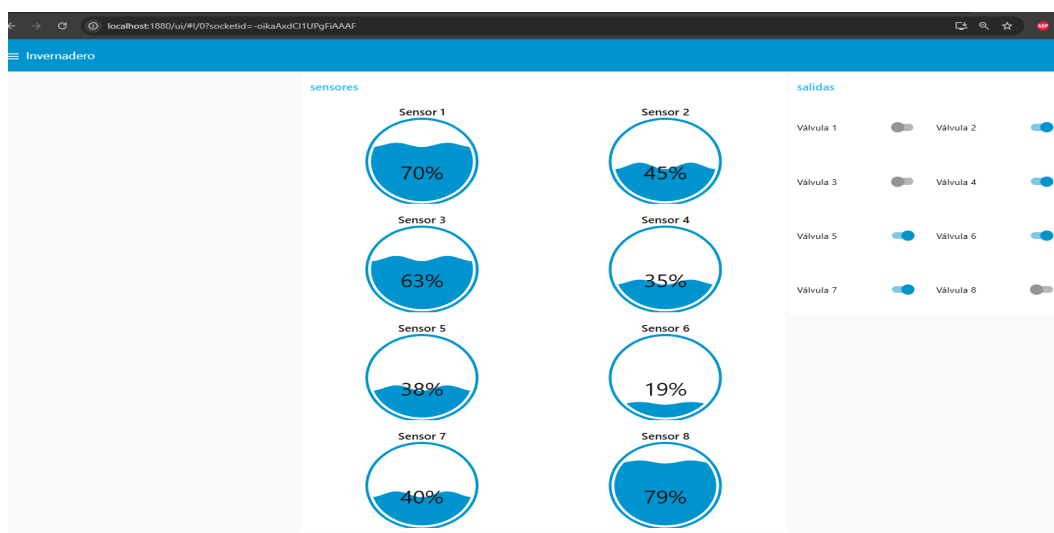


Figura 4.12 En operación tableros virtuales de sensores de humedad y temperatura del suelo instalados en el invernadero. Elaboración propia.

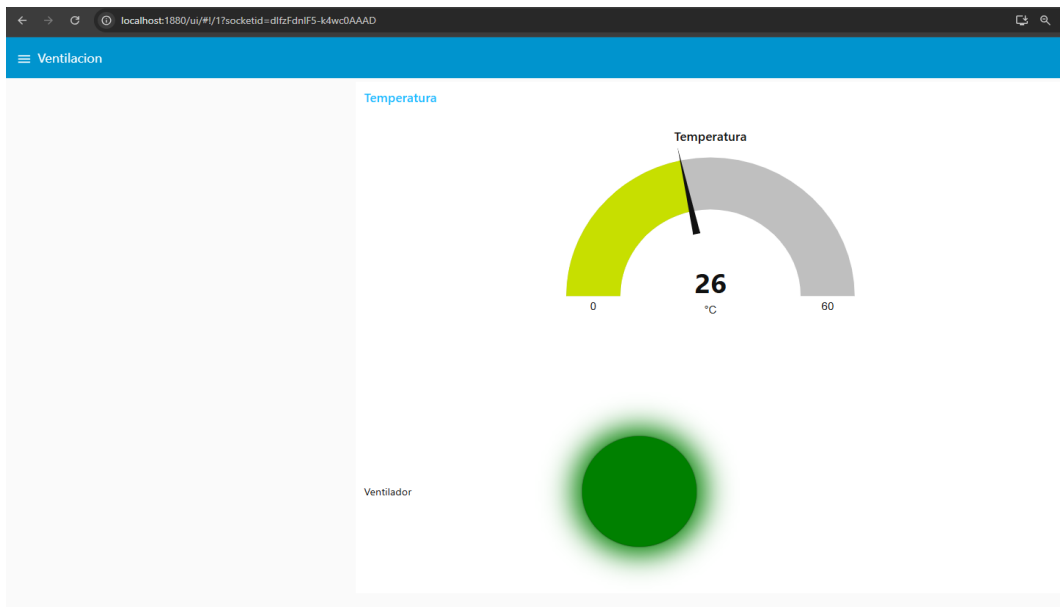


Figura 4.13 En operación tableros virtuales del sensor de temperatura ambiental con indicador de activación del ventilador en el invernadero. Elaboración propia.

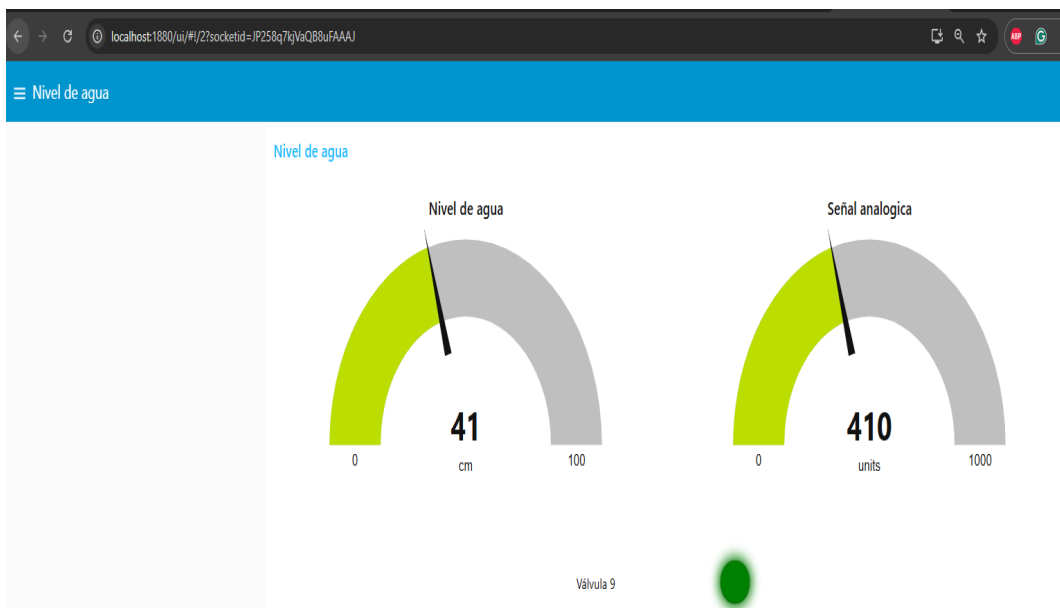


Figura 4.14 En operación tableros virtuales de señales analógicas del transmisor de nivel hidrostático en el invernadero. Elaboración propia.

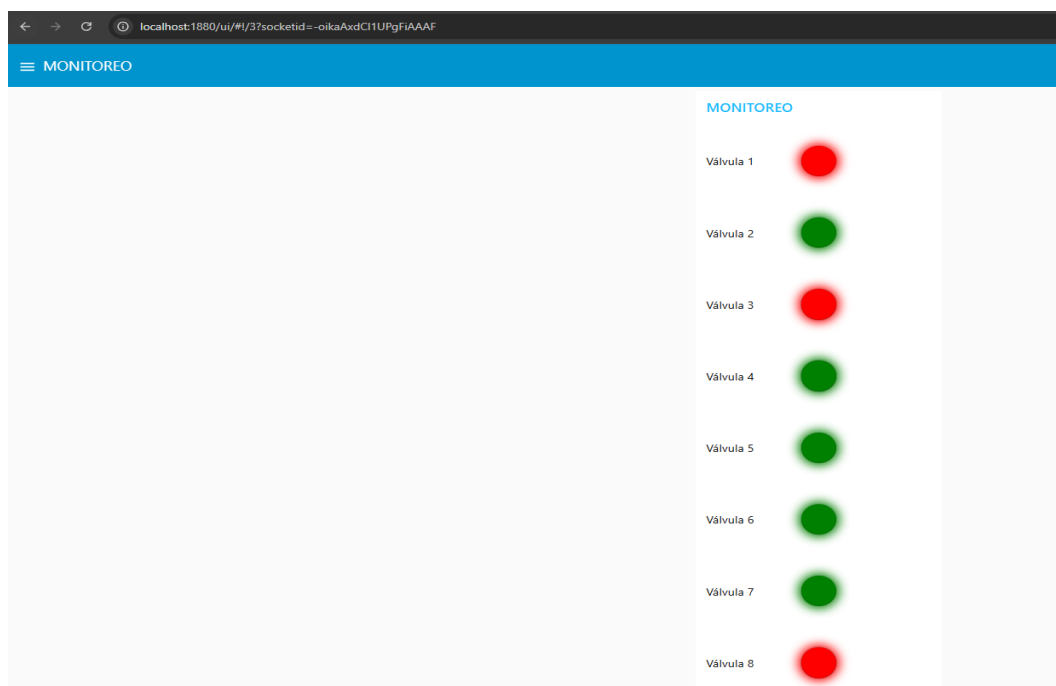


Figura 4.15 En operación dashboards que supervisan el estado operativo de las electroválvulas en el invernadero. Elaboración propia.

# Capítulo 5

## Conclusiones

En este documento, se planteó una propuesta integral para la implementación de un sistema de automatización en un invernadero académico mediante el empleo de tecnologías IoT, controladores PLC y Node-RED. Dicho sistema fue diseñado para monitorear y controlar variables críticas como temperatura y humedad del ambiente y suelo, así como el nivel de agua, asegurando condiciones óptimas para el cultivo de plantas en entornos controlados.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se integraron sensores de humedad, temperatura y nivel hidrostático conectados a un módulo ESP32, los cuales transmiten datos a una plataforma Node-RED a través del protocolo MQTT. Esta arquitectura conllevó a la implementación de tableros virtuales que facilitan la supervisión en tiempo real de las variables ambientales, posibilitando una gestión eficiente de los sistemas de riego y ventilación del invernadero.

La integración de controladores lógicos programables Siemens LOGO! resultó fundamental para la coordinación de los actuadores (electroválvulas y ventiladores), garantizando una respuesta automática y precisa basada en las condiciones ambientales detectadas por los sensores a partir de la comunicación establecida con los nodos MQTT de los controladores LOGO! y ESP32 en Node-RED. Esta implementación evidenció su efectividad en la preservación del microclima del invernadero, minimizando la intervención humana y optimizando el uso de recursos hídricos y energéticos.

Adicionalmente, el sistema desarrollado abre la posibilidad de incorporar algoritmos predictivos y estrategias avanzadas de control, así como la implementación de módulos adicionales que permitan expandir las capacidades del invernadero. Asimismo, se resalta el potencial educativo de este tipo de proyectos, dado que permite a los estudiantes adquirir competencias prácticas en automatización industrial, IoT y gestión sostenible de recursos naturales.

Finalmente, el sistema automatizado propuesto no solo contribuye al fortalecimiento de la formación académica en áreas tecnológicas y agrícolas, sino que también representa un modelo replicable y escalable para su aplicación en diversos contextos, promoviendo la agricultura sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.

Como parte del trabajo futuro, se analizará y evaluará la eficiencia energética de los dispositivos IoT empleados en el invernadero, considerando tanto los módulos de adquisición de datos como los actuadores de control, a lo largo de un periodo determinado. Esto para que el invernadero sea completamente sostenible.

# Bibliografía

- [1] Abdalla, Z. F. y El-Ramady, H. (2022). Applications and challenges of smart farming for developing sustainable agriculture. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, **6**(2022): 81–90.
- [2] Achour, Y., Ouammi, A., y Zejli, D. (2021). Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **147**: 111251.
- [3] Agraces, C. y Omar, O. (2024). *Desarrollo de un sistema de automatización de un invernadero para cultivo de melones en el cantón Lomas de Sargentillo*. Tesis de maestría, La Libertad, Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2024.
- [4] Alimin, N. N., Pertiwi, E. G., y Purwaningrum, L. (2021). Establishing sustainable habits of students in green school bali through green interior design. En: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, Vol. 905, p. 012075.
- [5] Alvarado Chávez, J. A. *et al.* (2018). *Producción de fresa en sistemas hidropónicos bajo condiciones de invernadero*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- [6] Avilés, J., Miranda, R., Becerra, G., Morales, J., Mujica, H., Flores, J., Márquez, C., y Martínez, R. (2018). Proportional-integral control for a water supply system prototype using the iot platform node-red. *Congreso Nacional de Control Automático*.
- [7] Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., y Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*, **373**: 133753.
- [8] Baez Vargas, D. A. (2025). Huerto inteligente de tomates para entornos cerrados que aporte a una conciencia ambiental.
- [9] Bersani, C., Ruggiero, C., Sacile, R., Soussi, A., y Zero, E. (2022). Internet of things approaches for monitoring and control of smart greenhouses in industry 4.0. *Energies*, **15**(10): 3834.
- [10] Cambra Baseca, C. (2020). *PLAtaforma TEcnológica Multimedia para la Agricultura de Precisión (PLATEM Precision Agriculture)*. Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de València.
- [11] Castañeda Rodríguez, J., Guzmán Ruiz, A., Lopez Macias, A. S., *et al.* (2023). Efecto de bioherbicidas en malezas bajo condiciones de invernadero.

- [12] Cevallos, G. E., Chávez, J. E. C., Cobeña, Á. V., y Mera, A. A. (2025). Nuevas tecnologías y pensamiento creativo en la era de la inteligencia artificial: New technologies and creative thinking in the era of artificial intelligence. *Revista de Investigación Científica TSE DE*, **8**(L11): ág–1.
- [13] Cheng, C., Fu, J., Su, H., y Ren, L. (2023). Recent advancements in agriculture robots: Benefits and challenges. *Machines*, **11**(1): 48.
- [14] de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, O. (2022). Alimentación y agricultura sostenibles. Accesado el 20 de Febrero, 2025.
- [15] Electronics, M. (2025a). Dht11 humidity temperature sensor.
- [16] Electronics, U. (2025b). Sensor de humedad suelo capacitivo anticorrosivo.
- [17] García, J. L. G., Ponce, J. L. T., Baque, R. C. P., Ponce, M. A. T., Pincay, O. F. V., y Jalca, J. J. R. (2023). Aprendizaje digital: estrategias y transformaciones en la educación y el aprendizaje. *Editorial Internacional Alema*.
- [18] García, I., León, R., Espín, W., y Andrade, J. (2024). El uso de la inteligencia artificial en un invernadero. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, **8**: 910–930.
- [19] Gutiérrez-Flores, H., Kau-Pérez, J. A., de Alba-Romenus, K., y Sandoval-Rangel, A. (2022). Diseño e implementación de un sistema de control automático de irrigación y fertilización para invernaderos bajo el paradigma de la agricultura 4.0. *Agraria*, **1**(SE1): 11–11.
- [20] Jararweh, Y., Fatima, S., Jarrah, M., y AlZu'bi, S. (2023). Smart and sustainable agriculture: Fundamentals, enabling technologies, and future directions. *Computers and Electrical Engineering*, **110**: 108799.
- [21] Kavga, A., Thomopoulos, V., Barouchas, P., Stefanakis, N., y Liopa-Tsakalidi, A. (2021). Research on innovative training on smart greenhouse technologies for economic and environmental sustainability. *Sustainability*, **13**(19): 10536.
- [22] Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., y Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, **13**(9): 4883.
- [23] Kodali, R. K. y Anjum, A. (2018). Iot based home automation using node-red. En: *2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*. IEEE, pp. 386–390.
- [24] Kushal, R., Kumar, D., Shashank, G., Anantharamaiah, B., y Kumar, M. (2024). Immuno-yield: A smart greenhouse for disease detection and prevention. En: *2024 International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems (ICIICS)*. IEEE, pp. 1–7.
- [25] Li, Q., Cao, B., Wang, X., Wu, J. J., y Wang, Y. K. (2021). Systematic water-saving management for strawberry in basic greenhouses based on the internet of things. *Applied Engineering in Agriculture*, **37**(1): 205–217.

- [26] Mäenpää, H., Tarkoma, S., Varjonen, S., y Vihavainen, A. (2015). Blending problem- and project-based learning in internet of things education: Case greenhouse maintenance. En: *Proceedings of the 46th ACM technical symposium on computer science education*. pp. 398–403.
- [27] Maraveas, C. (2022). Incorporating artificial intelligence technology in smart greenhouses: Current state of the art. *Applied Sciences*, **13**(1): 14.
- [28] Maraveas, C., Piromalis, D., Arvanitis, K. G., Bartzanas, T., y Loukatos, D. (2022). Applications of iot for optimized greenhouse environment and resources management. *Computers and Electronics in Agriculture*, **198**: 106993.
- [29] Maraveas, C., Karavas, C.-S., Loukatos, D., Bartzanas, T., Arvanitis, K. G., y Symeonaki, E. (2023). Agricultural greenhouses: Resource management technologies and perspectives for zero greenhouse gas emissions. *Agriculture*, **13**(7): 1464.
- [30] Montes-Fonseca, L., González-Barriga, D., Hernández-Narváez, D., Orona-Domínguez, L. M., Rosas-Pérez, G., y Lozoya, C. (2022). Invernadero automatizado, laboratorio multidisciplinario para el desarrollo de retos vivenciales. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E50): 605–618.
- [31] Mrabet, R. (2023). Sustainable agriculture for food and nutritional security. En: *Sustainable agriculture and the environment*. Elsevier, pp. 25–90.
- [32] Muhammad Shoaib Farooq, Rizwan Javid, S. R. y Atal, Z. (2022). Iot based smart greenhouse framework and control strategies for sustainable agriculture. *IEEE Access*, **10**: 99420.
- [33] OMS, P., Unicef, *et al.* (2022). Versión resumida de el estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022.
- [34] Perdomo, É. J. M. (2023). Sistema inteligente de automatización, monitoreo y control de invernaderos mediante uso de iot y el microcontrolador esp-32 con aplicación de aprendizaje automático. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
- [35] Post, H. (2024). Adiós a tener un terreno para plantar: crean una solución sin tierra para cultivar en cualquier lugar.
- [36] Pothuganti, K., Sridevi, B., y Seshabattar, P. (2021). Iot and deep learning based smart greenhouse disease prediction. En: *2021 international conference on recent trends on electronics, information, communication & technology (RTEICT)*. IEEE, pp. 793–799.
- [37] Rodríguez Uribe, J. (2024). *Sistema de automatizacion de invernaderos para la produccion de forraje verde para pymes ganaderas*. Tesis de doctorado.
- [38] Sahdev, R., Kumar, M., y Dhingra, A. (2018). Development of empirical expression for the groundnuts drying inside a greenhouse. *International Food Research Journal*, **25**(5): 1858–1863.
- [39] Sosa, M. E. y Sosa, E. O. (2017). Internet de las cosas en entornos académicos. caso de éxito en la universidad de misiones. *Elektron*, **1**(1): 23–28.

- [40] Soussi, M., Chaibi, M. T., Buchholz, M., y Saghrouni, Z. (2022). Comprehensive review on climate control and cooling systems in greenhouses under hot and arid conditions. *Agronomy*, **12**(3): 626.
- [41] Tabaa, M., Chouri, B., Saadaoui, S., y Alami, K. (2018). Industrial communication based on modbus and node-red. *Procedia computer science*, **130**: 583–588.
- [42] Tian, Z., Wang, J.-W., Li, J., y Han, B. (2021). Designing future crops: challenges and strategies for sustainable agriculture. *The Plant Journal*, **105**(5): 1165–1178.
- [43] Torres, I. A. G., León, R. E. C., Espín, W. R. N., y Andrade, J. G. V. (2024). El uso de la inteligencia artificial en un invernadero. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, **8**(4): 910–930.
- [44] Trigo, A., Marta-Costa, A., y Fragoso, R. (2021). Principles of sustainable agriculture: Defining standardized reference points. *Sustainability*, **13**(8): 4086.
- [45] Vera Polanco, L. A. (2023). *Prototipo de telecontrol para agricultura inteligente mediante iot y tecnología inalámbrica*. B.S. thesis, Jipijapa-Unesum.